

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-2-95-105>
УДК: 635.64:537.525:577.1

И.М. Кайгородова^{1*}, Е.Г. Козарь¹,
В.И. Луканин²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр овощеводства» (ФГБНУ ФНЦО) 143072, Россия, Московская область, Одинцовский район, п. ВНИИССОК, Селекционная, д. 14

² ФГБНУ ФИЦ «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН» 119991, Россия, ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

*Автор для переписки: kaigorodova-i@mail.ru

Финансирование. Статья опубликована при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. «Селекционно-семеноводческий центр овощных культур» (соглашение № 075-15-2025-245).

Вклад авторов: Кайгородова И.М., Козарь Е.Г.: концептуализация, методология, ресурсы, проведение исследования, формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование. Луканин В.И.: ресурсы, методология, проведение исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кайгородова И.М., Козарь Е.Г., Луканин В.И. Влияние нативных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов электролитов на развитие и устойчивость растений томата. *Овощи России*. 2026;(2):95-105. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-2-95-105>

Поступила в редакцию: 10.11.2025

Принята к печати: 09.02.2026

Опубликована: 30.04.2026

Irina M. Kaigorodova^{1*},
Elena G. Kozar¹, Vladimir I. Lukanin²

¹ Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Vegetable Center» (FSBSI FSVC) 14, Selektsionnaya str., VNISSOK, Odintsovo district, Moscow region, Russia, 143072

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences 38, Vavilov str., Moscow, Russia, 119991

*Corresponding Author: kaigorodova-i@mail.ru

Funding. This article was published with the support of a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation Center to the Vegetable Breeding and Seed Production (agreement no. 075-15-2025-245).

Authors' Contribution: Kaigorodova I.M., Kozar E.G.: conceptualization, methodology, resources, investigation, formal analysis, writing – review & editing. Lukanin V.I.: resources, methodology, investigation.

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

For citations: Kaigorodova I.M., Kozar E.G., Lukanin V.I. The effect of native and plasma-activated high-frequency glow discharge of aqueous electrolyte solutions on the development and stability of tomato plants. *Vegetable crops of Russia*. 2026;(2):95-105. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2026-2-95-105>

Received: 10.11.2025

Accepted for publication: 09.02.2026

Published: 30.04.2026

Влияние нативных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов электролитов на развитие и устойчивость растений томата

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Разработка инновационных методов предпосевной обработки семян – это ключ к развитию устойчивого и высокопродуктивного земледелия. В отличие от традиционного протравливания, использование электролитов после активации их растворов низкотемпературной плазмой для обработки семян может позволить решить комплекс биологических, экологических и производственных проблем овощеводства, поэтому является перспективным направлением исследования. Данный подход к праймированию семян позволяет достичь несколько эффектов: уничтожение поверхностной семенной инфекции, повышение гидрофильности, активации ферментативных систем и скорости ростовых процессов. Данное исследование направлено на оценку биологической эффективности предпосевной обработки семян томата растворами электролитов, активированных низкотемпературной плазмой.

Методика. Семена томата восприимчивого к фитофторозу сорта Таллалихин 186 обрабатывали активированными и исходными растворами KNO₃ и KCl при различных температурах (22°C и 50°C) и экспозициях (от 30 до 120 минут) с последующей оценкой всхожести, биометрических параметров проростков, продуктивности растений и пораженности их болезнями. Эффекты действия обработки оценивали сразу после воздействия и через год хранения обработанных семян в лабораторных и полевых опытах.

Результаты. Установлено, что плазменная активация растворов значительно усиливает ростостимулирующие и иммуномодулирующие свойства электролитов. Наибольшая эффективность на ювенильной стадии развития достигнута при обработке семян активированным 1% раствором KNO₃ при 22°C, где лабораторная всхожесть повысилась на 16%, а длина корешка проростков увеличилась на 138%. Важным результатом является положительное последствие праймирования семян на продуктивность и устойчивость растений. Все варианты с активированными растворами, и особенно активированный раствор KNO₃, стабильно обеспечивали максимальное увеличение товарной урожайности и значительное снижение пораженности плодов фитофторозом.

Заключение. Электрохимическая активация растворов значительно усиливает физиологическую активность электролитов, что открывает перспективы для разработки экологически чистых способов стимуляции роста и развития растений. Технология демонстрирует потенциал для повышения продуктивности и устойчивости томата к патогенам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

плазменно-активированная вода, плазменный разряд, томат, KNO₃, KCl, подготовка семян, прорастание семян, урожайность, фитофтороз

The effect of native and plasma-activated high-frequency glow discharge of aqueous electrolyte solutions on the development and stability of tomato plants

ABSTRACT

Relevance. The development of innovative methods of pre-sowing seed treatment is the key to the development of sustainable and highly productive agriculture. Unlike traditional pickling, the use of electrolytes after activation of their solutions with low-temperature plasma for seed treatment can solve a complex of biological, environmental and industrial problems of vegetable growing, therefore it is a promising area of research. This approach to seed priming allows achieving several effects: the destruction of surface seed infection, increased hydrophilicity, activation of enzymatic systems and the rate of growth processes. This study is aimed at evaluating the biological effectiveness of pre-sowing treatment of tomato seeds with electrolyte solutions activated by low-temperature plasma.

Methodology. Tomato seeds of the late blight-susceptible Tallalikhin 186 variety were treated with activated and initial solutions of KNO₃ and KCl at various temperatures (22°C and 50°C) and exposures (from 30 to 120 minutes), followed by an assessment of germination, biometric parameters of seedlings, plant productivity and disease incidence. The effects of the treatment were evaluated immediately after exposure and after a year of storage of the treated seeds in laboratory and field experiments.

Results. It was found that plasma activation of solutions significantly enhances the growth-stimulating and immunomodulatory properties of electrolytes. The highest efficiency at the juvenile stage of development was achieved when treating seeds with an activated 1% solution of KNO₃ at 22°C, where laboratory germination increased by 16%, and the length of the root of seedlings increased by 138%. An important result is the positive aftereffect of seed priming on plant productivity and resistance. All variants with activated solutions, and especially the activated KNO₃ solution, consistently provided a maximum increase in commercial yields and a significant reduction in fruit blight.

Conclusion. Electrochemical activation of solutions significantly enhances the physiological activity of electrolytes, which opens up prospects for the development of environmentally friendly ways to stimulate plant growth and development. The technology demonstrates the potential to increase tomato productivity and resistance to pathogens.

KEYWORDS:

plasma-activated water, plasma discharge, *Solanum lycopersicum* L., KNO₃, KCl, seed preparation, seed germination, yield, late blight



Введение

Урожайность сельскохозяйственных культур в значительной степени определяется всхожестью используемых при посеве семян. Даже незначительное снижение всхожести на 10–20% может привести к двух-трехкратному снижению урожайности [1]. В аграрной практике, стремясь к получению стабильных и высоких урожаев, производители сталкиваются с различными препятствиями для получения дружных всходов, в связи с чем использование высококачественного посевного материала и его предпосевная подготовка становятся необходимостью.

В мире существуют и постоянно совершенствуются различные методы предпосевной подготовки, обеспечивающие достижение данного эффекта [2]. К традиционным методам относятся приемы, направленные на преодоление состояния покоя семян, такие как скарификация, стратификация и химическая обработка [3–5]. Семена, являясь репродуктивными органами растений, проходят период покоя, чтобы пережить неблагоприятные условия. Многие находящиеся в состоянии покоя семена не прорастают даже в оптимальных условиях из-за твердой оболочки, наличия ингибиторов, незрелого зародыша, непроницаемости семенной оболочки для кислорода и воды, а также гормонального дисбаланса [6, 7]. Фитогормон абсцизовая кислота (АБК) отвечает за поддержание фазы покоя, в то время как гибберелловая кислота (ГК) ответственна за ее нарушение. Эти фитогормоны синтезируются в семенах в ответ на физические факторы, активируют сигнальные реакции и индуцируют образование ферментов, способствующих разложению запасных веществ. Регулируя их баланс, можно инициировать прорастание [8].

Ученые продолжают поиск новых, более эффективных методов. Среди них – воздействие на семена малых доз ионизирующего излучения [9, 10], кратковременная тепловая обработка [1, 11, 12], ударно-волновая (акустическая) обработка [13], экспонирование в электрическом и магнитном полях [14], лазерное облучение [15, 16], а также предпосевное замачивание в растворах биологически активных веществ, способное увеличить всхожесть и урожайность на 15–25% [17–19]. Одним из наиболее перспективных методов является применение низкотемпературной плазмы (NTP), имеющей широкий потенциал для промышленного применения [20, 21]. Этот метод представляет собой экологически чистую альтернативу использованию токсичных химических веществ, вредных для людей, животных и окружающей среды [22–24].

Плазма, называемая четвертым состоянием вещества, представляет собой частично или полностью ионизированный газ. Для обработки биологических объектов применима нетепловая (холодная, низкотемпературная) плазма (NTP), существующая при температурах, близких к комнатной [25]. NTP генерируется с помощью различных типов электрических разрядов: коронный разряд, плазменные струи, диэлектрический барьерный разряд, скользящий дуговой разряд и микроволновый разряд [26–30]. Помимо прямой обработки, применяется опосредованное воздействие через плазменно-активированную воду (PAW) или воздух, эффекты от которых могут сохраняться благодаря присутствию стабильных активных частиц кислорода и азота [31–33].

Изначально атмосферно-плазменные технологии нашли применение для дезинфекции поверхностей [34, 35] и в медицине – для стерилизации, заживления ран и терапии [36–39]. Активные формы кислорода и азота, образующиеся в плазме, являются ключевыми агентами в этих процессах

[40]. Учитывая эффективность в медицине, данную технологию начали применять для уничтожения бактериальных и грибных патогенов на пищевых продуктах без вредного воздействия на их качество [41, 42]. Плазменная обработка считается экологически чистой технологией, вызывающей минимальные изменения в продуктах [43], и является высокоэффективным инструментом для их обеззараживания и продления срока хранения [44, 45].

Разработки с применением холодной плазмы активно внедряются в сельское хозяйство для обработки семян. Первый зарегистрированный опыт был описан в 1994 году: обработка семян сои холодной плазмой приводила к усилению прорастания и роста [46]. Положительное влияние отмечено на семенах томата [47], редиса [48, 49], подсолнечника [50], кукурузы [51], шпината [52], а также при использовании PAW для агрономических целей [53]. Холодная плазма атмосферного или низкого давления – это новая технология для улучшения прорастания семян, включающая как прямое воздействие, так и косвенное – через PAW [54].

Считается, что NTP действует как стрессор, состоящий из активных форм кислорода и азота (RONS), и заряженных частиц, что может вызывать адаптивную реакцию и повышать толерантность организма. Положительными эффектами являются стерилизация поверхности семян и усиление роста проростков, что делает NTP перспективным экологически чистым средством для праймирования семян [55]. Практическое применение NTP на семенах пшеницы обеспечивает эффективное обеззараживание от бактерий, грибов и насекомых-вредителей, усиливает прорастание и рост, увеличивает срок хранения зерна и улучшает качество теста [56]. Технология эффективна против конидий грибов и микотоксинов на зерновых культурах [57, 58], может использоваться для обеззараживания кормов [59]. Прямая плазменная обработка и обработка PAW способны изменять физические и биохимические свойства семян, приводя к усилению всхожести и роста рассады [60]. Индукция устойчивости растений к патогенам с помощью плазмы («плазменная вакцинация») становится новой областью исследований [61].

В общем, механизмы воздействия NTP на семена и растения можно систематизировать следующим образом:

1. Воздействие плазмы повышает гидрофильность поверхности, что усиливает водопроницаемость и поглощение воды, необходимое для прорастания [62–65]. Это происходит due to химическим изменениям и выщелачиванию поверхностной мембраны [66]. Кратковременная обработка может удалять восковые слои кутикулы, аналогично механической скарификации, тогда как длительное воздействие способно повреждать семена [63, 67].

2. Генерируемые плазмой RONS действуют как сигнальные молекулы, инициируя каскады прорастания [68]. Обработка плазмой может увеличивать содержание гиббереллиновой кислоты (ГК) и снижать уровень абсцизовой кислоты (АБК), что способствует активности α -амилазы и мобилизации запасных веществ [69, 70]. Перекись водорода (H_2O_2) и оксид азота (NO), образующиеся при обработке, являются ключевыми сигнальными молекулами, регулирующими гормональный баланс и нарушающими состояние покоя [71, 72].

3. Плазма может повышать устойчивость растений к биотическим стрессам. Обработка семян томатов и риса холодной плазмой снижает поражение бактериальными патогенами [73, 74]. Она также индуцирует экспрессию генов устой-

чивости к патогенам [75, 76]. Орошение PAW может индуцировать защитную систему растений без прямого противомикробного действия [77]. Кроме того, обработка PAW повышает засухоустойчивость растений, как это показано на примере сорго и хлопчатника [78, 79].

Несмотря на обнадеживающие результаты, технология широкого применения НТР все еще находится в стадии развития для многих овощных культур. Хотя повышение жизнеспособности растений благодаря плазменной обработке хорошо задокументировано в лабораторных условиях, доказательства ее эффективности в полевых условиях и на сельскохозяйственных объектах все еще недостаточны [54]. Для оптимизации и модернизации плазменных систем необходимы дальнейшие исследования, в том числе направленные на изучение воздействия на разные культуры, подбор оптимальных режимов обработки и углубленное изучение механизмов ее действия [61, 80]. Таким образом, обработка нетермической плазмой представляет собой новый и эффективный экологичный метод для инактивации поверхностной микрофлоры семян, стимуляции их прорастания и повышения устойчивости растений к стрессам, требующий дальнейших исследований для раскрытия своего полного потенциала.

Цель исследований: изучить влияние нативных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов различных электролитов на всхожесть семян томата, развитие проростков, продуктивность растений и устойчивость к болезням.

Методика

Семена томата сорта Таллалихин 186 (селекции РУП «Институт плодородия», Республика Беларусь) были обработаны 1% водными растворами электролитов KCl и KNO₃ без активации (исходные, нативные) и активированных плазмой (активированные) при температуре 22°C и 50°C. Праймирование проводили путем замачивания семян в соответствующих вариантах растворов с экспозицией 30, 60 и 120 минут, с последующим подсушиванием на воздухе до сыпучего состояния. В качестве контрольных вариантов – семена, обработанные дистиллированной водой. Повторность четырехкратная, по 60 семян в повторности. Подсушенные семена после делили на две части. Одну половину из каждого варианта обработки сразу раскладывали на увлажненную фильтровальную бумагу и проращивали во влажной камере в течение 14 суток. Учет лабораторно всхожести, измерение длины корешка, стебля, оценку степени развития и сырую массу проростков проводили по стандартным методикам [81].

Вторую часть закладывали на хранение в бумажных пакетах при комнатной температуре и ставили на проращивание через год после обработки. После проведения учетов развития проростков в лабораторных условиях (аналогично описанному выше), из каждого варианта праймирования отбирали по десять семян для пикировки в кассеты с универсальным питательным грунтом торговой марки «Просто». Рассадку выращивали в вегетационной камере с досвечиванием фитолампами в режиме день/ночь 16 ч/8 ч при температуре 25/18°C в течение 30 суток.

Посадку готовой рассады томата в открытый грунт в условиях Центрального Нечерноземного региона проводили в первой декаде июня. Почвы опытного участка производственной базы ФГБНУ ФНЦО дерново-подзолистые средне-суглинистые. По содержанию гумуса в пахотном слое почвы относятся к слабогумусным, с низкой обогаченностью гумуса азотом и невысоким содержанием лабильного органического вещества. В составе гумуса преобладают фульвокислоты, тип гумуса – гуматнофульватный. По комплексу физико-химических свойств и составу поглощающего комплекса почвы характеризуются реакцией среды от близкой к нейтральной до нейтральной. Гидролитическая кислотность очень низкая, сумма поглощенных оснований повышенная. Содержание подвижных форм азота, определяемого по Корнфилду, очень низкое. Подвижный фосфор в изучаемых почвах характеризуется очень высокой обеспеченностью по Кирсанову (более 250 мг/кг почвы). Содержание обменного калия характеризуется обеспеченностью от средней до повышенной.

Погодные условия в период вегетации в 2024 году сильно отличались от среднесезонных показателей (табл. 1), что в дальнейшем отразилось на развитии растений и их продуктивности.

В июне на фоне повышенных показателей среднесуточной температуры воздуха и большого количества выпавших осадков развитие растений в целом было нормальным. В июле в период завязывания плодов при высоких показателях температуры воздуха отмечено низкое количество выпавших осадков, что привело к почвенной засухе и отразилось на общей продуктивности растений. В период созревания плодов, наоборот, выпало большое количество осадков, что отразилось на фитосанитарной обстановке. В конце вегетации проводили мониторинг пораженности растений болезнями (фитофторозом) по соответствующей методике [82]. Уборку плодов, учет продуктивности и структуры урожая проводили в начале августа. Общая схема исследований представлена на рисунке 1.

Таблица 1. Температура воздуха и количество осадков за вегетационный период 2024 года (метеостанция ФНЦО)
Table 1. Air temperature and precipitation for the 2024 growing season (Federal Scientific Vegetable Center)

Основные показатели		Месяцы и декады								
		Июнь			Июль			Август		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Температура воздуха, °C	2024 год	19,6	19,5	18,1	24,0	23,1	21,2	17,1	15,9	14,4
	среднегодовое	14,4	15,4	16,4	17,4	17,8	17,7	16,8	17,7	18,3
Количество осадков, мм	2024 год	9,0	85,0	36,8	9,3	4,8	69,7	25,0	23,0	22,0
	среднегодовое	20,0	21,0	24,0	26,0	27,0	27,0	13,5	17,0	21,8

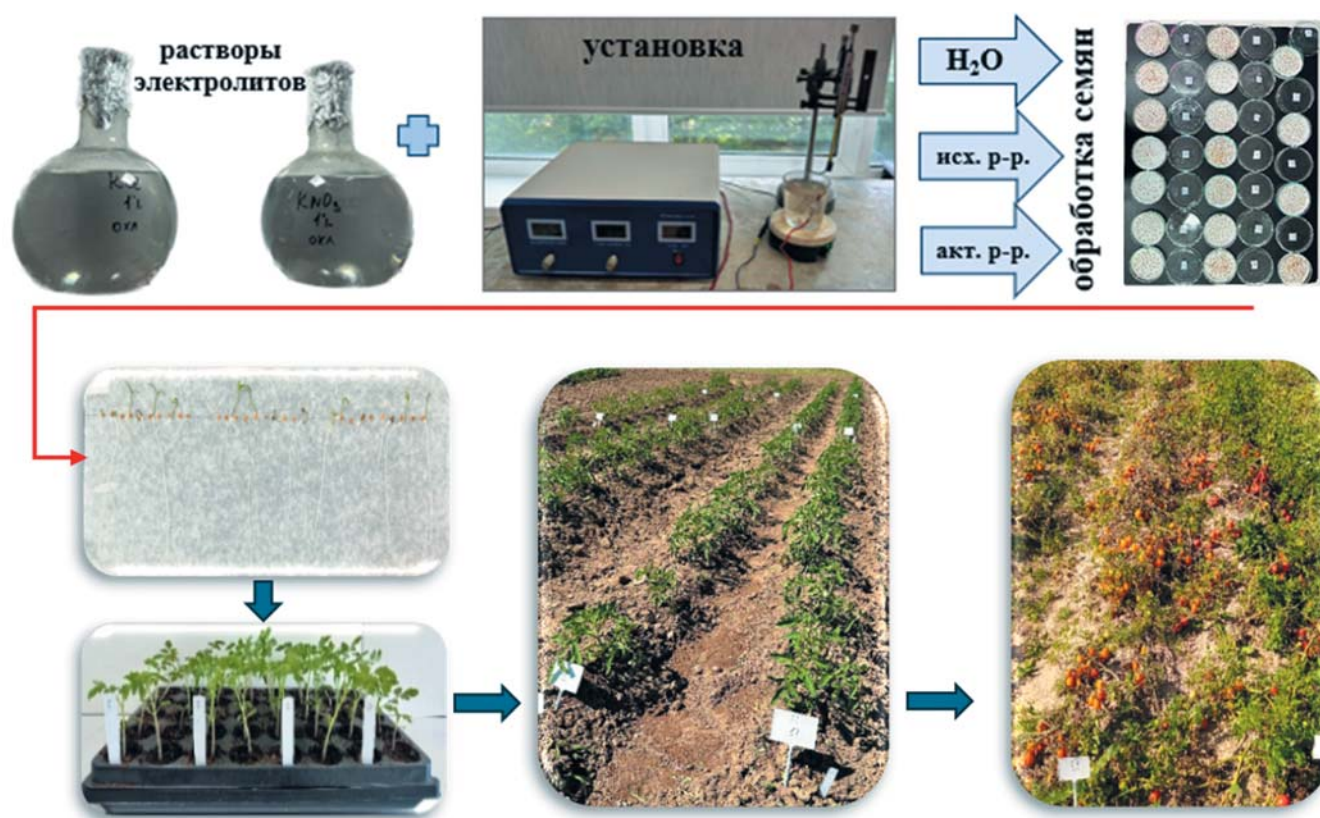


Рис.1. Общая схема исследований (2023-2024 годы)
Fig.1. General research scheme (2023-2024)

Основным критерием характера и направленности действия обработок на изучаемые параметры служил показатель биологической эффективности (БЭ%), отражающий отклонение значений в опыте от контроля, выраженное в процентах, которую рассчитывали по стандартной формуле. Обработку полученных данных проводили методами статистического анализа с использованием пакета ANOVA программы EXEL 2010 по стандартным методикам [83].

Результаты исследований

При оценке влияния обработки семян растворами солей, без активации (исх. р-р.) и активированные плазмой (акт. р-р), на развитие проростков томата, были отмечены различные эффекты действия (БЭ%), которые зависели от используемого электролита, температуры, экспозиции замачивания, хранения после обработки (в течение года). Развитие проростков отличалось уже на ранних этапах прорастания (табл. 2-5).

Обработка при комнатной температуре (22°C) и замачивании на 60 минут в исходном и активированном растворе KNO₃ (посев после обработки) приводила к увеличению лабораторной всхожести на 12% и 8% соответственно. Аналогичное замачивание в растворах KCl не оказало влияние на всхожесть. Активированные плазмой растворы, способствовали значимому увеличению скорости роста корешка проростков, благодаря данному воздействию длина увеличилась на 25% в растворе KNO₃, а в растворе KCl – на 39%. Нативные растворы обоих электролитов способствовали ингибированию роста стебля более, чем на 20%, тогда как активация растворов плазмой снимала этот негативный эффект. Длина стебля обработанных проростков в этих вариантах была на уровне контрольных, а общий балл развития существенно превышал контрольный вариант и соста-

вил 1,5-1,9 балла. Наиболее выраженное положительное действие по совокупности всех показателей при комнатной температуре отмечено в варианте с праймированием семян активированным раствором хлорида калия (табл. 2).

При увеличении экспозиции замачивания до 120 минут были отмечены изменения величины и направленности эффектов действия в зависимости от вариантов опыта (табл. 2). Следует отметить, что замачивание семян в воде (контроль) в течение двух часов уже приводило к увеличению всех учетных показателей относительно предыдущего опыта. Значимое положительное влияние на всхожесть относительно контроля из всех вариантов опыта оказал только нативный раствор KNO₃, в котором при двухчасовом замачивании всхожесть достигала 90%, что на 10% больше, чем при таком же замачивании в дистиллированной воде. Активированный раствор, наоборот, способствовал ингибированию прорастания и снижал всхожесть на 23% по сравнению с контролем. Замачивание в исходном растворе хлорида калия снижало процент всхожих семян до 73%, а его активация способствовала незначительной стимуляции прорастания (табл. 2).

В то же время, использование растворов KCl положительно сказалось на скорости роста корешка, где отмечено увеличение его длины на 40% при использовании исходного раствора и на 17% после активирования плазмой по сравнению со значением в контрольном варианте. Нативный раствор KCl также приводил к значимому увеличению развития проростка, средний балл развития отличался с контрольным значением в 2,6 раза. При замачивании в течение двух часов в активированном растворе KCl, в отличие от замачивания в течение часа, отмечается небольшое снижение эффекта, но все же балл развития проростков был выше соответствующего контроля в 1,7 раз.

Применение нативных растворов KNO₃ в данной серии эксперимента, при положительном влиянии на прорастание, вызвало ингибирование роста стебля проростка на 28%. Праймирование семян активированным раствором KNO₃ также снижало скорость роста стебля (на 20%), однако положительно сказалось на общем развитии и формировании листового аппарата проростков (табл. 2).

Прогревание семян перед посевом часто используют как прием повышения всхожести и скорости развития проростков, в частности за счет снижения поверхностного инфицирования фитопатогенными микроорганизмами. Однако, в нашем эксперименте замачивание семян томата при темпе-

ратуре 50°C и экспозиции 30 минут способствовало ингибированию всхожести и роста всех органов проростка не зависимо от активации растворов. Только один вариант не оказал значимого влияния на изучаемые параметры – это вариант с замачиванием в исходном растворе KNO₃, где все исследуемые показатели были сопоставимы с контролем. Более длительное замачивание при температуре 50°C также имело отрицательные последствия. Сильный негативный эффект отмечен в варианте с использованием активированного раствора KCl, который ингибировал всхожесть, способствовал прекращению ростовых процессов и гибели проростков (табл. 3).

Таблица 2. Влияние исходных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов электролитов на всхожесть и развитие проростков томата (обработка при температуре 22°C, посев сразу после обработки, 2023 год)
Table 2. Effect of initial and plasma-activated high-frequency glow discharge of aqueous electrolyte solutions on germination and development of tomato seedlings (treatment at 22°C, sowing immediately after treatment, 2023)

Вариант	Всхожесть		Длина корешка		Длина стебля		Балл развития		
	%	ЭД, %	мм	ЭД, %	мм	ЭД, %	балл	ЭД, %	
Экспозиция 60 минут									
Контроль (H ₂ O)		65		60		11,6		1,0	
Исх. р-р*	KNO ₃	77	12	52	-13	9,1	-21	1,1	-3
	KCl	60	-5	60	0	8,5	-26	1,0	-8
Акт. р-р**	KNO ₃	73	8	75	25	10,6	-9	1,5	33
	KCl	66	1	83	39	12,6	9	1,9	71
НСР ₀₅		7		10		2,0		0,4	
Экспозиция 120 мин									
Контроль (H ₂ O)		80		72		12,8		1,0	
Исх. р-р	KNO ₃	90	10	70	-2	9,2	-28	1,0	1
	KCl	73	-7	101	40	13,2	3	2,6	158
Акт. р-р	KNO ₃	57	-23	70	-3	10,2	-20	1,7	71
	KCl	83	3	84	17	11,8	-8	1,7	66
НСР ₀₅		6		11		1,8		0,6	

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
 Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

Таблица 3. Влияние исходных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов электролитов на всхожесть и развитие проростков томата (обработка при температуре 50°C, посев сразу после обработки, 2023 год)
Table 3. Effect of initial and plasma-activated high-frequency glow discharge of aqueous electrolyte solutions on germination and development of tomato seedlings (treatment at 50°C, sowing immediately after treatment, 2023)

Вариант	Всхожесть		Длина корешка		Длина стебля		Балл развития		
	%	БЭ, %	мм	БЭ, %	мм	БЭ, %	балл	БЭ, %	
Экспозиция 30 минут									
Контроль (H ₂ O)		71		79		10,1		1,8	
Исх. р-р	KNO ₃	67	-4	86	9	9,3	-8	2,0	10
	KCl	63	-8	65	-17	8,2	-19	0,9	-49
Акт. р-р	KNO ₃	63	-8	68	-14	9,8	-3	1,7	-8
	KCl	17	-54	-	-	-	-	-	-
НСР ₀₅		4		10		2,4		0,5	
Экспозиция 60 минут									
Контроль (H ₂ O)		73			10,1	11,0		2,4	
Исх. р-р	KNO ₃	77	4	86	5	11,2	2	1,8	-24
	KCl	77	4	74	-10	10,7	-3	2,0	-16
Акт. р-р	KNO ₃	57	-16	48	-41	7,5	-32	1,0	-60
	KCl	30	-43	-	-	-	-	-	-
НСР ₀₅		10		18		2,6		1,0	

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
 Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

Таблица 4. Влияние исходных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов электролитов на всхожесть и развитие проростков томата (обработка при температуре 22°C, посев через год после обработки, 2024 год)
Table 4. Effect of initial and plasma-activated high-frequency glow discharge of aqueous electrolyte solutions on germination and development of tomato seedlings (treatment at 22°C, sowing one year after treatment, 2024)

Вариант	Всхожесть		Длина корешка		Длина стебля		Масса проростка		
	%	БЭ, %	мм	БЭ, %	мм	БЭ, %	балл	БЭ, %	
Экспозиция 60 минут									
Контроль (H ₂ O)		63		1,632		2,576		0,031	
Исх. р-р	KNO ₃	76	13	3,153	93	3,305	28	0,035	14
	KCl	53	-10	2,415	48	1,531	-41	0,028	-11
Акт. р-р	KNO ₃	79	16	3,876	138	3,227	25	0,036	17
	KCl	60	-3	2,565	57	3,159	23	0,034	10
НСР ₀₅		9		1,302		0,925		0,003	
Экспозиция 120 минут									
Контроль (H ₂ O)		67		1,484		2,834		0,034	
Исх. р-р	KNO ₃	82	15	2,019	36	2,908	3	0,036	6
	KCl	75	8	1,866	26	3,236	14	0,034	-1
Акт. р-р	KNO ₃	82	15	2,109	42	3,587	27	0,039	14
	KCl	75	8	1,912	29	3,324	17	0,034	-1
НСР ₀₅		8		0,487		0,384		0,003	

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

При нагреве исходных растворов солей и часовом замачивании показатели развития проростков были сопоставимы с показателями в контроле. Активированные растворы ингибировали прорастание, особенно раствор KCl, где ростовые процессы не отмечены. Применяемые электролиты в опыте из-за своей особенности по-разному отразились на посевных качествах семян томата после хранения в течение года. Последствие обработки значительно отразилось на ростовых процессах проростков, особенно с применением нагрева и активации растворов (табл. 4, 5).

Так, использование часового замачивания в электролите KNO₃ приводило к увеличению показателя всхожести на 13% и 16%, причем активация плазмой более значимо отразилась на повышении (табл. 4). Аналогичное замачивание в нативном растворе KCl негативно отразилось на всхожести, снизив ее уровень на 10% от уровня контроля, тогда как

активированный раствор не существенно влиял и всхожесть в этом варианте была сопоставима с контрольным вариантом. На ростовые процессы положительное последствие оказали обработки с использованием KNO₃, причем более значимо с применением активации плазмой, благодаря чему длина корешка проростка в этом варианте отмечена в два раза больше контроля, а сырая масса проростка на 17% – выше массы контроля. Последствие обработки растворами KCl не влияли на длину корешка, однако нативный раствор приводил к ингибированию роста стебля проростка и к снижению его массы на 41% и 11% соответственно, в отличие от активированного раствора, который не оказывал влияния ни на один из изученных признаков. Продолжительное замачивание в течении двух часов и хранение в течение года позволило во всех вариантах получить значимый положительный эффект действия, который соста-

Таблица 5. Влияние исходных и активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда водных растворов электролитов на всхожесть и развитие проростков томата (обработка при температуре 50°C, посев через год после обработки, 2024 год)
Table 5. Effect of initial and plasma-activated high-frequency glow discharge of aqueous electrolyte solutions on germination and development of tomato seedlings (treatment at 50°C, sowing one year after treatment, 2024)

Вариант	Всхожесть		Длина корешка		Длина стебля		Масса проростка		
	%	БЭ, %	мм	БЭ, %	мм	БЭ, %	балл	БЭ, %	
Экспозиция 30 минут									
Контроль (H ₂ O)		67		1,597		2,207		0,0286	
Исх. р-р	KNO ₃	76	9	2,785	74	3,384	53	0,0354	24
	KCl	77	10	2,361	48	1,516	-31	0,0353	23
Акт. р-р	KNO ₃	85	18	3,218	102	3,122	41	0,0346	21
	KCl	-	-	-	-	-	-	-	-
НСР ₀₅		9		0,990		1,100		0,0052	
Экспозиция 60 минут									
Контроль (H ₂ O)		63		2,457		3,396		0,0357	
Исх. р-р	KNO ₃	57	-6	3,207	31	2,978	-12	0,0428	20
	KCl	22	-41	0,697	-72	0,522	-85	0,0195	-45
Акт. р-р	KNO ₃	68	5	1,699	-31	2,308	-32	0,030	-16
	KCl								
НСР ₀₅		13		0,707		1,017		0,0157	

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

вил 8% с электролитом KCl и 15% с электролитом KNO₃, причем независимо от применения активации. Скорость роста корешка значимо увеличивалась только при замачивании в растворах KNO₃, тогда как замачивание в растворах KCl не влияло на этот признак. Раствор KCl в этом опыте способствовал увеличению длины стебля на 14-17% в зависимости от варианта, а более значимо увеличить длину стебля (на 27%) по сравнению с контролем позволило применение активированного раствора KNO₃. В этом же варианте отмечено положительное влияние на величину сырой массы проростка, которая увеличивалась на 14% по сравнению с контролем. В других вариантах влияние на массу проростков не отмечено (табл. 4).

Использование нагрева в течение 30 минут положительно сказалось на последствии всех вариантов обработок и увеличило всхожесть на 9-18% в зависимости от варианта, однако применение активации электролита KCl в сочетании с нагревом ингибировало все ростовые процессы в семени и не позволило им прорасти спустя год после обработки (табл. 5).

Благоприятное действие для роста оказало в этом опыте использование раствора KNO₃. В вариантах с его использованием линейные параметры корешка и стебля повышались относительно контроля на 41-74% и 53-102% соответственно, в зависимости от активации. Масса проростка увеличивалась на 21-24% по всем вариантам, в которых отмечалось увеличение всхожести. При более длительной экспозиции обработки с нагревом (1 ч) не отмечены положительные эффекты на лабораторную всхожесть семян томата. Использование нативного раствора KCl ингибировало всхожесть по сравнению с контролем на 41%, а замачивание в активированном растворе ингибировало на 100%, в этом варианте не было отмечено прорастания ни одного семени. Значимый положительный эффект отмечен только по росту корня в варианте с исходным раствором KNO₃, где его длина превысила контроль на 31%, однако активация этого же раствора в этом опыте привела к обратному эффекту – к ингибированию роста корня на 31% относительно контроля. Сильное угнетение отмечено в варианте с нагревом нативного раствора KCl по признакам: длина корня (на 72%), длина стебля (на 85%) и масса проростка (на 45%).

Проростки каждого варианта были изучены далее при подготовке рассады для оценки растений томата в открытом грунте. Воздействие на семена обработками и их хранение по-разному отразились на высоте рассады (табл. 6). Увеличению роста молодых растений на 38% способствовал активированный раствор KNO₃ при продолжительном замачивании в течение двух часов при комнатной температуре, тогда как активированный раствор KCl способствовал увеличению длины как при часовом замачивании (на 20%), так и при двух-часовом (на 14%). Эффект от негативного влияния нативного раствора KNO₃ при длительном замачивании составил 11% на этот показатель относительно контроля. С использованием нагрева положительного действия на рост рассады не выявлено ни в одном варианте. Отмечено, что растворы на основе KNO₃ не влияли на данный показатель и высота рассады была на уровне контрольных значений. Негативное влияние отмечено с использованием раствора на основе KCl при 30-минутной обработке в совокупности с подогревом, в этом варианте показатели роста были ниже на 21% относительно контроля. Замачивание в активированном растворе KCl с нагревом не позволило получить рассаду для оценки из-за отсутствия проросших семян.

Не все изученные варианты обработок благоприятно отразились на формировании общей продуктивности, но самое значимое то, что все обработки с применением активацией плазмой позволили сформировать высокие показатели товарной продуктивности и выхода здоровых стандартных плодов, особенно в вариантах с использованием нагрева (табл. 7, 8). Положительный эффект действия часовой обработки семян на признак число плодов отмечен в вариантах с применением нативного раствора электролита KNO₃, где разница с контролем составила 34% и активированного электролита KCl, где эффективность отмечена ниже, но была все же достоверна и составила – 24%. Все испытываемые варианты не увеличивали общую продуктивность, а были на уровне контрольного значения, снижение на 24% отмечено в варианте с исходным раствором. Значимое увеличение товарной продуктивности в данном опыте отмечено в варианте с применением активации раствора KNO₃, где разница с контролем составила 61%, однако использование натив-

Таблица 6. Влияние водных растворов электролитов, активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда на рост рассады томата, 2024 год

Table 6. Effect of aqueous electrolyte solutions activated by high-frequency glow discharge plasma on the growth of tomato seedlings, 2024

Вариант		Комнатная температура, 22°C				Нагрев до 50°C			
		60 минут		120 минут		30 минут		60 минут	
		см	БЭ, %	см	БЭ, %	см	БЭ, %	см	БЭ, %
Контроль (H ₂ O)		6,6		6,5		8,5		7,5	
Исх. р-р	KNO ₃	7,3	11	5,8	-11	7,8	-8	8,0	7
	KCl	6,7	2	6,7	3	6,7	-21	6,0	-20
Акт. р-р	KNO ₃	6,2	-6	9,0	38	7,7	-9	5,8	-23
	KCl	7,9	20	7,4	14				
НСР ₀₅		0,8		0,5		1,2		1,7	

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
 Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

Таблица 7. Влияние водных растворов электролитов, активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда на продуктивность и пораженность плодов томата, (обработка при температуре 22°C, посев через год после обработки, 2024 год)
Table 7. Effect of aqueous electrolyte solutions activated by high-frequency glow discharge plasma on the productivity and damage of tomato fruits (treatment at 22°C, sowing one year after treatment, 2024)

Вариант	Число плодов		Продуктивность общая		Продуктивность товарная		Масса стандартного плода		Доля стандартных плодов, %		Доля больных плодов, %		
	шт.	БЭ, %	кг	БЭ, %	кг	БЭ, %	г	БЭ, %	%	БЭ, %	%	БЭ, %	
Экспозиция 60 минут													
Н ₂ O-контроль	11,6		1,15		0,62		90,1		41		57		
Исх. р-р	KNO ₃	15,5	34	1,14	-1	0,44	-29	91,8	2	32	-9	61	4
	KCl	10,9	-6	0,87	-24	0,72	16	94,6	5	73	32	17	-40
Акт. р-р	KNO ₃	12,8	10	1,04	-10	1,00	61	87,2	-3	80	39	3	-54
	KCl	14,4	24	1,17	2	0,77	24	91,8	2	56	15	34	-23
НСР ₀₅	1,5		0,20		0,30		3,4		18		29		
Экспозиция 120 минут													
Н ₂ O контроль	14,5		1,44		0,56		99,0		33		61		
Исх. р-р	KNO ₃	16,4	13	0,91	-37	0,27	-52	79,7	-19	23	-10	70	9
	KCl	14,5	0	1,21	-16	0,23	-59	92,5	-7	19	-14	81	20
Акт. р-р	KNO ₃	14,0	-3	1,39	-3	0,94	68	99,4	0	65	32	23	-38
	KCl	12,4	-14	1,10	-24	0,71	27	103,4	4	54	21	36	-25
НСР ₀₅	1,8		0,20		0,37		11,5		21		15		

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

ного раствора этого же электролита приводило к снижению товарной продуктивности на 29%, что оказалось незначительным и было на уровне контроля.

Применение растворов KCl в разном качестве позволило получить товарную продуктивность на уровне контроля. Формирование большей массы стандартного плода отмечено только в варианте с замачиванием в нативном растворе KCl, где разница с контролем составила 5%, видимо растения в этом варианте смогли сформировать крупнее плоды за счет снижения общей продуктивности. В других вариантах влияния на массу плодов не обнаружено в этом опыте. Особенности нативного раствора с содержанием хлора поз-

волили получить больший выход стандартных здоровых плодов – на 32% больше, чем в контроле, по-видимому, такой результат получен благодаря обеззараживающему эффекту. Таким же эффектом обладал активированный раствор KNO₃, где доля здоровых плодов была выше на 39%. При применении активированного раствора KCl превышение доли здоровых плодов было незначительным. Меньше всего больных плодов отмечено в вариантах с замачиванием в нативном растворе KCl и активированном растворе KNO₃, где доля пораженных плодов фитотоксичностью составила 17% и 3% соответственно, что на 40% и 54% ниже доли больных плодов в контроле.

Таблица 8. Влияние водных растворов электролитов, активированных плазмой высокочастотного тлеющего разряда на продуктивность и пораженность плодов томата, (обработка при температуре 50°C, посев через год после обработки, 2024 год)
Table 8. Effect of aqueous electrolyte solutions activated by high-frequency glow discharge plasma on the productivity and damage of tomato fruits (treatment at 50°C, sowing one year after treatment, 2024)

Вариант	Число плодов		Продуктивность общая		Продуктивность товарная		Масса стандартного плода		Доля стандартных плодов, %		Доля больных плодов, %		
	шт.	БЭ, %	кг	БЭ, %	кг	БЭ, %	г	БЭ, %	%	БЭ, %	%	БЭ, %	
Экспозиция 30 минут													
Н ₂ O	13,8		0,93		0,35		89,8		38		56		
Исх. р-р	KNO ₃	11,2	-19	0,89	-4	0,77	120	81,4	-9	64	26	14	-42
	KCl	12,3	-11	1,15	24	0,98	180	108,0	20	71	33	14	-42
Акт. р-р	KNO ₃	15,3	11	1,22	31	1,14	226	90,2	0	76	38	6	-50
	KCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
НСР ₀₅	2,8		0,21		0,25		17,8		27		36		
Экспозиция 60 минут													
Н ₂ O	12,1		0,87		0,18		81,5		17		80		
Исх. р-р	KNO ₃	13,3	10	1,04	20	0,64	256	87,9	8	52	35	39	-41
	KCl	13,3	10	1,29	48	0,65	261	103,1	27	47	30	50	-30
Акт. р-р	KNO ₃	16,8	39	1,14	31	0,88	389	86,7	6	56	39	23	-57
	KCl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
НСР ₀₅	3,2		0,15		0,17		14,8		15		28		

Примечание: исх. р-р* – раствор солей без активации, акт. р-р** – активированный плазмой
Note: original solution* – salt solution without activation, active solution** – plasma-activated

При более длительном замачивании (120 минут) и последующем хранении отмеченные эффекты действия имели небольшие отличия некоторых вариантов от результатов опыта с использованием часового замачивания (табл. 7). Использование исходного раствора KNO_3 также приводил к выходу большего числа плодов с растения, но с меньшим эффектом действия – 13% против 34%. Длительное замачивание в активированном растворе KCl уже не приводило к положительному эффекту, а давало отрицательный результат – значимое снижение признака число плодов на 14% относительно контроля. Более длительное замачивание негативно отразилось на общей продуктивности во всех вариантах данного опыта. Наиболее значимое снижение в варианте с применением исходного раствора KNO_3 и активированного раствора KCl , где снижение отмечено на 37% и 24%. Однако, достоверное увеличение товарной продуктивности, как и в предыдущем опыте (замачивание 60 минут) получено в варианте с активированным раствором KNO_3 , где эффект действия был увеличен с 61% до 68%. Снижение массы стандартных плодов достоверно отмечено только в варианте с нативным раствором KNO_3 , где показатель снизился на 19%, видимо за счет увеличения числа плодов на растении. Использование исходных растворов не позволили получить обеззараживающий эффект и не позволили увеличить выход здоровых и снизить выход больных плодов, однако активированные растворы обеих солей приводили к достоверному увеличению выхода стандартных здоровых плодов (32% и 21%) и достоверному снижению выхода пораженных плодов (38% и 25%) в зависимости от раствора.

Применение нагрева до 50°C при замачивании в нативных и активированных электролитах положительно отразилось на продуктивности после годового хранения обработанных семян, исключение составил только вариант с активацией хлорсодержащего раствора, который негативно отразился на посевных качествах семян томата и не позволил им сохраниться (табл. 8).

Признак число плодов с растения не изменялся в связи с испытываемыми обработками при нагреве и замачивании в течение 30 минут, однако благоприятное действие на общую продуктивность оказали обработки в нативном растворе KCl и активированном растворе KNO_3 , где увеличение продуктивности отмечено на 24% и 31% соответственно. Товарная продуктивность благодаря нагреву была увеличена более чем в два раза у вариантов, где сохранилась всхожесть семян. Причем увеличение признака масса стандартного плода (на 20%) отмечено в варианте с замачиванием в нативном растворе KCl . У всех опытных растений отмечен обеззараживающий эффект, так как они во всех вариантах в опыте благодаря обработке семян сформировали больший выход стандартных здоровых плодов и меньший выход пораженных плодов. Причем наибольший эффект отмечен в варианте с применением активацией плазмы (активированном растворе KNO_3), где доля здоровых плодов была увеличена на 38% относительно контроля, а доля пораженных снизилась на 50%. Подобный эффект по этим признакам отмечен и в опыте с более длительным замачиванием (60 минут) в совокупности с нагревом. На другие элементы продуктивности длительное замачивание влияло с большей эффективностью, так активация электролита KNO_3 позволяла увеличить число плодов на растении на 39%. По всем изученным вариантам обработки получено увеличение общей и товарной продуктивности, причем выхода товарной продукции увеличился в 3,6-5 раза в зави-

симости от варианта. С применением исходного раствора KCl удалось получить достоверное увеличение массы стандартного плода на 27%.

Заключение

Эффективность технологии предпосевной обработки является не универсальной, а строго зависимой от синергии четырех ключевых факторов: типа электролита (KNO_3 или KCl), активации плазмой, температуры обработки (22°C или 50°C) и экспозиции замачивания (60 или 120 минут). Наиболее значимые эффекты наблюдались не только при посеве сразу после обработки, но и, что особенно важно, сохранялись после годового хранения семян, проявляясь на всех этапах онтогенеза – от прорастания до получения продукции (плодов).

Ключевым выводом является дифференцированное действие электролитов. KNO_3 проявил себя как классический стимулятор всхожести, в то время как KCl оказал мощное влияние на развитие корневой системы. Значительную роль в модуляции этих эффектов сыграла активация плазмой, что могло не только усиливать ростостимулирующие свойства растворов, но и в большинстве случаев полностью нивелировала ингибирующее действие исходных растворов на рост стебля. При этом выявлены и негативные эффекты их действия, где проявлялась фитотоксичность (акт. р-р KNO_3 при 120 мин/22°C) или полная гибель семян и проростков (акт. р-р KCl при 50°C), что подчёркивает необходимость точного подбора параметров праймирования.

Температурный режим оказывал существенное влияние на результативность праймирования. Обработка при температуре 50°C в основном оказывала негативное влияние на изучаемые параметры при посеве сразу после обработки, но после годового хранения те же режимы, напротив, демонстрировали мощное положительное последствие, особенно в комбинации с KNO_3 . Это указывает на то, что повышенная температура может индуцировать в семенах состояние глубокого «прайминга», положительный эффект которого реализуется после длительного покоя.

Наиболее значимым практическим результатом является устойчивое влияние праймирования семян на конечную продуктивность и иммунитет растений. Все варианты с активированными растворами, и особенно активированный раствор KNO_3 , стабильно обеспечивали максимальное увеличение товарной урожайности (увеличение в пять раз) и значительное снижение пораженности плодов фитопатозом. Это свидетельствует о том, что технология плазменной активации действующего реагента не только стимулирует начальный рост, но и влияет на иммунный статус, повышая устойчивость растений к болезням в течение всего вегетационного периода.

Таким образом, технология предпосевной обработки семян плазменно-активированными растворами электролитов может представлять эффективный и многофункциональный инструмент для современного агробизнеса. Наиболее сбалансированным и рекомендуемым протоколом для томата является обработка активированным раствором KNO_3 в течение 60-120 минут при комнатной температуре, что гарантирует высокую полевую всхожесть, мощное развитие проростков, устойчивость к стрессам и, как следствие, значительное увеличение выхода качественной товарной продукции. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию режимов для других сортов и видов сельскохозяйственных культур с учетом селективности действия электролитов с целью масштабирования технологии для промышленного применения.

• Литература / References

1. Reimers F.E. The plant in infancy. Nauka. Sib. Branch., 1987. 183 p. (In Russ.)
2. Yanchenko A.V., Bukharov A.F., Fedosov A.Y. Priming – innovative development of methodology preparation of seeds for sowing (review). *Vegetable crops of Russia*. 2023;(5):28-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2023-05-28-36>
<https://www.elibrary.ru/rgdvqz>
3. Pipinis E., Milios E., Smiris P., Gioumousidis C. Effect of acid scarification and cold moist stratification on the germination of *Cercis siliquastrum* L. seeds. *Turk J Agric For*. 2011;35(3):259-264. <https://doi.org/10.3906/tar-1003-848>
4. Gornik K., Sas-Paszt L., Seliga L., Pluta S. etc. The Effect of Different Stratification and Scarification Treatments on Breaking the Dormancy of Saskatoon Berry Seeds. *Agronomy* 2023;13(2):520. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020520>
5. Deng S., Deng Z., Wang X., Lu H., Xue H. Effects of Temperature, Scarification, Stratification, Phytohormones, and After-Ripening on the Dormancy and Germination of *Eucommia ulmoides* Oliv. Seeds. *Forests*. 2021;12(11):1593. <https://doi.org/10.3390/f12111593>
6. Crocker V., Barton L. Factors influencing germination. The physiology of seeds. «Publishing house of foreign literature. M., 1955. P. 140-177. (In Russ.)
7. Ovcharov K.E. Necessary factors of seed germination. The physiology of seed formation and germination. 1976. P. 135-184. (In Russ.)
8. The role of temperature and phytohormones in seed dormancy disorder. Edited by M.G. Nikolaeva. Leningrad, 1981. 160 p. (In Russ.)
9. Gordeeva L.N. Germination of barley after exposure to sound of different frequencies (In breeding technology). *Food and processing industry. Abstract journal*. 2001;(2):563. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/fnywvj>
10. Veselova T.V. Changes in the condition of seeds during their storage, germination and under the influence of external factors (ionizing radiation in small doses and other weak influences), determined by the method of delayed luminescence. Moscow. 2008. 48 p. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/njftjt>
11. Priestley D.A. Seed Ageing: Implication for seed storage and persistence in the soil. Comstock Publishing Associates, Ithaca, New York, London. 1986. 304 p.
12. Bukharov A.F., Baleev D.N., Soldatenko A.V. etc. Impacts of high temperature on embryonic growth and seed germination of dill (*Anethum graveolens*). *Seed Science and Technology*. 2021;49(1):7-17. <https://doi.org/10.15258/sst.2021.49.1.02>
13. Das M., Ghosh D. Quantitative effect of musical sound on seed germination kinetics in *Pisum sativum*. *Ecology, environment and conservation*. 2022;28(1):357-361. <https://doi.org/10.53550/EEC.2022.v28i01.053>
14. Ksenz N.V., Khronyuk V.B., Ereshko A.S., Sidortsov I.G. The effect of pre-sowing seed treatment with gradient magnetic fields and electroactivated water on their initial characteristics, plant development and grain yield. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2019;3(47):22-28. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/ybvib0>
15. Inyushin V.M. Elementary theory of the biological field. Edition of the Kazakh State University. Alma Ata. 1978. 97 p. (In Russ.)
16. Chislova N.M. The effect of pre-sowing photoactivation of seeds on the productivity of onions, cucumbers and lupines. M., 1988. 26 p. (In Russ.)
17. Paparella S., Araujo S.S., Rossi G. etc. Seed priming: state of the art and new perspectives. *Plant Cell Rep*. 2015;34(8):1281-1293. <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>
18. Chatterjee N., Sarkar D., Sankar A. etc. On-farm seed priming interventions in agronomic crops. *Acta Agric. Slov*. 2018;111(3):715-735. <https://doi.org/10.14720/aas.2018.111.3.19>
19. Zulfiqar F. Effect of seed priming on horticultural crops. *Scientia Horti*. 2021;286:110197. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110197>
20. Bourke P., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P.J., Keener K. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. *Trends Biotechnol*. 2018;36(6):615-626. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001>
21. Zhu Y.L., Li C.Z., Cui H.Y., Lin L. Feasibility of Cold Plasma for the Control of Biofilms in Food Industry. *Trends Food Sci. Technol*. 2020;99(2):142-151. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.001>
22. Aktar M.W., Sengupta D., Chowdhury A. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip Toxicol*. 2009;2(1):1-12. <https://doi.org/10.2478/v10102-009-0001-7>
23. Savci S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *APCBEE Procedia*. 2012;1:287-292. <https://doi.org/10.1016/j.apcb.2012.03.047>
24. Sharma N., Singhvi R. Effects of Chemical Fertilizers and Pesticides on Human Health and Environment: A Review. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*. 2017;10(6):675-680. <https://doi.org/10.5958/2230-732X.2017.00083.3>
25. Encyclopedia of low-temperature plasma. Series B. Reference applications, databases and data banks. Volume XI-4. Gas and plasma lasers. Edited by S.I. Yakovlenko. M., 2005. 820 p. (In Russ.)
26. Yousfi M., Merbahi N., Sarrette J.P. etc. Non-Thermal Plasma Sources of Production of Active Species for Biomedical Uses: Analyses, Optimization and Prospect. In *Biomedical Engineering Frontiers and Challenges*; Reza, F.R., Ed.; Intech Europe: Rijeka, Croatia. 2011. P. 99-124. <https://doi.org/10.5772/19129>
27. Ehlbeck J., Schnabel U., Polak M. etc. Low Temperature Atmospheric Pressure Plasma Sources for Microbial Decontamination. *J. Phys. D Appl. Phys*. 2011;44(1):013002. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/1/013002>
28. Simoncicova J., Krystofova S., Medvecka V., Durisova K., Kalinakova B. Technical Applications of Plasma Treatments: Current State and Perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 2019;103:5117-5129. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09877-x>
29. Khun J., Scholtz V., Hozak P., Fitl P., Julak J. Various DC-driven Point-to-plain Discharges as Non-Thermal Plasma Sources and their Bactericidal Effects. *Plasma Sources Sci. Technol*. 2018;27(6):065002. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aabdd0>
30. Kelly S., Turner M. Atomic oxygen patterning from a biomedical needle-plasma source. *J. Appl. Phys*. 2013;114(12):123301. <https://doi.org/10.1063/1.4821241>
31. Julak J., Hujacova A., Scholtz V., Khun J., Holada K. Contribution to the Chemistry of Plasma-Activated Water. *Plasma Phys. Rep*. 2018;44(1):125-136. <https://doi.org/10.1134/S1063780X18010075>
32. Al-Sharify Z.T., Al-Sharify T.A., Al-Azawi A.M. Investigative Study on the Interaction and Applications of Plasma Activated Water (PAW). *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*. 2020;870:012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012042>
33. Zhou R., Zhou R., Wang P. etc. Plasma-Activated Water: Generation, Origin of Reactive Species and Biological Applications. *J. Phys. D Appl. Phys*. 2020;53(30):303001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf>
34. Tendero C., Tixier C., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. Atmospheric Pressure Plasmas: A Review. *Spectrochim. Acta B*. 2006;61(1):2-30. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003>
35. Scholtz V., Pazlarova J., Souskova H., Khun J., Julak J. Non-thermal Plasma – A Tool for Decontamination and Disinfection. *Biotechnol. Adv*. 2015;33(6Pt2):1108-1119. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.01.002>
36. Shintani H., Sakudo A. Gas Plasma Sterilization in Microbiology. Theory, Applications, Pitfalls and New Perspectives. Caister Academic Press: Poole, UK. 2016. 151 p.
37. von Woedtke T., Schmidt A., Bekeschus S., Wende K., Weltmann K.D. Plasma Medicine: A Field of Applied Redox Biology. *In Vivo*. 2019;33(4):1011-1026. <https://doi.org/10.21873/invivo.11570>
38. Metelmann H.R., von Woedtke T., Weltmann K.D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine. Cold Physical Plasma for Medical Application. Springer: Cham, Switzerland. 2018. 517 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67627-2>
39. Julak J., Scholtz V. The Potential for use of Non-thermal Plasma in Microbiology and Medicine. *Epidemiol. Microbiol. Immunol*. 2020;69(1):29-37.
40. Graves D.B. The Emerging Role of Reactive Oxygen and Nitrogen Species in Redox Biology and Some Implications for Plasma Applications to Medicine and Biology. *J. Phys. D Appl. Phys*. 2012;45(26):263001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/26/263001>
41. Siddique S.S., Hardy G.S.J., Bayliss K.L. Cold Plasma: A Potential New Method to Manage Postharvest Diseases Caused by Fungal Plant Pathogens. *Plant Pathol*. 2018;67(5):1011-1021. <https://doi.org/10.1111/ppa.12825>
42. Han Y., Cheng J.H., Sun D.W. Activities and Conformation Changes of Food Enzymes Induced by Cold Plasma: A Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*. 2019;59(5):794-811. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1555131>
43. Ekezie E.F.G., Chizoba F.G., Sun D.W., Cheng J.H. A Review on Recent Advances in Cold Plasma Technology for the Food Industry: Current Applications and Future Trends. *Trends Food Sci. Technol*. 2017;69(A):46-58. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.007>
44. Pankaj S.K., Wan Z., Keener K.M. Effects of Cold Plasma on Food Quality: A Review. *Foods*. 2018;7(1):4. <https://doi.org/10.3390/foods7010004>
45. Liao X.Y., Cullen P.J., Muhammad A.I. etc. Cold Plasma-Based Hurdle Interventions: New Strategies for Improving Food Safety. *Food Eng. Rev*. 2020;12(3):321-332. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09222-3>
46. Krapivina S.A., Filippov A.K., Levitskaya T.N., Bakhvalov A. Gas Plasma Treatment of Plant Seeds. U.S. Patent № US5281315A. 1994. 25 p.
47. Zhou Z., Huang Y., Yang S., Chen W. Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds. *Agric*.

- Sci. 2011;2(01):23-27. <https://doi.org/10.4236/as.2011.21004>
48. Mihai A.L., Dobrin D., Magureanu M., Popa M.E. Positive effect of non-thermal plasma treatment on radish seed. *Rom. Rep. Phys.* 2014;66:1110-1117.
49. Lindsay A., Byrns B., King W. etc. Fertilization of radishes, tomatoes, and marigolds using a large-volume atmospheric glow discharge. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2014;34(6):1271-1290. <https://doi.org/10.1007/s11090-014-9573-x>
50. Matra K. Atmospheric non-thermal argon-oxygen plasma for sunflower seedling growth improvement. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2018;57(1S):01AG03. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.01AG03>
51. Ahn C., Gill J., Ruzic D.N. Growth of plasma-treated corn seeds under realistic conditions. *Sci. Rep.* 2019;9(1):4355. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40700-9>
52. Kang M.H., Jeon S.S., Shin S.M. etc. Dynamics of nitric oxide level in liquids treated with mi-crowave plasma-generated gas and their effects on spinach development. *Sci. Rep.* 2019;9(1):1011. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37711-3>
53. Judee F., Simon S., Bailly C., Dufour T. Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production / consumption mechanisms. *Water Res.* 2018;133:47-59. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.035>
54. Adhikari B., Adhikari M., Park G. The Effects of Plasma on Plant Growth, Development, and Sustainability. *Appl. Sci.* 2020;10(17):6045. <https://doi.org/10.3390/app10176045>
55. Holubova L., Kyzek S., Durovcova I. etc. Non-Thermal Plasma – A New Green Priming Agent for Plants? *Int. J. Mol. Sci.* 2020;21(24):9466. <https://doi.org/10.3390/ijms21249466>
56. Scholtz V., Sera B., Khun J., Sery M., Julak J. Effects of Nonthermal Plasma on Wheat Grains and Products. *J. Food Qual.* 2019;79:17825. <https://doi.org/10.1155/2019/7917825>
57. Magallanes Lopez A.M., Simsek S. Pathogens Control on Wheat and Wheat Flour: A Review. *Cereal Chem.* 2021;98(1):17-30. <https://doi.org/10.1002/cche.10345>
58. Ten Bosch L., Pfohl K., Avramidis G. etc. Plasma-Based Degradation of Mycotoxins Produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* Species. *Toxins.* 2017;9(3):97. <https://doi.org/10.3390/toxins9030097>
59. Colovic R., Puvaca N., Cheli F. etc. Decontamination of Mycotoxin-Contaminated Feedstuffs and Compound Feed. *Toxins.* 2019;11(11):617. <https://doi.org/10.3390/toxins11110617>
60. Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Masaharu S.M. Plasma Agriculture from Laboratory to Farm: A Review. *Processes.* 2020;8(8):1002. <https://doi.org/10.3390/pr8081002>
61. Adhikari B., Pangomm K., Veerana M., Mitra S., Park G. Plant Disease Control by Non-Thermal Atmospheric-Pressure Plasma. *Front. Plant Sci.* 2020;11:77. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00077>
62. Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., Drori E. Cold radiofrequency plasma treat-ment modifies wettability and germination speed of plant seeds. *Sci. Rep.* 2012;2(1):741. <https://doi.org/10.1038/srep00741>
63. Mitra A., Li Y.F., Klampfl T.G. etc. Inactivation of surface-borne microorganisms and increased germination of seed specimen by cold atmospheric plasma. *Food Bioprocess Technol.* 2014;7:645-653. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1126-4>
64. Wang X.-Q., Zhou R.-W., de Groot G. etc. Spectral characteristics of cotton seeds treated by a dielectric barrier discharge plasma. *Sci. Rep.* 2017;7(1):5601. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04963-4>
65. Ling L., Jiafeng J., Jiangang L. etc. Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean. *Sci. Rep.* 2014;4:5859. <https://doi.org/10.1038/srep05859>
66. Gomez-Ramirez A., Lopez-Santos C., Cantos M. etc. Surface chemistry and germination improvement of Quinoa seeds subjected to plasma activation. *Sci. Rep.* 2017;7(1):5924. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06164-5>
67. Pawlat J., Starek A., Sujak A. etc. Effects of atmospheric pressure plasma jet operating with DBD on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination. *PLoS ONE.* 2018;13:e0194349. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194349>
68. Su L., Lan Q., Pritchard H.W., Xue H., Wang X. Reactive oxygen species induced by cold stratification promote germination of *Hedysarum scoparium* seeds. *Plant Physiol. Bioch.* 2016;109:406-415. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.10.025>
69. Mildaziene V., Aleknaviute V., Zukienė R. etc. 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. *Sci. Rep.* 2019;9:6437. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42893-5>
70. Ji S.H., Choi K.H., Pengkit A. etc. Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. *Arch. Biochem. Biophys.* 2016;605:117-128. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.02.028>
71. Rahman M.M., Sajib S.A., Rahi M.S. etc. Mechanisms and signaling associated with LPDBD plasma mediated growth improvement in wheat. *Sci. Rep.* 2018;8(1):10498. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28960-3>
72. Sivachandiran L., Khacef A. Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: Combined effect of seed and water treatment. *RSC Adv.* 2017;7:1822-1832. <https://doi.org/10.1039/C6RA24762H>
73. Jiang J., Lu Y., Li J. etc. Effect of seed treatment by cold plasma on the resistance of tomato to *Ralstonia solanacearum* (Bacterial Wilt). *PLoS ONE.* 2014;9:e97753. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097753>
74. Ochi A., Konishi H., Ando S. etc. Management of bakanae and bacterial seedling blight diseases in nurseries by irradiating rice seeds with atmospheric plasma. *Plant Pathol.* 2016;66(1):67-76. <https://doi.org/10.1111/ppa.12555>
75. Perez Piza M.C., Prevosto L., Zilli C. etc. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe / Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 2018;49:82-91. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.009>
76. Perez-Piza M.C., Prevosto L., Grijalba P.E. etc. Improvement of growth and yield of soybean plants through the application of non-thermal plasmas to seeds with different health statuses. *Heliyon.* 2019;5(4):e01495. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01495>
77. Perez S.M., Biondi E., Laurita R. etc. Plasma activated water as resistance inducer against the bacterial leaf spot of tomato. *PLoS ONE.* 2019;14(5):e0217788. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217788>
78. Danilejko Y.K., Belov S.V., Egorov A.B. etc. Increase of productivity and neutralization of pathological processes in plants of grain and fruit crops with the help of aqueous solutions activated by plasma of high-frequency glow discharge. *Plants.* 2021;10(10):2161. <https://doi.org/10.3390/plants10102161>
79. Shumeyko S.A., Yanykin D.V., Pashkin M.O. etc. The Effect of Liquids Activated by Plasma Generated with a Microwave Plasmatron and High-Frequency Glow Discharge on Cotton Plant Development. *Plants.* 2025;14:304. <https://doi.org/10.3390/plants14030304>
80. Sera B., Scholtz V., Jiresova J. etc. Effects of Non-Thermal Plasma Treatment on Seed Germination and Early Growth of Leguminous Plants – A Review. *Plants.* 2021;10:1616. <https://doi.org/10.3390/plants10081616>
81. Interstate standard GOST 12038-84 «Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination». (In Russ.)
82. Chumakov A.E. Basic methods of phytopathological research. Nauch. tr. VASHNIL. M.: Kolos. 1974. 192 p. (In Russ.)
82. Dospikhov B.A. Field experiment technique. M.: Agropromizdat, 1985. 351 p. (In Russ.)

Об авторах:

Ирина Михайловна Кайгородова – кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории физиологических основ семеноведения овощных культур, <https://orcid.org/0000-0002-5048-8417>, SPIN-код: 5250-2641, автор для переписки, kaigorodova-i@mail.ru

Елена Георгиевна Козарь – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаб. молекулярно-иммунологических исследований, <https://orcid.org/0000-0002-1319-5631>, SPIN-код: 1148-5177, kozar_eg@mail.ru

Владимир Ильич Луканин – кандидат ф.-м. наук, и.о. зав. лазерных технологий ИОФ РАН, <https://orcid.org/0000-0001-9891-0296>, SPIN-код: 9357-6201, vladimirlukinin@yandex.ru

About the Authors:

Irina M. Kaigorodova – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher at the Laboratory of Physiological Foundations of Vegetable Seed Science, <https://orcid.org/0000-0002-5048-8417>, SPIN-code: 5250-2641, Corresponding Author, kaigorodova-i@mail.ru

Elena G. Kozar – Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher of the Laboratory of Molecular Immunological Research, <https://orcid.org/0000-0002-1319-5631>, SPIN-code: 1148-5177, kozar_eg@mail.ru

Vladimir I. Lukanin – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Acting Head Laser Technologies GPI RAS, SPIN-code: 9357-6201, <https://orcid.org/0000-0001-9891-0296>, vladimirlukinin@yandex.ru