

УДК 533.9.07; 537.523; 633.11
EDN: EBYCGH

PACS: 52.77.-j; 52.80.-s

**Влияние воды, активированной плазмой, на всхожесть и продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.)***Э. А. Соснин, В. А. Панарин, В. С. Скакун, Д. А. Сорокин, Е. Н. Сурнина, С. А. Нужных*

*Определено влияние активированной плазмой грунтовой воды на всхожесть и продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) в полевых условиях. Растворы активированной плазмой грунтовой воды, получали в пузырьковом разряде на основе грунтовой воды, которая подвергалась защелачиванию. Сделан анализ структуры урожая и качества полученного зерна. Показано, что стартовый девятидневный полив семян такими растворами ускоряет их прорастание, повышает урожайность на 2,5 % с сохранением качества зерна по сравнению с контрольным вариантом с поливом обычной грунтовой водой. Обработка повысила содержание белка в зерне на 1,7 %. Предложена гипотеза для объяснения полученных результатов.*

Ключевые слова: вода, активированная плазмой, всхожесть, качество зерна, пузырьковый разряд, урожайность, *Triticum aestivum* L.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-43-50

Введение

Низкотемпературная плазма является мощным инструментом для решения различных задач, поскольку обеспечивает действие сразу нескольких физических и химических факторов на объекты воздействия. На множестве примеров показано, что, выбирая параметры разряда и тип среды, где формируется

плазма, можно обеспечить лучшее решение той или иной экспериментальной задачи. В рамках этих исследований в качестве среды, где формируется плазма, часто используется жидкость (вода и её растворы), либо граница между жидкостью и газом [1]. Полученные в результате взаимодействия плазмы и жидкости среды называются активированными плазмой средами, водами или растворами (далее – АПВ) [2].

Имеется множество работ, в которых показано, что обработка растений с помощью АПВ при определенных условиях может вызывать ускорение их роста на ранних стадиях, а также ингибирует развитие заболеваний растений, как во время развития, так и на этапе хранения продукции [3–10].

Однако результаты по стимуляции роста растений, которые получены в лабораторных условиях существенно отличаются от полевых. В последнем случае имеется множество факторов (климатические условия, состав почвы и т. п.), которые могут нивелировать эффект, полученный в лабораторных условиях. Кроме того, с точки зрения сельскохозяйственной технологии важны не параметры

Соснин Эдуард Анатольевич^{1,2}, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Панарин Виктор Александрович¹, н.с., к.ф.-м.н.Скакун Виктор Семенович¹, ст.н.с., к.ф.-м.н.Сорокин Дмитрий Алексеевич¹, зав. лаб., к.ф.-м.н.Сурнина Елена Николаевна², ст. преп.Нужных Светлана Анатольевна², н.с., к.б.н.¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

² Национальный исследовательский Томский

государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 6.02.2024

После доработки 16.02.2024

Принята к публикации 4.03.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9; 4.1.1

© Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Сорокин Д. А., Сурнина Е. Н., Нужных С. А., 2024

прорастания, а урожайность [11]. Работ по определению грунтовой всхожести пока немного [12, 13], а оценок урожайности почти нет, за исключением гидропонного варианта культивации [8].

Целью данной работы является выявление влияния АПВ на полевую всхожесть и урожайность яровой пшеницы. Ещё одним отличием наших исследований является использование для получения АПВ грунтовой, а не дистиллированной воды, чему есть две причины. Во-первых, грунтовая вода всегда находится в водоносных горизонтах и может быть использована на местах для продукции АПВ, т. е. её использование отвечает технологичности процесса. Во-вторых, уже имеется достаточно данных о том, что применение родниковой и водопроводной воды имеет свои особенности [12, 14], которые можно использовать для получения АПВ, применяемой для полива. Об этом далее будет сказано отдельно.

Экспериментальная техника и методики

Для исследований использовали экспериментальную установку, показанную на рисунке. Источник питания 1 обеспечивал импульсы напряжения положительной полярности с амплитудой до 3,6 кВ, длительностью по основанию 1,3 мкс, фронтом 200 нс и частотой следования 54 кГц.

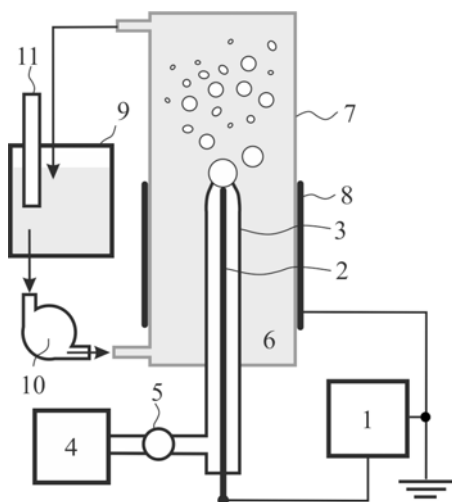


Рис. Экспериментальная установка для разрядной обработки воды: 1 – высоковольтный импульсный источник питания; 2 – высоковольтный электрод; 3 – трубка; 4 – компрессор воздуха; 5 – расходомер; 6 – вода; 7 – кварцевый сосуд; 8 – внешний электрод; 9 – контрольная ёмкость; 10 – насос; 11 – измерители pH и проводимости раствора

Импульсы подавались на электрод 2, помещенный в стеклянную трубку 3. Нагнетаемый воздух компрессором 4 (JQB1523) через расходомер 5 и трубку 3 попадал в воду 6, налитую в цилиндрический кварцевый сосуд 7 с внутренним диаметром 19 мм и высотой 300 мм. Фольговой электрод 8 (площадь 120 см²) обеспечивал ёмкостную развязку между электродом 2 и землёй. Внешний и внутренний диаметр стеклянной трубки 3 составлял 7,5 и 5,5 мм, но в верхней части трубки имелось сужение с внутренним диаметром 0,2 мм. Объём воды в одном эксперименте составлял около 200 мл. Обрабатываемая разрядом вода подвергалась циркуляции, вначале поступая в контрольный сосуд 9, и далее, с помощью шестерёчатого насоса 10 (ZC-A250 12V) возвращалась в сосуд 7. Контрольный сосуд 9 использовался для измерений показаний Ph и проводимости раствора с помощью тестера 11 (pНер®+ pH HI98108 и TDS&ES meter(hold)). Скорости прокачки воды и воздуха в описанной установке во время опытов составляли примерно 370 и 120 мл/мин, соответственно.

Почти вся поверхность высоковольтного электрода 2 покрывалась изолирующим слоем из тефлона (на рисунке не показан) так, чтобы исключить пробой между ним и стенками трубки 3, и так, чтобы разряд происходил только с острия электрода. Благодаря этому разряд формируется только внутри пузырьков, образующихся на конце трубки 3. Поскольку частота следования импульсов была много выше времени образования и отрыва пузырька (десятки-сотни микросекунд), в каждом из пузырьков происходило до нескольких сотен пробоев, а характер разряд изменялся – от искрового до объемного, тлеющего. Фотографирование также выявило наличие скользящих разрядов, развивающихся по внутренней поверхности пузырьков. Благодаря этому продуцирование химически активных частиц происходило как в объёме самого пузыря, непосредственно в разряде в воздухе, так и на поверхности раздела фаз «воздух – жидкость».

Для контроля вводимой мощности использовали оценку нагрева воды в ёмкости 9 на фиксированное время и далее, с учётом объёма раствора рассчитывали выделенную в разряде тепловую энергию. При измерении температуры использовали термодатчик,

встроенный в тестер 11 с точностью измерения температуры $\pm 0,5$ °С. Измерения одной пробы проводили три раза, а затем полученные величины усреднялись. Полученная оценка снизу для термализованной в растворе мощности в наших опытах составляла 12,5 Вт.

Описанная конструкция аналогичная пучковой камере, применявшиеся ранее [15], отличаясь тем, что ввод воздуха осуществляется не сверху, а снизу, как это было сделано в [16]. Это, как показали наши измерения, позволяет повысить растворимость образовавшихся в воздухе продуктов плазмы разряда в жидкости в процессе её обработки, что в конечном счёте повышает производительность экспериментальной установки.

Для получения АПВ в описанную установку заливали грунтовую воду, а воздействие плазмой разряда осуществляли до тех пор, пока водородный показатель раствора не достигал максимума. Используя разные грунтовые воды, взятые из различных источников, авторы убедились, что типичный подъём величины рН составляет 0,2–1,2. Перед началом полевых исследований мы показали в лабораторных условиях, что такая АПВ обеспечивает увеличение массы корневой системы в сравнении с контрольным вариантом на 30–50 %, а длины корня – на 11–28 % [17]. Отметим, что традиционно используемая в лабораторных исследованиях для плазменной обработки вода – дистиллированная [18, 19], за несколькими исключениями. В этом случае величина рН в ходе обработки всегда падает. Мы же используем режим обработки грунтовой воды с «подбросом» рН. Полученная таким образом АПВ, как показали наши повторные эксперименты, обеспечивает ускорение роста растений [17]. Механизм такого действия ещё предстоит выяснить, пока же можно предположить следующее.

Низкая концентрация ионов кальция и магния в исходных образцах и слабощелочная среда грунтовых вод подразумевает присутствие в растворе ионов кальция и магния в виде нерастворимых солей, например, карбонатов кальция и магния. Воздействие импульсного разряда на воздух в присутствии воды приводит к образованию различных активных частиц, в том числе анионов NO_3^- и NO_2^- , ко-

торые могут взаимодействовать с нерастворимыми в воде карбонатами, образуя уже растворимые в воде соли – нитраты или нитриты кальция и магния, что и приводит к росту концентрации их ионов в воде [15]. Таким образом, обработанная импульсным высоковольтным разрядом грунтовая вода включает в себя как компоненты, которые ускоряют развитие корневой системы растений (NO_3^- и NO_2^-), заменяя длинную цепочку использования азотных удобрений, так и другие компоненты, которые активизируют процессы проницаемости клеточных оболочек, что также стимулирует развитие растений из семян. Вероятно поэтому полученный описанным способом раствор АПВ обладает высокой биохимической активностью.

Результаты и их обсуждение

Полученную по вышеописанной процедуре АПВ использовали для полива мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Ирень (урожай 2021 г.) в полевых условиях. Опыт был заложен в коллекционном питомнике лаборатории сельскохозяйственных растений на территории Учебно-экспериментального участка СибБС ТГУ (г. Томск). Полевые исследования проводились согласно методикам Б. А. Доспехова [20].

В опыте было три варианта (каждый вариант в четырёх повторностях по 1 м^2 посевной площади на каждую):

1) Контрольный вариант с поливом грунтовой водой с расходом $1\text{--}2 \text{ л/м}^2$, и ежедневным орошением по одному разу до полной всхожести семян.

2) Вариант 100 % АПВ – с поливом АПВ, полученной после обработки грунтовой воды по вышеописанной процедуре без разведения. Полив осуществляли по той же схеме, что и в первом варианте.

3) Вариант 50 % АПВ – отличался тем, что, полив осуществляли АПВ с 50 % разведением необработанной грунтовой водой по той же схеме, что и в первом варианте.

АПВ для вариантов 50 и 100 % готовилась ежедневно, непосредственно перед поливом.

Полевую всхожесть растений пшеницы определяли на девятый день после посева. Она составила 50, 43 и 62 %, для 1, 2 и 3 вари-

антов, соответственно. Указанная полевая всхожесть для контроля является типичной величиной для этого сорта пшеницы в текущих условиях возделывания. Всхожесть пшеницы после обработки 50 % АПВ была на 12 % выше, чем в контрольном варианте, что свидетельствует о пропорциональном ускорении развития пшеницы. Продолжительность вегетационного периода составила 83–85 дней, во всех вариантах.

Последующая культивация позволила нам оценить зерновую урожайность, которая в свою очередь зависит от многих элементов продуктивности [21]. При норме высева 600 шт./м², среднее число растений на 1 м² к уборке урожая составило в контроле 406,17 ± 16,97 шт., а в опытных вариантах с 50 % и 100 % обработках АПВ на 4 % и 5 % меньше, соответственно (табл. 1).

Продуктивность колоса складывается из 2-х составляющих – массы 1000 зерен и числа зерен в колосе. Число зерен в колосе в свою очередь зависит от длины колоса, числа развитых и неразвитых колосков в колосе. По таким показателям, как: длина и масса колоса, число зерен в колосе и их масса в варианте с

обработкой 50 % АПВ отмечены максимальные значения по сравнению с контролем и 100 % АПВ (табл. 1). Масса 1000 зерен в варианте 50 % АПВ превышает контрольные значения на 1,8 %, а в варианте 100 % АПВ этот показатель на 4 % ниже контроля. Наибольшая урожайность зерна также отмечена в варианте 50 % АПВ и составила 396,15 ± 16,33 г/м², что превышает контрольные значения на 2,5 %, а в варианте со 100 % АПВ урожайность зерна была ниже контроля на 11,4 %.

Не менее важным с прикладной точки зрения является не просто получение урожая, но выявление влияния того или иного физического фактора на качества полученного продукта. В научной литературе по применению АПВ в растениеводстве параметры качества обычно не рассматривают. Авторы определили качество полученного зерна по четырём параметрам (табл. 2). Прежде всего это – содержание белка – показатель мукомольных и хлебопекарных свойств пшеницы, который связан с другими параметрами – количеством и качеством клейковины, а также со стекловидностью.

Таблица 1

Влияние АПВ на структуру урожая пшеницы

Параметры	Вариант опыта		
	Контроль	50 % АПВ	100 % АПВ
Число продуктивных побегов, шт.	406,17 ± 16,97	389,83 ± 26,08	385,33 ± 20,64
Длина колоса, см	10,51 ± 0,32	10,83 ± 0,08	10,65 ± 0,45
Масса колоса, г	1,88 ± 0,20	1,95 ± 0,10	1,67 ± 0,11
Число зерен в колосе, шт.	34,68 ± 0,61	35,87 ± 1,72	33,50 ± 4,32
Масса зерна в колосе, г	1,44 ± 0,14	1,49 ± 0,10	1,38 ± 0,22
Масса 1000 шт. семян	38,82 ± 1,12	39,51 ± 0,74	37,27 ± 0,45
Урожайность зерна, г/м ²	386,42 ± 11,48	396,15 ± 16,33	342,36 ± 19,82

Таблица 2

Влияние АПВ на качество зерна пшеницы

Параметры	Контроль	50 % АПВ	100 % АПВ
Белок %	16,97 ± 0,08	16,79 ± 0,07	17,25 ± 0,06*
Клейковина %	35,82 ± 0,32	35,67 ± 0,37	36,48 ± 0,27
ИДК, ед.	84,04 ± 0,57	84,51 ± 0,68	85,98 ± 0,42
Стекловидность %	44,32 ± 0,20	45,24 ± 0,17*	45,42 ± 0,14*

Примечание. Знаком * отмечены достоверные различия при $p \leq 0,05$.

Известно, что чем больше в зерне пшеницы белка, тем выше качество продуктов его переработки. Содержание белка в зерне пшеницы колеблется в больших пределах в зависимости от сорта, района произрастания, почвенно-климатических условий и др. Высоким считают содержание белка свыше 16–17 %, средним – 14–16 %, низким – менее 14 % на сухое вещество [22]. Из таблицы 1 видно, что обработка АПВ не оказала отрицательного воздействия на качество зерна пшеницы, а в варианте 100 % АПВ отмечено увеличение содержания белка на 1,7 %.

Клейковина – белковый сгусток, который образуется при отмывании водой теста, замешанного из муки. Этот сгусток обладает эластичностью, упругостью и связностью, от которых зависит качество выпекаемого из муки хлеба, а также других продуктов [23]. Массовая доля клейковины в контроле составила $35,82 \pm 0,32$ %, а во втором и третьем вариантах $35,67 \pm 0,37$ и $36,48 \pm 0,27$ %, соответственно. Кроме количественного содержания важно качество клейковины, которое характеризуется показателем индекса деформации клейковины (ед. ИДК). Самый высокий ИДК был отмечен в варианте 100 % АПВ – 85,98 ед., самый низкий в контроле – 84,04 ед.

Стекловидность определяет технологические свойства муки и характеризует консистенцию эндосперма. Пшеница по стекловидности делится на три группы: низкостекловидная – до 40 %, среднестекловидная – от 40 до 60 %, высокостекловидная – более 60 %. В наших исследованиях стекловидность варьировала в пределах 44,32–45,42 %, отвечая среднему уровню: в вариантах с 50 % и 100 % АПВ показатель стекловидности зерна был выше контроля на 2,1 и 2,5 %, соответственно.

Встаёт вопрос о том, почему в варианте 100 % АПВ урожайность была ниже, чем в варианте 50 % АПВ? Ранее лабораторные опыты [17] показали, что вариант 50 % АПВ ускоряет развитие корневой системы растений, а варианты 25 % и 100 % АПВ проявили себя хуже. Теперь мы видим, что 50% концентрация также является оптимальной и по отношению к урожайности зерна.

Важным показателем, влияющим на уровень урожайности, считается озерненность колоса. Наименьшее количество зерен в коло-

се и их масса отмечены в варианте с 100 % АПВ, в совокупности с низким числом продуктивных побегов урожайность зерна в опыте 100 % АПВ была ниже контроля и 50 % АПВ на 11,4 % и 13,6 %, соответственно. Назвать точную причину этого нельзя без кропотливых биохимических анализов растворов АПВ, полученного растительного материала и химических анализов почвы. На текущем уровне исследований можно лишь предположить, что это может быть связано с химическим составом АПВ, т. е. в варианте 100 % АПВ для растений пшеницы концентрация ионов в растворе избыточна. Другая версия – водородный показатель в случае 100 % АПВ отрицательно повлиял на почвенную среду, снизив скорость и направленность происходящих в ней химических и биохимических реакций.

Проведенные эксперименты ставят ещё один интересный вопрос: оптимальный процент АПВ по урожайности не совпадает с процентом, оптимальным для качества зерна. Так в 100 % АПВ содержание белка в зерне было выше, чем в варианте 50 % АПВ, а урожайность ниже. Известно [24, 25], что повышенные дозы азотного удобрения снижают урожай и незначительно увеличивают содержание белка в зерне. Эти данные согласуются с показателями урожайности и качества зерна в опытном варианте с 100 % АПВ, если учесть, что растворы АПВ являются источниками анионов NO_3^- и NO_2^- . Вероятно, в 100 % АПВ концентрация этих анионов отвечает повышенной концентрации азотных удобрений при традиционном способе подкормки растений.

Таким образом, проведенные полевые исследования показали, что обработка семян 50 % АПВ привела к увеличению урожая на 2,5 %, а обработка 100 % АПВ улучшила качество зерна. Полученные данные являются базовыми для планирования последующих исследований: дополнительной проверки действия АПВ в полевых условиях для обеспечения технологичности способа и уточнения процедуры полива АПВ, обеспечивающей наилучшие результаты по урожайности культур с одновременным сохранением качества зерна.

Заклучение

В полевых условиях экспериментально обоснован способ повышения урожайности пшеницы, который обеспечивается поливом семян в первые несколько дней после посева. При этом полив осуществляют АПВ, процедура получения которой включает защелачивание грунтовой воды импульсным высоковольтным разрядом. На примере мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Ирень (урожай 2021 г.) показано, что обработка растворами АПВ увеличивает урожайность культуры и качество зерна.

Проведенные исследования следует продолжить, чтобы получить данные, необходимые для создания соответствующей технологии. И здесь будут необходимы как повторные полевые исследования, так и вариации в процедуре обработки растений АПВ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства Науки и Высшего Образования
Российской Федерации в рамках Соглашения
№ 075-15-2022-1238 от 13 октября 2022 г.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G. E., Graham W. G., Graves D. B., Hofman-Caris R. C. H. M., Maric D., Reid J. P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J. E., Garrick S. C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krca F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E. C., Pawlat J., Petrovic Z. Lj., Pflieger R., Reuter S., Schram D. C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P. A., Verlet J. R. R., von Woedtke T., Wilson K. R., Yasui K., Zvereva G. / Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 053002.
2. Kumar Kaushik N., Ghimire B., Li Y., Adhikari M., Veerana M., Kaushik N., Jha N., Adhikari B., Lee S.-J., Masur K., von Woedtke T., Weltmann K.-D., Choi E. H. / Review Biol. Chem. 2018. Vol. 400. № 1. P. 39.
3. Song J.-S., Kim S. B., Ryu S., Oh J., Kim D.-S. / Front. Plant Sci. 2020. Vol. 11. P. 988.
4. Puač N., Gherardi M., Shiratani M. / Plasma Proc. Polym. 2017. Vol. 15. № 2. P. e1700174.
5. Zambon Y., Contaldo N., Laurita R., Várallyay E., Canel A., Gherardi M., Colombo V., Bertaccini A. / Sci. Rep. 2020. Vol. 10. № 1. P. 19211.
6. Наумова И. К., Субботкина И. Н., Тумов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А. / Прикладная физика. 2021. № 4. С. 40.
7. Dimitrakellis P., Giannoglou M., Xanthou Z. M., Gogolides E., Taoukis P., Katsaros G. / Plasma Process Polym. 2021. Vol. 18. № 12. P. e2100030.
8. Takahata J., Takai K., Satta N., Takahashi K., Fujio T. / Jap. J. Appl. Phys. 2015. Vol. 54. № 1S. P. 01AG07.
9. Zhou R., Wang P., Xian Y., Mai-Prochnow A., Lu X. P., Cullen P. J., Ostrikov K., Bazaka K. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53(30). P. 303001.
10. Белов С. В., Анашева Л. М., Данилейко Ю. К., Егоров А. Б., Лобанов А. В., Луканин В. И., Овчаренко Е. Н., Савранский В. В., Шилин Л. Г. / Биофизика. 2020. Т. 65. № 2. С. 326.
11. Соснин Э. А. / Инноватика-2021: сб. материалов XVII Междунар. школы-конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2021. С. 53.
12. Наумова И. К., Тумов В. А., Хлюстова А. В., Сироткин Н. А. / Прикладная физика. 2020. № 6. С. 34.
13. Sivachandiran L., Khacef A. / RSC Advances. 2017. Vol. 7(4). P. 1822.
14. Park D. P., Davis K., Gilani S., Alonzo C.-A., Dobrynin D., Friedman G., Rabinovich A., Fridman G. / Current Appl. Phys. 2013. Vol. 13. P. S19.
15. Panarin V., Sosnin E., Ryabov A., Skakun V., Kudryashov S., Sorokin D. / Technologies. 2023. Vol. 11. P. 41.
16. Bian W.-J., Ying X.-L., Shi J.-W. / J. Hazard. Mater. 2009. Vol. 162(2-3). P. 906.
17. Суханкульев Д. Т., Соснин Э. А., Сурнина Е. Н. / Инноватика-2023: сб. материалов XIX Междунар. школы конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2023. С. 73.
18. Ma R., Wang G., Tian Y., Wang K., Zhang J., Fang J. / J. Hazard. Mater. 2015. Vol. 300. P. 643.
19. Xu Y., Tian Y., Ma R., Liu Q., Zhang J. / Food Chemistry. 2016. Vol. 197. P. 436.
20. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985.
21. Земцова Е. С., Боме Н. А. / Вестник Казанского ГАУ. 2021. № 2(62). С. 23.
22. Жилкин А. А., Тютюма Н. В. / Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2003. № 8. С. 94.
23. Костин В. И., Мударисов Ф. А., Кривова А. И. / Вестник РАЕН. 2014. Т. 14. № 6. С. 54.
24. Павлов А. Н. Повышение содержания белка в зерне. – М.: Наука, 1984.
25. Завалин А. А., Соколов О. А. / Плодородие. 2018. № 1. С. 17.

The effect of plasma-activated water on the germination and productivity of spring wheat (*Triticum aestivum* L.)

E. A. Sosnin^{1,2}, *V. A. Panarin*¹, *V. S. Skakun*¹, *D. A. Sorokin*¹, *E. N. Surnina*²
and *S. A. Nuznich*²

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

² Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

Received 6.02.2024; revised 16.02.2024; accepted 4.03.2024

The effect of plasma-activated water on the germination and productivity of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field has been determined. Plasma-activated water solutions were obtained in a bubble discharge based on groundwater, which was subjected to alkalization. The analysis of the structure of the crop and the quality of the resulting grain is made. It is shown that the initial nine-day watering of seeds with such solutions accelerates their germination, increases yield by 2.5 % while maintaining grain quality compared with the control version with irrigation with ordinary groundwater. And then, such treatment increased the protein content in the grain by 1.7 %. A hypothesis is proposed to explain the results obtained.

Keywords: plasma activated water, germination, grain quality, bubble discharge, yield, *Triticum aestivum* L.

REFERENCES

1. Bruggeman P. J., Kushner M. J., Locke B. R., Gardeniers J. G. E., Graham W. G., Graves D. B., Hofman-Caris R. C. H. M., Maric D., Reid J. P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J. E., Garrick S. C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krcma F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E. C., Pawlat J., Petrovic Z. Lj., Pflieger R., Reuter S., Schram D. C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P. A., Verlet J. R. R., von Woedtke T., Wilson K. R., Yasui K. and Zvereva G. **25**, 053002 (2016).
2. Kumar Kaushik N., Ghimire B., Li Y., Adhikari M., Veerana M., Kaushik N., Jha N., Adhikari B., Lee S.-J., Masur K., von Woedtke T., Weltmann K.-D. and Choi E. H., *Review Biol. Chem.* **400**, 39 (2018).
3. Song J.-S., Kim S. B., Ryu S., Oh J. and Kim D.-S., *Front. Plant Sci.* **11**, 988 (2020).
4. Puač N., Gherardi M. and Shiratani M., *Plasma Proc. Polym.* **15** (2), e1700174 (2017).
5. Zambon Y., Contaldo N., Laurita R., Várallyay E., Canel A., Gherardi M., Colombo V. and Bertaccini A., *Sci. Rep.* **10**, 19211 (2020).
6. Naumova I. K., Subbotkina I. N., Titov V. A., Khlyustova A. V. and Sirotkin N. A., *Applied Physics*, № 4, 40 (2021) [in Russian].
7. Dimitrakellis P., Giannoglou M., Xanthou Z. M., Gogolides E., Taoukis P. and Katsaros G., *Plasma Process Polym.* **18**, e2100030 (2021).
8. Takahata J., Takai K., Satta N., Takahashi K. and Fujio T., *Jap. J. Appl. Phys.* **54**, 01AG07 (2015).
9. Zhou R., Wang P., Xian Y., Mai-Prochnow A., Lu X. P., Cullen P. J., Ostrikov K. and Bazaka K., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53**, 303001 (2020).
10. Belov S. V., Danileiko Y. K., Egorov A. B., Lukanin V. I., Ovcharenko E. N., Savransky V. V., Shilin L. G., Apasheva L. M. and Lobanov A. V., *Biophysics* **65**, 283 (2020).

11. Sosnin E. A. Innovation-2021: Proc. of XVII Int. school-conf. of students, graduate students and young scientists. Tomsk, 2021, pp. 53 [in Russian].
12. Naumova I. K., Titov V. A., Khlyustova A. V. and Sirotkin N. A., Applied Physics, № 6, 34 (2020) [in Russian].
13. Sivachandiran L. and Khacef A., RSC Advances. **7**, 1822 (2017).
14. Park D. P., Davis K., Gilani S., Alonzo C.-A., Dobrynin D., Friedman G., Rabinovich A. and Fridman G., Current Appl. Phys. **13**, S19 (2013).
15. Panarin V., Sosnin E., Ryabov A., Skakun V., Kudryashov S. and Sorokin D., Technologies **11**, 41 (2023).
16. Bian W.-J., Ying X.-L. and Shi J.-W., Hazard. Mater. **162**, 906 (2009).
17. Sukhankulyev D. T., Sosnin E. A. and Surmina E. N. Innovation-2023: Proc. of XIX Int. school-conference of students, graduate students and young scientists. Tomsk, 2023, pp. 73 [in Russian].
18. Ma R., Wang G., Tian Y., Wang K., Zhang J. and Fang J., Hazard. Mater. **300**, 643 (2015).
19. Xu Y., Tian Y., Ma R., Liu Q. and Zhang J., Food Chem. **197**, 436 (2016).
20. Dospechov B. A., Methodology of field experience, Moscow, Argopromizdat, 1985 [in Russian].
21. Zemtsova E. S. and Bome N. A., Vestnik of the Kazan State Agrarian University, № 2(62), 23 (2021) [in Russian].
22. Znilkin A. A. and Tywtyiima N. V., Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Ekologiya i bezopasnost', № 8, 94 (2003) [in Russian].
23. Kostin V. I., Mudarisov F. A. and Krivova A. I., Herald of Russian Academy of Natural Sciences **14** (6), 54 (2014) [in Russian].
24. Pavlov A. N., Increase in protein content in grain, Moscow, Nauka, 1984 [in Russian].
25. Zavalin A. A. and Sokolov O. A., Fertility, № 1, 17 (2018) [in Russian].