

СТИМУЛЯЦИЯ РОСТА РАСТЕНИЙ ВОДНЫМ РАСТВОРОМ, АКТИВИРОВАННЫМ ПЛАЗМОЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

© 2020 г. 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*

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

**Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, 119334, Москва, ул. Косыгина, 4

E-mail: ser79841825@yandex

Поступила в редакцию 21.11.2019 г.

После доработки 10.12.2019 г.

Принята к публикации 25.12.2019 г.

Представлены результаты применения водных, слабо концентрированных растворов сильных электролитов, активированных плазмой тлеющего разряда, для стимуляции роста растений. Получено экспериментальное подтверждение возможности использования подобных растворов в качестве эффективного регулятора роста растений.

Ключевые слова: плазма, активация, растения, регулятора роста, пероксид водорода, водный раствор.

DOI: 10.31857/S0006302920020155

Земли России, пригодные для возделывания сельскохозяйственных культур, в большей части относятся к зонам рискованного земледелия. Остается актуальным поиск и создание антистрессовых регуляторов роста с определенными свойствами, нужными для использования их в практике сельского хозяйства, а именно: экологическая безопасность, растворимость в воде, малые количества для достижения нужного эффекта, невысокая стоимость, возможность получения препарата на месте его применения [1–3].

Таковыми свойствами обладают водные растворы пероксида водорода. Об уникальной роли пероксида водорода в процессе фотосинтеза, синтеза крахмала и хлорофилла, о его свойстве регулировать рост и развитие растений сообщалось в работах [1, 4, 5]. Было показано и защищено рядом патентов, что допосевная обработка семян и внекорневая обработка зеленых растений растворами пероксида водорода в определенных концентрациях, повышают устойчивость и сохранность сельскохозяйственных растений в жестких условиях дефицита влаги, заморозков, засоления грунтов [4–7].

Целью данной работы является экспериментальная оценка влияния водных растворов, активированных высокочастотной плазмой тлеющего разряда, на скорость прорастания семян сельскохозяйственных растений.

Сокращение: АПВ – активированный плазмой водный раствор.

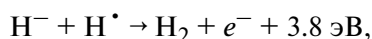
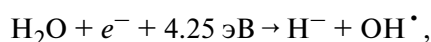
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Получение эффективных регуляторов роста, содержащих пероксид водорода, возможно с помощью воздействия на слабоконцентрированные водные растворы сильных электролитов низкотемпературной плазмой тлеющего разряда в водяных парах при атмосферном давлении [8, 9]. В нашем случае в качестве электролита использовали водный раствор K_2SO_4 в концентрации $5.7 \cdot 10^{-2}$ М либо водный раствор NaCl в концентрации 0.17 М. Горение плазмы в объеме водного раствора (электролита) осуществляли при помощи платинового активного электрода толщиной 0.3 мм и длиной 15 мм, погруженного в раствор. В качестве второго (нейтрального) электрода использовали графитовую пластину размером 20×60 мм², также погруженную в емкость с раствором. Активный и нейтральный электроды подключали к высокочастотному генератору, работающему на частоте 110 кГц при амплитудном значении напряжения до 300 В [10]. Уровень мощности, подводимой к активному электроду, выбирали из условия образования на его поверхности парогазового слоя, полностью покрывающего электрод. В результате возникновения высокоомного парогазового слоя падение напряжения происходит на этом слое, что приводит к возникновению в его объеме высокочастотного плазменного разряда тлеющего типа [8, 10]. Плазмообразующим газом в данном случае является водяной пар. Для выбранной концентрации электролита и размеров

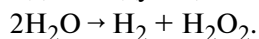
Таблица 1. Зависимость концентрации пероксида водорода от времени хранения АПВ

Число суток	3	5	7	9
Концентрация пероксида водорода, М	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$

активного электрода мощность, обеспечивающая поджиг и горение плазмы, составляла около 150 Вт. В результате горения плазмы в водяном паре протекают плазмохимические реакции, среди которых основными являются реакции разложения воды по механизму диссоциативного прилипания [11]:



где М – молекула (ион) в газовой подсистеме плазмы. Как видно из приведенных выше реакций, пероксид водорода образуется в результате гетерогенной рекомбинации радикалов OH^\bullet с участием молекулы (иона) М [10]. При этом на одну молекулу выделившегося водорода синтезируется одна молекула пероксида водорода. Общее уравнение выглядит следующим образом:



Здесь пероксид водорода H_2O_2 является основным устойчивым окислителем, генерируемым в водном электролите под действием плазмы тлеющего разряда в парах воды и находящейся в контакте с раствором. Заметим, что использование проводящего ток электролита обусловлено необходимостью замыкания электрической цепи, состоящей из генератора высокочастотного тока, активного металлического электрода, плазмы тлеющего разряда, жидкостного электролитного электрода и нейтрального электрода. Кроме пероксида водорода в водном растворе под действием высокочастотной плазмы могут образовываться и другие активные компоненты, такие как водород и активный кислород [12], появляющиеся вследствие полного разложения молекул воды, а также ионы металлов, образующиеся в процессе электрохимической эрозии электродов.

Эмиссионный спектр излучения плазмы исследовался с помощью спектрофотометра FSD-10 (ООО «Научно технический центр волоконно-оптических устройств», Москва, Россия) с волоконнооптическим вводом излучения и регулируемым временем накопления спектра. При этом наблюдение велось на сильных линиях излучения водорода (656 нм), натрия (589 нм), калия (768 нм), а также полосы гидроксидов (306 нм). Наличие линий атома водорода и радикала OH^\bullet указывает на молекулярный распад воды на ак-

тивные составляющие, чем и обусловлена высокая химическая активность плазмы.

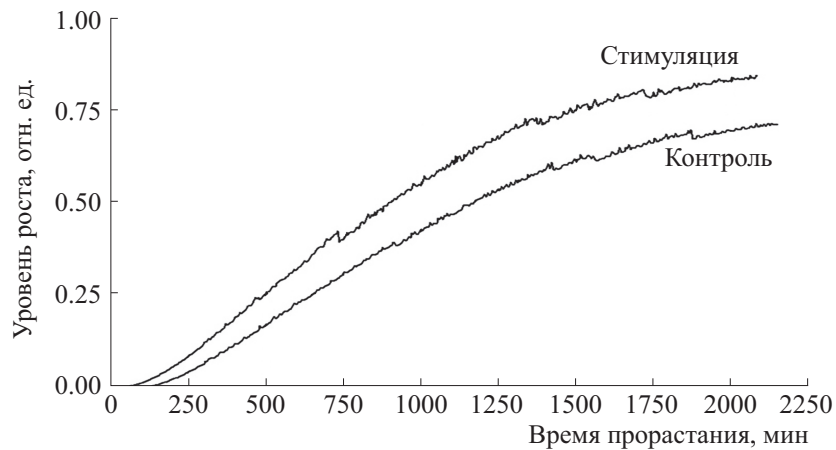
Известно, что активированный плазмой водный раствор (далее АПВ), содержащий пероксид водорода, влияет на метаболизм растительных систем, ускоряя фотосинтез и регулируя процессы роста и развития растений [12]. Избыток H_2O_2 может вызвать окислительный стресс, повреждающий растительную клетку и тем самым ингибирующий процессы роста. В данной работе концентрацию пероксида водорода в растворе АПВ измеряли йодометрическим способом [13, 14], она составляла порядка $5 \cdot 10^{-4}$ М. Кислотность получаемой АПВ составляла 5.8–6.6 и оценивалась с помощью портативного рН-метра Testo 205 (Testo SE & Co. KGaA, Германия). Заметим, что пероксид водорода является основным претендентом на объяснение эффекта стимуляции роста растений [12], вследствие чего наличие других компонентов, появляющихся в результате плазменной активации воды, в данной работе не анализировалось. Исходя из этого, концентрацию пероксида водорода рассматривали как маркер степени разведения исходной АПВ при оценке стимуляции роста растений. Оценка стабильности раствора АПВ по концентрации пероксида водорода при его хранении в темном помещении и температуре 20°C показывает, что АПВ остается достаточно стабильным в течение девяти суток. Зависимость концентрации пероксида водорода от времени хранения АПВ представлена в табл. 1.

Изучение действия АПВ на рост растений для подтверждения возможности его универсального использования в практике сельского хозяйства проводили на значимых сельскохозяйственных культурах, принадлежащих к разным семействам.

Тест-объектами были выбраны следующие растения: сорго Черное (семейство злаковых), редис сорта «18 дней» (семейство крестоцветных), сафлор сорта «Заволжский» (семейство астровых), клубневые черенки картофеля (семейство пасленовых), огурцы сортов «Конкурент» и «Дальневосточный» с пониженной всхожестью (семейство тыквенных).

Эффективность воздействия растворов АПВ на рост растений оценивали на ранних стадиях их роста при помощи ряда морфологических тестов. При этом учитывали:

1. Количество проросших семян (проросшими считали семена с длиной корня 1–2 мм).



Динамика увеличения суммарной площади корневой системы в контроле и в опыте с использованием АПВ.

2. Срок перехода и количество растений к очередной фазе развития — первый сформированный лист.

3. Развитие корневой системы.

4. Количество жизнеспособных растений.

В качестве контрольных брали растения, обработанные водой или растворами коммерческой перекиси водорода. Опытными образцами служили растения, обработанные растворами АПВ. Сравнение эффективности действия растворов коммерческой перекиси водорода и АПВ проводили на растворах с одинаковой концентрацией пероксида водорода. Семена замачивали в чашках Петри, помещали в термостат при 20°C и каждые 12 ч отмечали количество проросших семян. Проросшие семена высевали в культуральные сосуды с песком, увлажненным опытным или контрольным растворами. Сосуды помещали в люминистат с ритмом освещения свет/темнота 12/12 ч. На седьмые сутки опыта измеряли высоту растений, развитие корневой системы, количество сформировавшихся растений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример 1. С целью установления влияния активации водного раствора АПВ на основе K_2SO_4 на ростовые процессы растений были проведены эксперименты по проращиванию семян сорго. Для измерения скорости прорастания исходные семена делили на две группы и замачивали в течение двух часов в водном растворе K_2SO_4 с концентрацией $5.7 \cdot 10^{-2}$ М. В одной группе раствор K_2SO_4 не подвергался воздействию плазмы, а в другой — проходил плазменную активацию с образованием пероксида водорода с концентрацией $1 \cdot 10^{-6}$ М. Из каждой группы семян случайным образом делали выборку объемом 100 семян. Ото-

бранные семена раскладывали в квадратную чашку Петри, состоящую из 100 ячеек (одно семя на ячейку). Грунт для посадки состоял из слоя промытого песка толщиной порядка 5 мм. Грунт в двух контейнерах смачивали обычным и активированным раствором соответственно. Для ограничения роста корешка в вертикальной плоскости семена дополнительно прижимали покровным стеклом толщиной 3 мм. С помощью цифровой камеры, расположенной перпендикулярно плоскости чашки с семенами, каждые 20 мин делали снимок. Дальнейшая обработка фотографий в среде MathCad позволяла определить эффективную суммарную длину корешков. Динамика увеличения суммарной длины корневой системы для контрольного посева и посева с использованием АПВ, усредненная по количеству проросших семян, приведена на рисунке.

Расчет скорости нарастания корневой массы на начальной стадии показывает, что для семян, прошедших активацию, скорость прорастания на 30% выше, чем для контроля.

Пример 2. Специально отобранные семена огурца (сорт «Дальневосточный» с пониженной всхожестью) проращивали в растворах АПВ, коммерческой перекиси водорода и в воде. На третьи сутки (оптимальный срок для культуры огурца) проводили учет количества проросших семян. Наибольший эффект (95% проросших семян) наблюдали при стимуляции семян раствором АПВ с концентрацией пероксида водорода $1 \cdot 10^{-6}$ М. При использовании коммерческой перекиси водорода в тех же условиях (при аналогичных концентрациях) эффект стимуляции был существенно слабее, что скорее всего связано с наличием в растворе стабилизаторов пероксида водорода. Раствор АПВ с концентрацией пероксида водорода $1 \cdot 10^{-4}$ М, наоборот, тормозил прорастание семян. Сравнение эффективности стимуляции

Таблица 2. Эффективность стимуляции растворов АПВ, коммерческой перекиси водорода и воды

Концентрация пероксида водорода, М	Количество проросших семян, %		
	АПВ	Пероксид водорода	Контроль (вода)
$1 \cdot 10^{-4}$	32 ± 3	38 ± 3	40 ± 2
$1 \cdot 10^{-5}$	70 ± 2	60 ± 2	
$1 \cdot 10^{-6}$	90 ± 2	68 ± 2	
$1 \cdot 10^{-6}$	95 ± 2	68 ± 2	
$1 \cdot 10^{-7}$	90 ± 3	55 ± 3	

растворов АПВ, коммерческой перекиси водорода и воды приведено в табл. 2.

Пример 3. Опытные и контрольные семена сафлора после замачивания в течение четырех часов в соответствующих растворах (контроль — вода, опыт — раствор АПВ с концентрацией пероксида водорода $6 \cdot 10^{-7}$ М) высаживали в культуральные сосуды с песком, увлажненным теми же растворами. На седьмые сутки после появления всходов в люминистате проведен учет количества растений с первым раскрытым листом. В опыте с раствором АПВ количество растений с раскрытым листом составляло 40%, в контроле — около 16%; средняя высота растений: в опыте АПВ — 6.5 см, в контроле — 4.5 см.

Пример 4. Семена редиса после замачивания в растворе с АПВ и в воде высевали в сосуды с песком, который увлажняли раствором АПВ с концентрацией пероксида $6 \cdot 10^{-5}$ М и $6 \cdot 10^{-7}$ М. Сосуды помещали в люминистат. На седьмые сутки был проведен учет количества растений в стадии полностью раскрытых семядольных листьев. Стимуляцию роста растений наблюдали вплоть до концентрации пероксида водорода $6 \cdot 10^{-7}$ М. Количество сформировавшихся растений составило 65%. Раствор АПВ с концентрацией пероксида водорода $6 \cdot 10^{-3}$ М угнетал ростовые процессы (количество сформировавшихся растений составило не более 20%). Доля сформировавшихся растений в контрольной группе не превышала 40%.

Пример 5. Семена огурца (сорт «Конкурент») замачивали в чашках Петри. Использовали растворы коммерческой перекиси водорода (контроль) с концентрацией пероксида водорода $5 \cdot 10^{-7}$ М и АПВ (опыт) с той же концентрацией пероксида водорода. Через 72 ч в опыте количество проросших семян составило 92% (с длиной корня 8–9 мм — более 80%). В контроле проросло 65% семян, а количество семян с длиной корня 8–9 мм составило 50%.

Пример 6. Из пророщенных клубней картофеля вырезали клубневые черенки и после подсушивания в течение четырех часов высаживали в сосуды с песком, которые увлажняли водой (контроль) и растворами АПВ (опыт) с концентрацией пероксида водорода $5 \cdot 10^{-5}$ М и $1 \cdot 10^{-6}$ М, и помещали в люминистат. Через восемь суток оценивали количество жизнеспособных черенков и степень развития корневой системы. В контроле выжило 50% растений, в опыте — 100%. Хорошо развитая корневая система наблюдалась в опыте у 30% черенков, а в контроле — не более чем у 10% черенков.

ВЫВОДЫ

1. Вода, активированная плазмой высокочастотного тлеющего разряда, является регулятором роста растений.
2. Состав и способ получения активированной плазмой воды позволяет считать ее экологически чистой и безопасной.
3. Выбор оптимальной концентрации активированной плазмой воды при обработке объектов растительного происхождения (в том числе сельскохозяйственных растений) позволит повысить их урожайность.
4. Активированная плазмой вода сохраняет свои свойства в течение времени, которое позволяет использовать ее в качестве готового препарата, как в защищенном, так и в открытом грунте.
5. Исходя из оценки биологической активности раствора по наличию в нем пероксида водорода и возможности сохранения его в течение достаточно длительного времени, раствор АПВ может быть отнесен к эффективным регуляторам роста растений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в Институте общей физики им. М.В. Прохорова РАН при частичной финансовой поддержке Научно-исследовательского

проекта «Физические методы в сельском хозяйстве и экологии» (№ 0024-2019-0004).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания каких-либо исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. Г. Комиссаров, *Фотосинтез: физико-химический подход* (УРСС, М., 2003).
2. М. М. Наумов, Т. В. Зими́на, Е. И. Хрюкина и Т. А. Рябчинская, *Агрoхимия* **5**, 21 (2019).
3. Ю. С. Корзинников, *Вестн. РАСХН* **2**, 44 (1997).
4. Л. М. Апашева и Г. Г. Комиссаров, *Изв. РАН, сер. биол.* **5**, 621 (1996).
5. G. A. Velikanov, T. A. Sibgatullin, L. P. Belova, and I. F. Ionenko, *Protoplasma* **2** (52), 1263 (2015).
6. А. В. Лобанов, Н. А. Рубцова и Г. Г. Комиссаров. *Докл. РАН. Химия* **421** (6), 773 (2008).
7. K. Takaki, J. Takahata, S. Watanabe, et al., *J. Phys. Conf. Ser.* **418**, 012140 (2013).
8. Н. В. Бабу́рин, С. В. Белов, Ю. К. Данилейко и др., *Докл. РАН. Физика* **426** (4), 468 (2009).
9. С. В. Белов, Ю. К. Данилейко и др. *Мед. техника* **2**, 26 (2011).
10. M. Ashurov, S. Belov, Yu. Danyleiko, et al., *IOP Conf. Series: Earth Environm. Sci.* **390**, 012028 (2019).
11. В. Д. Русанов, А. Л. Фри́дман и Г. В. Шолин, *Успехи физ. наук* **134** (2), 185 (1981).
12. Т. М. Васильева, *Тонкие химические технологии* **10** (2), 5 (2015).
13. Патент РФ: RU 2142707/ A01N 59/00, 20.12.1999 (1999).
14. Патент РФ: 2172099, A01G, 1/00, A01N. 59/00, A01C, 1/00, 20.08.2001 (2001).

Stimulation of Plant Growth with Aqueous Solution Activated by Glow Discharge Plasma

S.V. Belov*, L.M. Apasheva**, Yu.K. Danileiko*, A.B. Egorov*, A.V. Lobanov**, V.I. Lukanin*, E.N. Ovcharenko*, V.V. Savransky*, and L.G. Shilin*

*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, Moscow, 119991 Russia

**Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 119334 Russia

This paper presents the results of application of weakly concentrated aqueous solutions of strong electrolytes activated by glow discharge plasma for plant growth stimulation. We provide experimental evidence that these solutions can be used as an effective regulator of plant growth.

Keywords: plasma, activation, plants, growth regulator, hydrogen peroxide, aqueous solution