

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ РАСТЕНИЙ / PHYTOPHYSIOLOGY AND PHYTOCHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.75> EDN: FHZMEA

СОХРАННОСТЬ ПОСЕВНЫХ КАЧЕСТВ ЗЕРНОВОК КУКУРУЗЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ЭМП СВЧ И ПЛАЗМОЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ

Научная статья

Пушкина Н.В.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-3867-8282;¹ Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

* Корреспондирующий автор (nadyapushkina[at]gmail.com)

Предложена: 08.07.2026; Принята: 01.10.2026; Опубликовано: 16.10.2026

Аннотация

В статье приведены данные о влиянии обработки зерновок кукурузы (*Zea mays* L.) электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона (ЭМП СВЧ, 64–66 ГГц) и плазмой на динамику всхожести при хранении семян в течение 5 лет. Показано, что ЭМП СВЧ обработка обеспечивает краткосрочный стимулирующий эффект, повышает всхожесть до 97,8% в первые 6 месяцев, однако приводит к ускоренному старению семян: через 60 месяцев всхожесть снижается до 21,0%, что значительно ниже контроля (59,4%) и плазмы (75,0%). Плазменная обработка обеспечивает стабильное сохранение посевных качеств на протяжении всего срока хранения, достоверно превосходя контроль на 5-й год хранения ($p = 0,008$). Полученные результаты свидетельствуют о принципиально различных механизмах действия СВЧ-излучения и плазмы: СВЧ индуцирует транзиторную активацию метаболизма, истощающую ресурс семян, тогда как плазма запускает долгосрочные защитные механизмы.

Ключевые слова: кукуруза, семена, хранение, электромагнитное поле, СВЧ, плазма, всхожесть, сохранность.

PRESERVATION OF THE SOWING QUALITIES OF CORN SEEDS FOLLOWING TREATMENT WITH UHF EMF AND PLASMA DURING LONG-TERM STORAGE

Research article

Pushkina N.V.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0003-3867-8282;¹ Belarusian State University, Minsk, Belarus

* Corresponding author (nadyapushkina[at]gmail.com)

Suggested: 08.07.2026; Accepted: 01.10.2026; Published: 16.10.2026

Abstract

The article presents data on the effect of treating corn (*Zea mays* L.) grains with an ultra-high-frequency electromagnetic field (UHF EMF, 64–66 GHz) and plasma on germination dynamics during five years of seed storage. It is shown that UHF EMF treatment provides a short-term stimulating effect, increasing germination rates to 97.8% in the first 6 months; however, it leads to accelerated seed ageing: after 60 months, germination rate drops to 21.0%, which is significantly lower than that of the control (59.4%) and the plasma-treated seeds (75.0%). Plasma treatment ensures stable preservation of seed quality throughout the entire storage period, significantly outperforming the control in the fifth year of storage ($p = 0.008$). The obtained results indicate fundamentally different mechanisms of action for microwave radiation and plasma: UHF induce a transient activation of metabolism, which depletes the seed's reserves, while plasma triggers long-term protective mechanisms.

Keywords: corn, seeds, storage, electromagnetic field, UHF, plasma, germination, preservation.

Введение

Одной из актуальных проблем современного семеноводства является сохранность посевных качеств семян в процессе длительного хранения. Ежегодные потери семенного материала из-за естественного старения могут достигать 15–30% в зависимости от вида сельскохозяйственных культур и условий хранения [1]. Традиционные методы закладки посевного материала на длительное хранение такие, как пониженные температуры, регулируемая влажность требуют значительных энергетических затрат, а химические обработки имеют экологические ограничения. В связи с этим последнее время активно изучается возможность использования физических методов предпосевной обработки не только для повышения всхожести, но и для стимуляции устойчивости семян к процессам старения при длительном хранении. Особый интерес представляют электромагнитное поле сверхвысокочастотного диапазона (ЭМП СВЧ) и плазменная обработки. Имеются данные о стимулирующем влиянии СВЧ-обработки на энергию прорастания и всхожесть семян различных сельскохозяйственных культур [2]. Показано также, что плазменная обработка может активировать антиоксидантную систему растений, повышая их устойчивость к стрессовым факторам. Отмечен положительный эффект плазмы для инактивации патогенных микроорганизмов в пищевой промышленности, биомедицине, и в последнее десятилетие плазменная нетермическая обработка стала активно применяться в сельском хозяйстве [3]. Однако до настоящего времени оставалось неизученным влияние этих методов на долгосрочную сохранность посевных качеств семян сельскохозяйственных культур.

Цель работы — изучить влияния обработок электромагнитным полем (ЭМП СВЧ) и плазмой на сохранение всхожести семян кукурузы при длительном хранении.

Методы и принципы исследования

В качестве объекта исследования использовались семена кукурузы (*Zea mays* L.) гибрида Дарья белорусской селекции. Обработка семян физическими методами проводилась в НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ на лабораторном оборудовании для электромагнитной обработки семян ЭМП СВЧ в диапазоне частот 64–66 ГГц, мощность 10 мВт, время воздействия 12 минут со встроенным круговым преобразователем поляризации для равномерного облучения семенного материала [3]. Плазменная обработка проводилась на запатентованном оборудовании в течение 4 секунд. Семена облучались вертикальной рабочей камере из кварцевого высокотемпературного стекла, в нижней части которой смонтирована решетка из титана 50×50 мкм, которая служит нижним электродом для подачи высокого напряжения. Так как семена имеют меньшую плотность (меньше 1 г/см³), чем частицы электропроводящего слоя (насыпная плотность порошка железа — 1,66 г/см³), то они (т.е. семена) потоком воздуха подымались и скапливались в верхней части рабочей камеры (под специальной ограничивающей сеткой), где совершали интенсивные колебательные и вращательные движения (наблюдаемые визуально при выключенном высоковольтном источнике электропитания), что обеспечивало равномерное их облучение [4].

Обработанные семена закладывались на длительное хранение при стандартных условиях (температура 18–22°C, относительная влажность 60–70%). Отбор проб проводился через 1, 6, 12, 24, 36, 48 и 60 месяцев хранения.

Лабораторная всхожесть определялась по ГОСТ 12038-84. Проращивание проводилось в рулонах при температуре 25° С. Всхожесть определялась на 7-е сутки (%) роста. Статистическая обработка: однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), апостериорный тест Тьюки ($p < 0,05$). Все измерения выполнены в трехкратной биологической повторности.

Результаты и их обсуждение

Результаты пятилетних исследований представлены в таблице 1 и на рисунке 1. Установлено, что характер изменения всхожести семян существенно зависел от вида предпосевной обработки. На начальных этапах хранения через 1–6 месяцев СВЧ-обработка приводила к достоверному повышению всхожести по сравнению с контролем и плазмой ($p < 0,001$). Всхожесть семян обработанных СВЧ составляла 97,7–97,8%, тогда как в контроле и варианте с плазмой этот показатель не превышал 80,6%. Через 12 месяцев хранения стимулирующий эффект СВЧ полностью нивелировался, всхожесть во всех вариантах обработки не имела достоверных различий ($p > 0,05$). После 24 месяцев хранения наблюдалось ускоренное старение семян, которые были обработаны ЭМП СВЧ, что привело к резкому снижению посевных качеств с 57,4% до 21,0% к 60-му месяцу инкубации, что было достоверно ниже контроля и плазмы на всех сроках ($p < 0,001$). В то же время плазменная обработка обеспечивала стабильное сохранение всхожести зерновок кукурузы на протяжении всего периода исследования. За 5 лет всхожесть семян снизилась только на 5,6% с 80,6% до 75,0%, через 60 месяцев инкубации плазма достоверно превосходила контроль ($p = 0,008$) и СВЧ ($p < 0,001$).

Таблица 1 - Влияние ЭМП СВЧ и плазмы на динамику всхожести семян кукурузы, n=3

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.75.1>

Срок хранения	Контроль, М ± SEM	ЭМП СВЧ, М ± SEM	Плазма, М ± SEM	p
1 мес	80,0 ± 0,33	97,8 ± 0,26↑	81,0 ± 1,00	< 0,001
6 мес	80,0 ± 0,33	97,8 ± 0,26↑	80,6 ± 0,60	< 0,001
12 мес	79,8 ± 0,53	81,0 ± 0,33	80,2 ± 0,53	0,432
24 мес	75,8 ± 3,26	57,4 ± 0,86↓	79,2 ± 0,53	< 0,001
36 мес	72,4 ± 4,26	32,4 ± 1,73↓	77,6 ± 1,26	< 0,001
48 мес	63,8 ± 5,46	23,6 ± 2,53↓	74,8 ± 4,60	< 0,001
60 мес	59,4 ± 3,73	21,0 ± 4,00↓	75,0 ± 1,33↑	< 0,001

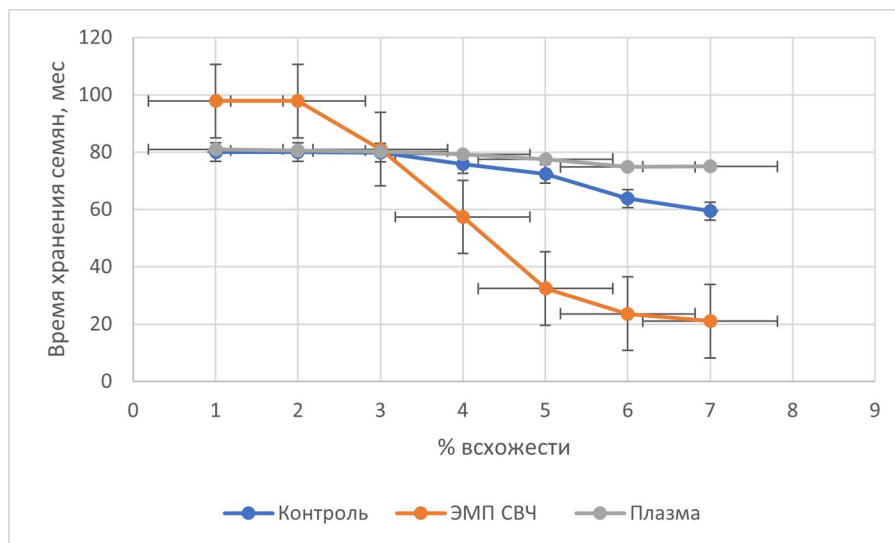


Рисунок 1 - Всхожесть семян кукурузы после ЭМП СВЧ и плазменной обработок в условиях длительного хранения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.172.75.2>

Обсуждение

Полученные результаты впервые демонстрируют принципиально различные эффекты действия ЭМП СВЧ и плазменной обработок на долгосрочную сохраняемость семян кукурузы. Можно полагать, что ЭМП СВЧ-обработка семян вызвала мощный, но транзиторный всплеск метаболической активности, что проявляется в высокой всхожести на ранних сроках хранения. Однако этот эффект сопровождается истощением защитных резервов клеток. Наши данные показывают, что после 2-х лет хранения предпосевная ЭМП СВЧ обработка семян приводит к их ускоренному старению, и к 5-му году их всхожесть оказывается в 2,8 раза ниже контроля. Это согласуется с концепцией «цены стресса» и данными о том, что сильные стрессовые воздействия могут сокращать жизненный цикл семян [6].

Ранее нами было показано, что ЭМП СВЧ-обработка приводит к перестройке пула жирных кислот и накоплению оксипиринов, что свидетельствует о развитии окислительного стресса [7]. А также на проростках кукурузы показано, что обработка ЭМП СВЧ влияет на систему оксидантов-антиоксидантов, что выражается в накоплении активных форм кислорода (АФК) и продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) [7]. Вероятно, именно этот стресс, стимулирующий прорастание в краткосрочной перспективе, накапливает повреждения мембран и ДНК, ускоряя процессы старения при длительном хранении. Наши выводы согласуются с литературными данными, в работе [8] показано, что электромагнитные волны высокой частоты (940 МГц) приводят к увеличению содержания перекиси водорода (H_2O_2) в листьях кукурузы, что является прямым маркером окислительного стресса. В другой работе, также на кукурузе (*Zea mays* L.) и рапсе, было показано, что обработка семян ЭМП индуцирует генетический полиморфизм. Авторы связывают появление полиморфных полос в ДНК с действием окислительного стресса, который, как известно, может приводить к повреждению оснований ДНК и изменению паттернов метилирования [9].

В отличие от ЭМП СВЧ, плазменная обработка не дает резкого стимулирующего эффекта, но обеспечивает удивительную стабильность посевных качеств — всхожесть снижается всего на 5,6% за 5 лет. Более того, на 5-й год хранения плазма достоверно превосходит контроль ($p = 0,008$). Это указывает на принципиально иной механизм действия: плазма индуцирует умеренный «сигнальный» уровень окислительного стресса, который активирует долгосрочные защитные программы клетки — так называемый гормезис [10].

Заключение

Предпосевная обработка семян кукурузы ЭМП СВЧ (64–66 ГГц) обеспечивает краткосрочное повышение всхожести до 97,8% в первые 6 месяцев хранения, но приводит к ускоренному старению семян при длительном хранении (до 21,0% через 5 лет). Плазменная обработка семян кукурузы обеспечивает стабильное сохранение всхожести на уровне 75,0% в течение 5 лет хранения, достоверно превосходя контроль на 5-й год. Установлено, что плазменная обработка является эффективным методом повышения лежкоспособности семян кукурузы и может быть рекомендована для создания долгосрочных семенных резервов.

Полученные результаты имеют прямое практическое значение для семеноводства, однако результаты справедливы только исследованных гибридов кукурузы. Для формирования окончательных выводов по культуре в целом и разработки промышленных регламентов необходимы исследования на более широком спектре генотипов. Плазменная обработка может быть использована как эффективный, экологически безопасный метод повышения лежкоспособности семян кукурузы, позволяющий создавать долгосрочные страховые и резервные фонды семенного материала. В свою



очередь, ЭМП СВЧ-обработка, напротив, может применяться только для семян, предназначенных для немедленного посева в текущем сезоне, и не рекомендуется для закладки на длительное хранение.

Перспективным направлением дальнейших исследований является изучение влияния ускоренного старения на фоне длительного хранения семян, а также исследование других физических методов и их комбинаций для сохранения качества семян.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Cecchetti D. Treatment of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds with electromagnetic field influences germination and phytohormone balance depending on seed size / D. Cecchetti, A. Pawelek, J. Wyszowska [et al.] // *Agronomy*. — 2022. — Vol. 12. — № 6. — P. 1423.
2. Yuan S. Effect of Plasma Treatment on Grain Seed Preservation: Promotion and Inhibition / S. Yuan, S. Tsuchikawa, T. Inagaki [et al.] // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. — 2025. — Vol. 45. — P. 1629–1659. — DOI: 10.1007/s11090-025-10596-7
3. Пушкина Н.В. Модифицированный метод предпосевной микроволновой обработки семян / Н.В. Пушкина, Н.В. Любецкий, В.А. Карпович [и др.] // *Новости науки и технологий*. — 2012. — № 2. — С. 36–40.
4. Шегидевич А.А. Устройство для плазменной обработки семян растений : пат. 24309 Респ. Беларусь : А 01С 1/00 (2006.01), Н 01J 37/32 (2006.01) / А.А. Шегидевич, В.И. Мартынюк, Н.В. Пушкина [и др.] ; опубл. 20.06.2024.
5. Wei X. A review of effects of electromagnetic fields on ageing and ageing dependent bioeffects of electromagnetic fields / X. Wei, Y. Huang, C. Sun // *Science of The Total Environment*. — 2025. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178491.
6. Пушкина Н.В. Особенности накопления жирных кислот и оксипинов в проростках *Zea mays* L. под влиянием электромагнитного поля сверхвысокочастотного диапазона / Н.В. Пушкина // *Химия растительного сырья*. — 2020. — № 2. — С. 93–99.
7. Пушкина Н.В. Влияние предпосевной обработки семян электромагнитным полем сверхвысокочастотного диапазона на структурно-функциональное состояние проростков кукурузы / Н.В. Пушкина // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2016. — Т. 11. — № 1. — С. 32–39.
8. Zare H. Effects of electromagnetic waves with high frequency (940 MHz) cause increase catalase and H₂O₂ in *Zea mays* L. / H. Zare, S. Mohsenzadeh, A. Moradshahi // *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. — 2015. — Vol. 8. — № 4. — P. 642–649.
9. Shabrangi A. Induction of genetic variation by electromagnetic fields in *Zea mays* L. and *Brassica napus* L. / A. Shabrangi, H. Hassanpour, A. Majd [et al.] // *Caryologia*. — 2015. — Vol. 68. — № 4. — P. 272–279. — DOI: 10.1080/00087114.2015.1109920.
10. Ahmed N. Review of Non-Thermal Plasma Technology and Its Potential Impact on Food Crop Seed Types in Plasma Agriculture / N. Ahmed, L.X. Yong, Yang, J.H.C. et al. // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. — 2025. — Vol. 45. — P. 421–462.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Cecchetti D. Treatment of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds with electromagnetic field influences germination and phytohormone balance depending on seed size / D. Cecchetti, A. Pawelek, J. Wyszowska [et al.] // *Agronomy*. — 2022. — Vol. 12. — № 6. — P. 1423.
2. Yuan S. Effect of Plasma Treatment on Grain Seed Preservation: Promotion and Inhibition / S. Yuan, S. Tsuchikawa, T. Inagaki [et al.] // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. — 2025. — Vol. 45. — P. 1629–1659. — DOI: 10.1007/s11090-025-10596-7
3. Pushkina N.V. Modificirovannyj metod predposevnoj mikrovolnovoj obrabotki semjan [Modified method of pre-sowing microwave seed treatment] / N.V. Pushkina, N.V. Ljubeckij, V.A. Karpovich [et al.] // *Novosti nauki i tehnologij* [News of Science and Technologies]. — 2012. — № 2. — P. 36–40. [in Russian]
4. Shegidevich A.A. Ustrojstvo dlja plazmennoj obrabotki semjan rastenij [Device for plasma treatment of plant seeds] : patent 24309 Rep. Belarus' : A 01C 1/00 (2006.01), H 01J 37/32 (2006.01) / A.A. Shegidevich, V.I. Martynjuk, N.V. Pushkina [et al.] ; publ. 20.06.2024. [in Russian]
5. Wei X. A review of effects of electromagnetic fields on ageing and ageing dependent bioeffects of electromagnetic fields / X. Wei, Y. Huang, C. Sun // *Science of The Total Environment*. — 2025. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178491.
6. Pushkina N.V. Osobennosti nakoplenija zhirnyh kislot i oksilipinov v prorostkah *Zea mays* L. pod vlijaniem jelektromagnitnogo polja sverhvysokochastotnogo diapazona [Features of accumulation of fatty acids and oxylipins in *Zea mays* L. seedlings under the influence of an ultrahigh-frequency electromagnetic field] / N.V. Pushkina // *Himija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of Plant Raw Material]. — 2020. — № 2. — P. 93–99. [in Russian]



7. Pushkina N.V. Vliyanie predposevnoj obrabotki semjan jelectromagnitnym polem sverhvysochastotnogo diapazona na strukturno-funkcional'noe sostojanie prorstkov kukuruzy [Effect of pre-sowing seed treatment with an ultrahigh-frequency electromagnetic field on the structural and functional state of maize seedlings] / N.V. Pushkina // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2016. — Vol. 11. — № 1. — P. 32–39. [in Russian]
8. Zare H. Effects of electromagnetic waves with high frequency (940 MHz) cause increase catalase and H_2O_2 in Zea mays L. / H. Zare, S. Mohsenzadeh, A. Moradshahi // International Journal of Agriculture and Crop Sciences. — 2015. — Vol. 8. — № 4. — P. 642–649.
9. Shabrangi A. Induction of genetic variation by electromagnetic fields in Zea mays L. and Brassica napus L. / A. Shabrangi, H. Hassanpour, A. Majd [et al.] // Caryologia. — 2015. — Vol. 68. — № 4. — P. 272–279. — DOI: 10.1080/00087114.2015.1109920.
10. Ahmed N. Review of Non-Thermal Plasma Technology and Its Potential Impact on Food Crop Seed Types in Plasma Agriculture / N. Ahmed, L.X. Yong, Yang, J.H.C. et al. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. — 2025. — Vol. 45. — P. 421–462.