

Действие УФ-Б излучения и воды, активированной плазмой на прорастание пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

Э.А. Соснин^{1,2,*}, В.А. Панарин¹, В.С. Скакун¹, Е.Н. Сурнина²

¹Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

*badik@loi.hcei.tsc.ru

Аннотация. Цель работы – оценить влияние комбинированного воздействия УФ-Б излучения и воды, активированной плазмой (АПВ) на прорастание семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Ирень в лабораторных условиях. Исследования проводили в четырёх вариантах культивации (контроль; УФ-Б; АПВ и УФ-Б + АПВ) и повторяли в восьми циклах на двух типах семян (урожай 2021 и 2023 гг.). Для всех вариантов культивации определяли энергию прорастания, а также морфологические параметры проростков, сырой и сухой вес. Показано, что по энергии прорастания варианты УФ-Б, АПВ и УФ-Б + АПВ дают статистически значимое увеличение длины корней и ростков по сравнению с контрольным вариантом, а также обеспечивают наибольшее водопоглощение. Полученные данные служат обоснованием для перехода к сравнительным полевым испытаниям.

Ключевые слова: активированная плазмой вода, пузырьковый разряд, ультрафиолет Б, яровая пшеница, ХеСl-эксиллампа.

1. Введение

В современном растениеводстве актуальным является поиск способов выведения семян из состояния покоя для получения более ранних и дружных всходов, закладывающих основу для повышения урожайности, получения ранней и высококачественной продукции. Этот подход весьма актуален в условиях рискованного земледелия, когда лето является коротким.

В настоящее время установлено, что различные физические факторы, такие как плазма, гамма-излучение, микроволновые поля, а также оптическое излучение в оптимальных дозах могут стимулировать прорастание семян и развитие растений для случая предпосевной обработки [1–3]. В частности, в многолетнем цикле наших работ [4] было установлено, что субдозы УФБ-излучения (290–320 нм) оказывают стимулирующее действие на различные культуры при предпосевной обработке семян (лён, хвойные растения, пшеница и др.). Независимые исследования (см. обзор [3]) подтверждают эти данные.

Аналогично, известно, что предпосевная обработка семян водой, активированной плазмой (далее – АПВ) при определенных условиях может вызывать ускорение их роста на ранних стадиях, а также ингибировать развитие заболеваний растений как во время развития, так и на этапе хранения продукции [5–10].

Для перехода от лабораторных исследований к полевым и создания технологии предпосевной обработки семян физическими факторами необходимы сравнительные исследования различных способов обработки.

Цель данной статьи – провести сравнение действия УФ-Б излучения и АПВ на прорастание семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) для последующего выбора условий обработки при переходе к полевым испытаниям.

Актуальность работы обусловлена п. 21(г) Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145), где предусматривается переход к высокопродуктивному и экологически чистому агрохозяйству. И УФ-Б-излучение, и АПВ относятся к экологически чистым факторам воздействия, поскольку имитируют компоненты естественной среды: солнечный ультрафиолет и полезные для развития корневой системы растений азотные соединения, соответственно.

2. Методика эксперимента, материалы и оборудование

Эксперименты проводились в лабораторных условиях посредством проращивания семян тестовых растений на увлажненной ложе из фильтровальной бумаги в чашках Петри (диаметром 8.5 см). В каждую чашку помещали по 20 семян. В качестве тестовых объектов использовали семена мягкой яровой пшеницы сорта «Ирень», урожая 2021 и 2023 гг. Оценку и учет проросших семян при определении энергии прорастания проводили на третьи сутки, в соответствии с ГОСТ 12038-84. После обработки семена проращивали пять суток при комнатной температуре, причём первые трое суток проращивание велось в темноте. Измерения длины корней и ростков проводили на шестые сутки с последующей статистической обработкой в предположении нормального распределения ошибок и доверительной вероятностью 0.95%. Массу полученных растений измеряли на весах SC2020 с точностью до 1 мг.

В экспериментах было четыре варианта (каждый вариант в четырёх повторностях, на семенах с различным годом получения урожая):

1) Контрольный вариант с ежедневным орошением грунтовой водой с расходом 2-5 мл/сут.

2) Вариант с орошением по п. 1 и предпосевной обработкой семян УФ-Б-излучением ХеСl-эксилампы (модель BD_P, институт сильноточной электроники СО РАН) дозой 0.5 Дж/см², которую выявили в наших предыдущих экспериментах [11].

3) Вариант АПВ – с поливом активированной плазмой водой, процесс получения которой будет описан далее. Полив осуществляли по той же схеме, что и в первом варианте.

4) Вариант с комбинированным действием излучения и ПАВ, согласно пп. 3 и 4.

В цикле предварительных лабораторных и полевых исследований 2023–2024 гг. нами было найдено, что наилучший стимулирующий эффект на развитие пшеницы оказывает АПВ, полученная из грунтовой воды. При этом активированную водную среду следует получать путем воздействия импульсного высоковольтного разряда положительной полярности в воздухе на грунтовую воду. Воздействие разрядом осуществляют до тех пор, пока водородный показатель активированной водной среды не повысится на 0.3–1 [12]. При этом тип разряда не имеет значения, если достигаются указанные характеристики АПВ. В текущих экспериментах для этой процедуры использовали пузырьковую разрядную камеру, описанную в [10]. Полученную воду разбавляли на 50% и далее использовали для полива в вариантах 3 и 4.

В ходе предварительных тестов выяснилось, что семена, урожай которых был получен в 2023 г., дают лучшие показатели всхожести, поэтому далее все результаты будут приведены для этого случая.

3. Результаты и обсуждение

В Таблице 1 и на Рис. 1 приведены морфологические и ростовые параметры всходов, полученных в опыте от 26 марта 2023 г. Здесь для полива использовалась вода из родника, подвергнутая 5-минутному защелачиванию с 7.35 до 7.55.

Таблица 1. Параметры прорастания пшеницы для различных вариантов обработки.

Вариант	Энергия прорастания, %	Сырой вес проросшего растения, мгр/шт
1	64	62
2	92	74
3	86	70
4	86	70

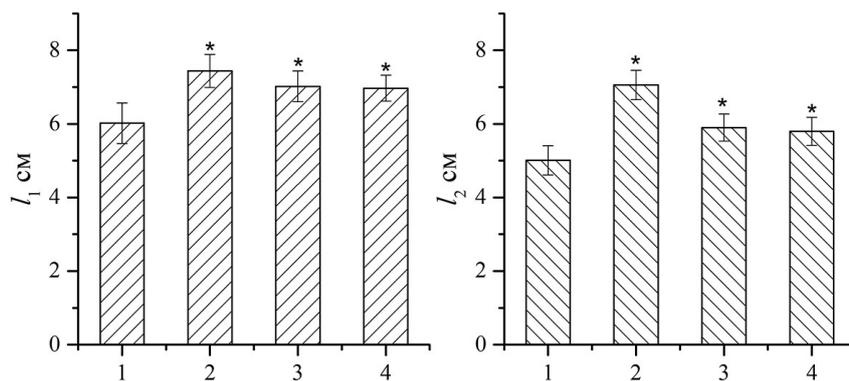


Рис. 1. Длина самого большого корня (слева) и длина ростка (справа) у различных вариантов обработки. Звёздочками обозначены статистически значимые отличия. Эксперимент от 26.03.2024.

Видно, что по всем параметрам (энергия прорастания, водопоглощение, длина корня и ростка лучший вариант обработки отвечает действию УФ-Б-излучения. Здесь и в других повторных экспериментах было замечено, что действие как УФ-Б-излучения, так и АПВ и их комбинации чаще приводит к наибольшему выравниванию между длиной самого длинного корня и длиной ростка. Замена одной грунтовой воды на другую могла приводить к тому, что варианты АПВ и АПВ + УФ-Б давали большую прибавку к длине корня и ростка, чем обработка только УФ-Б-излучением. Например, в опыте от 10 января 2023 г., когда для полива использовалась вода из родника, подвергнутая 3-минутному защелачиванию с 6.73 до 8, эти варианты также увеличивали водопоглощение и имели близкие величины энергии прорастания с вариантом 2 (см. Рис. 2 и Таблица 2).

Таблица 2. Параметры прорастания пшеницы для различных вариантов обработки.

Вариант	Энергия прорастания, %	Сырой вес проросшего растения, мгр/шт
1	84	66
2	94	69
3	90	83
4	95	73

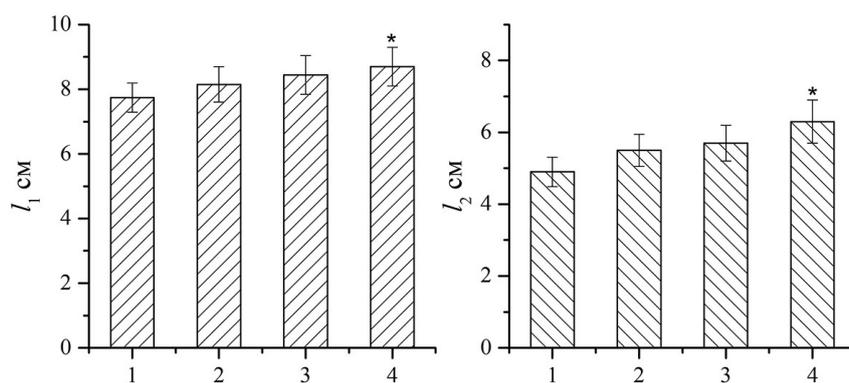


Рис. 2. Длина самого большого корня (слева) и длина ростка (справа) у различных вариантов обработки. Звёздочками обозначены статистически значимые отличия. Эксперимент от 10.01.2024.

Обобщая данные восьми проведённых циклов исследований можно заключить, что в среднем варианты 2–4 обеспечивают лучшее водопоглощение и ускорение развития как корневой системы, так и ростков, хотя вклад в эти параметры в разных экспериментах был

различным. Также из лабораторных исследований строго не следует, какой из вариантов (УФ-Б, АПВ, УФ-Б + ПАВ) более эффективен на ранних этапах онтогенеза пшеницы.

Чем могут быть обусловлены полученные данные? Мы полагаем, что дело здесь прежде всего в различиях в составе АПВ, полученной из различных грунтовых вод, что в свою очередь вызывает отличия в процессе их защелачивания импульсным разрядом. На Рис. 3 показан пример временного хода водородного показателя в процессе обработки грунтовой воды импульсным высоковольтным разрядом. Типичная кривая содержит участок защелачивания (I), выход на т.н. буферное плато (II) с медленным спадом значения pH и участок быстрого закисления раствора (III). Такое поведение pH в [13] объяснили следующим образом:

Будем считать, что на участке III (Рис. 3) падение pH обусловлено перекисью водорода, азотной и пероксиазотной кислотами, концентрация которых такова, что процесс приобретает классический ход, типичный для плазменной обработки дистиллированной воды [14]. Тогда на этапах I и II, несмотря на образование этих частиц, их влияние на pH раствора чем-то экранируется и даже вызывает повышение pH. Наши измерения [15] показывают, что в природных водах процесс получения АПВ приводит к резкому увеличению концентрации типичных для таких вод ионов Ca^{++} и Mg^{++} – от единиц мг/л до десятков и даже сотен. Это значит, что обычно нерастворимые в воде соли, например, карбонаты кальция и магния, взаимодействуя с азотной и пероксиазотной кислотами, образуют уже растворимые в воде соли – нитраты или нитриты кальция и магния.

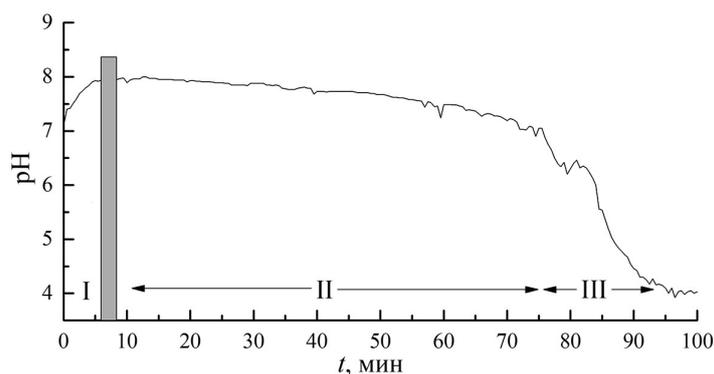


Рис. 3. Временной ход показателя pH в процессе обработки грунтовой воды импульсным высоковольтным разрядом. Эксперимент от 8.04.2024. Серым цветом обозначена зона АПВ, готовой для полива.

Аналогично может действовать перекись водорода – напрямую или через промежуточные реакции с образованием анионов NO_3^- и NO_2^- . Вероятно, это вызывает временное смещение равновесия в сторону увеличения pH. Но когда запас исходных солей – своего рода буфера – иссякает, процесс развивается по классическому сценарию. В этом смысле участок II можно назвать «буферным плато». Его способность к формированию растворимых солей и, соответственно, экранированию действия перекиси водорода зависит от состава применяемых вод. А поскольку в наших экспериментах мы выбирали грунтовые воды из различных источников в разное время года, это могло приводить к различиям в составе водно-солевой АПВ после обработки. Поэтому в одном случае АПВ действовала на семена пшеницы эффективнее, по сравнению с действием УФ-Б, в другом – нет, либо давала близкий уровень воздействия (на Рис. 1 и 2 эти ситуации не показаны).

4. Заключение

В лабораторных условиях проведено экспериментальное сравнение действия УФ-Б излучения и АПВ на проращение семян яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.).

Проведенные исследования подтверждают эффективность использования как УФБ-излучения, так и АПВ для предпосевной стимуляции пшеницы. Показано, что оба указанных фактора повышают основные параметры, характеризующие развитие пшеницы на ранних этапах онтогенеза, а именно, увеличивают способность семян к влагопоглощению, ускоряют развитие корневой системы и развитие ростков. Полученные данные будут использованы в дальнейшем для проведения сравнительных исследований в полевых условиях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

5. Список литературы

- [1] T. Ohta, M. Shiratani, and M. Hori, Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies, *Plasma Process. Polym.*, vol. **15**(2), 201700073, 2018; doi: 10.1002/ppap.201700073
- [2] S.S. Araújo, S. Paparella, D. Dondi, A. Bentivoglio, D. Carbonera, and A. Balestrazzi, Physical Methods for Seed Invigoration: Advantages and Challenges in Seed Technology, *Front. Plant Sci.*, vol. **7**, 646, 2016; doi: 10.3389/fpls.2016.00646
- [3] D. Thomas, T.T. Jos, and T. Puthur, UV radiation priming: A means of amplifying the inherent potential for abiotic stress tolerance in crop plants, *Environmental and Experimental Botany*, vol. **138**(6), 57, 2017; doi: 10.1016/j.envexpbot.2017.03.003
- [4] Э.А. Соснин, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Д.А. Сорокин, Е.Н. Сурнина, И.А. Викторова, Л.В. Ляцева, Влияние имитатора солнечного УФБ-излучения на посевные качества семян и продуктивность хозяйственно-ценных растений, *Фотоника*, № **3**, 238, 2023; doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.3.238.248
- [5] J.-S. Song, S.B. Kim, S. Ryu, J. Oh, and D.-S. Kim, Emerging plasma technology that alleviates crop stress during the early growth stages of plants: A review, *Front. Plant Sci.*, vol. **11**, 988, 2020; doi: 10.3389/fpls.2020.00988
- [6] N. Puač, M. Gherardi, and M. Shiratani, Plasma agriculture: A rapidly emerging field, *Plasma Process Polym.*, vol. **15**, e1700174, 2018; doi: 10.1002/PPAP.201700174
- [7] И.К. Наумова, И.Н. Субботкина, В.А. Титов, А.В. Хлюстова, Н.А. Сироткин, Влияние воды, активированной неравновесной газоразрядной плазмой, на всхожесть и ранний рост огурцов (*Cucumis Sativus*), *Прикладная физика*, № **4**, 40, 2021; doi: 10.51368/1996-0948-2021-4-40-46
- [8] P. Dimitrakellis, M. Giannoglou, Z.M. Xanthou, E. Gogolides, P. Taoukis, and G. Katsaros, Application of plasma-activated water as an antimicrobial washing agent of fresh leafy produce, *Plasma Process Polym.*, vol. **18**(2), e2100030, 2021; doi: 10.1002/ppap.202100030
- [9] С.В. Белов, Л.М. Апашева, Ю.К. Данилейко, А.Б. Егоров, А.В. Лобанов, В.И. Луканин, Е.Н. Овчаренко, В.В. Савранский, Л.Г. Шилин, Стимуляция роста растений водным раствором, активированным плазмой тлеющего разряда, *Биофизика*, **65**(2), 326, 2020; doi: 10.31857/S0006302920020155
- [10] Э.А. Соснин, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Е.Н. Сурнина, С.А. Нужных, Влияние воды, активированной плазмой, на всхожесть и продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), *Прикладная физика*, № **2**, 1, 2024; doi: 10.51368/1996-0948-2024-1
- [11] Д.Т. Суханкулиев, Э.А. Соснин, Е.Н. Сурнина, Влияние плазма активированной воды на корнеобразование яровой пшеницы, *Сб. материалов XIX Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Инноватика-2023*, Томск: STT, 2023.

- [12] Э.А. Соснин, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Д.А. Сорокин, Н.Р. Гайнутдинова, Способ стимуляции роста растений, Заявка на изобретение №2023135726, Приоритет 30.01.2024.
- [13] Д.А. Сорокин, Э.А. Соснин, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Д.С. Печеницин, О возможном механизме буферного защелачивания природных вод, подвергнутых действию импульсного высоковольтного разряда, *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2024 (в печати).
- [14] K. Oehmigen, M. Hähnel, R. Brandenburg, C. Wilke, K.D. Weltmann, and T. von Woedtke, The role of acidification for antimicrobial activity of atmospheric pressure plasma in liquids, *Plasma Processes Polym.*, vol. 7(3–4), 250, 2010; doi: 10.1002/ppap.200900077
- [15] А.Ю. Рябов, С.В. Кудряшов, В.А. Панарин, Э.А. Соснин, В.С. Скакун, Д.А. Сорокин, Влияния формы электрического разряда на физико-химические свойства плазма-активированной дистиллированной и грунтовой вод, *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 67(2), 30, 2023; doi: 10.6060/ivkkt.20246702.6880