

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ XI МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ “ХИМИЯ НЕФТИ И ГАЗА”

УДК 533.924;57.033

ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОГЕНЕЗА И ПРОДУКТИВНОСТИ *LACTUCA SATIVA* L.
ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКОЙ СЕМЯН
ПЛАЗМОЙ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

© 2021 г. А. С. Минич^а, И. Б. Минич^а, Н. Л. Чурсина^а, А. Е. Иваницкий^{а, *}, А. Н. Очередько^б

^аФГБОУ ВО “Томский государственный педагогический университет”, Томск, Россия

^бФГБУН “Институт химии нефти СО РАН”, просп. Академический, 4, Томск, 634055 Россия

*E-mail: aleiv@tspu.edu.ru

Поступила в редакцию 23.12.2020 г.

После доработки 30.12.2020 г.

Принята к публикации 10.01.2021 г.

Проведено исследование влияния предпосевной обработки семян *Lactuca sativa* L. сорта “Лолло Бионда” плазмой барьерного разряда в воздушной среде на качество семян, морфогенез и продуктивность, выращенных из них растений. Показано, что обработка плазмой семян *Lactuca sativa* в течение 10 и 15 с является оптимальной по времени, так как энергия прорастания опытных семян относительно контроля увеличивается на 11–23%, лабораторная всхожесть – на 1–2%.

Ключевые слова: *Lactuca sativa*, предпосевная обработка, всхожесть и энергия прорастания семян, морфогенез, продуктивность, плазма барьерного разряда

DOI: 10.31857/S0023119321030086

ВВЕДЕНИЕ

Одним из возможных экологически чистых направлений улучшения предпосевных качеств семян, повышения интенсивности морфогенеза и продуктивности растений является предпосевная обработка семян различными физическими методами, в том числе плазмой, создаваемой диэлектрическим барьерным разрядом [1, 2].

Результаты исследований показывают, что влияние предпосевной обработки семян различных видов растений плазмой барьерного разряда происходит как за счет модификации семенной поверхности [3, 4], так и за счет проникновения активных частиц плазмы (электронов, радикалов, ионов, в частности, атомарного кислорода и гидроксил радикала) через пористый семенной слой внутрь семени [3]. При этом изменяется морфология семенных слоев и транспортные свойства клеточных плазматических мембран, за счет чего у семян улучшается смачиваемость поверхности и усиливается поглощение влаги [1, 2, 4, 5]. Проникшие внутрь семени активные частицы реагируют с семенными клетками, нарушают состояние покоя, стимулируя активное использование запасов семени и изменяя ферментативную активность и гормональный баланс [1–6]. В итоге предпосевная обработка семян плазмой может способствовать более раннему прорастанию и повышению всхожести семян, интенсивному росту

и увеличению продуктивности растений [1–6]. Изменение посевных качеств семян и морфогенеза растений может быть обусловлено дезинфекцией семян за счет удаления с их поверхности микробных слоев и микотоксинов [7, 8], а также продолжительность обработки семян плазмой, видовая и сортовая принадлежность растений [1, 3, 5, 6].

Среди зеленных культур, занимающих особое место среди овощей по содержанию кальция, магния, железа, и широко возделываемой как в светокультуре, так в открытом и защищенном грунтах, является *Lactuca sativa* L. Практическое ее использование ориентировано на раннюю стадию развития растений (фаза технической спелости), поэтому ускоренное формирование розетки листьев и увеличение биомассы является важным параметром продуктивности. Ранее показано, что плазменная обработка семян оказывает положительное влияние на качество семян, их прорастание и ростовые параметры растений. Однако в настоящее время в литературе отсутствуют сведения о влиянии на семена *Lactuca sativa* L. плазменной предпосевной обработки.

Целью данной работы явилось изучение влияния предпосевной обработки семян *Lactuca sativa* L. плазмой барьерного разряда в воздушной среде на их качество, морфогенез и продуктивность выращенных из них растений.

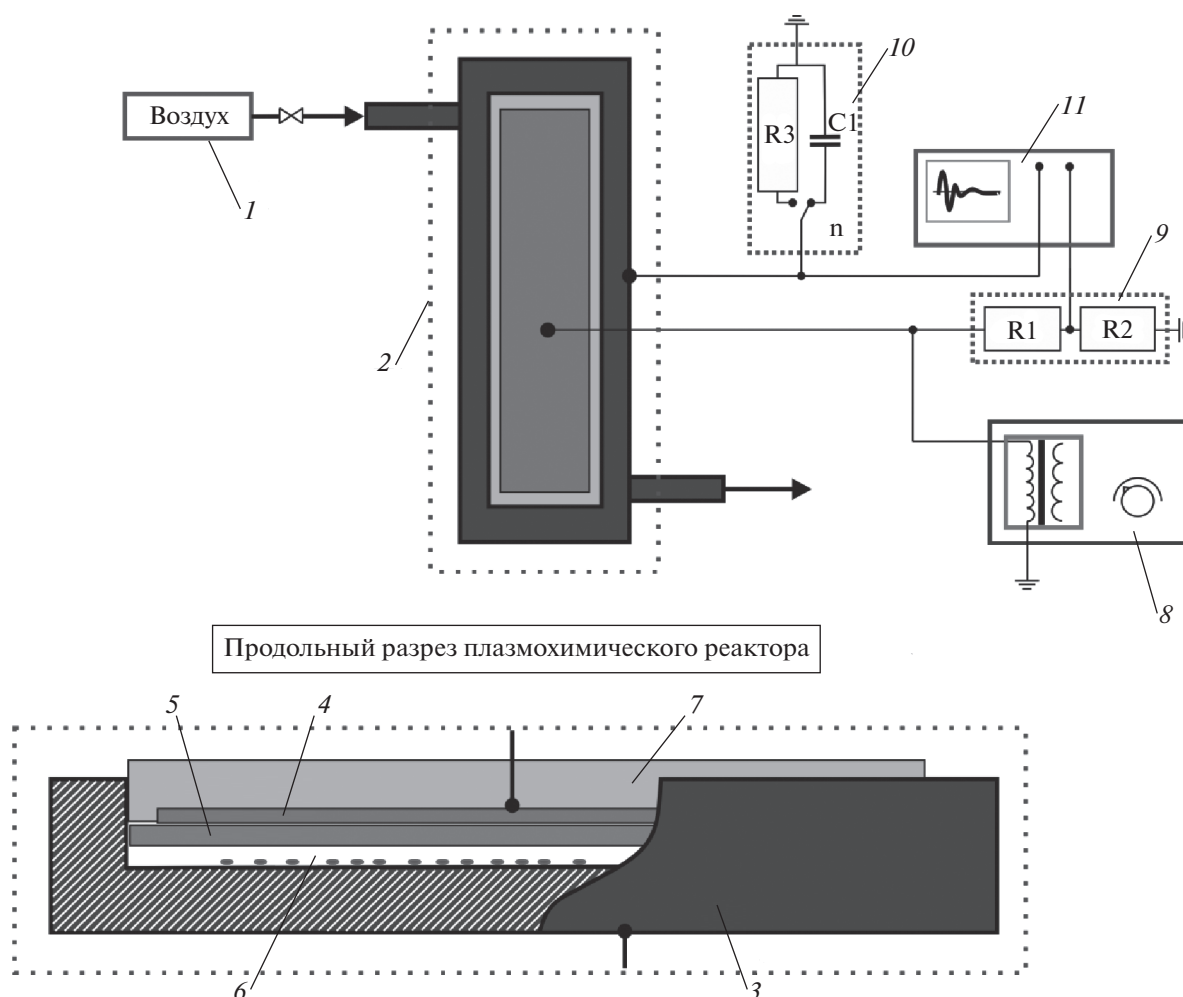


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки и продольное сечение реактора: (1) поток воздуха, (2) плазмохимический реактор (вид сверху), (3) разрядный промежуток, (4) основание реактора – заземленный электрод, (5) высоковольтный электрод, (6) диэлектрический барьер, (7) уплотнитель, (8) высоковольтный генератор, (9) делитель напряжения ($R1 = 1 \text{ m}\Omega$, $R2 = 1 \text{ k}\Omega$), (10) емкостной ($C = 300 \text{ nF}$) и токовый ($R3 = 1 \Omega$) шунты, (11) цифровой осциллограф.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являлся *Lactuca sativa* L. “Лолло Бионда”, выращиваемый в светокультуре.

Экспериментальная установка для обработки семян плазмой барьерного разряда показана на рис. 1. Воздух (1) через кран тонкой регулировки скорости потока газа попадает в плазмохимический реактор (2), где в пространстве между электродами (3) с помощью генератора высоковольтных импульсов возбуждается барьерный разряд и формируется плазма. Реактор имеет один диэлектрический барьер и характеризуется планарным расположением электродов, расстояние между которыми составляет 2 мм, а площадь каждого из них – 48 см². Заземленным электродом реактора служит основание, выполненное из латуни (4). Высоковольтный электрод выполнен из медной фольги (5), приклеенной к поверхности диэлек-

трика (6) из стеклотекстолита толщиной 2 мм, и фиксируется уплотнителем (7). Барьерный разряд инициируется высоковольтными импульсами напряжения, управляемыми генератором (8). Осциллограммы импульсов регистрировались с использованием делителя напряжения (9), емкостных и токовых шунтов (10) на 2-канальном цифровом осциллографе Tektronix TDS 380 (Tektronix, США) (11), и представлены на рис. 2.

Максимальная амплитуда высоковольтных импульсов напряжения составляла ~9 кВ, а частота их повторения равнялась 2 кГц. Рассчитанная активная мощность плазмы барьерного разряда при данных параметрах реактора соответствовала ~7 Вт и вычислялась по формуле:

$$W = f \times E, \quad (1)$$

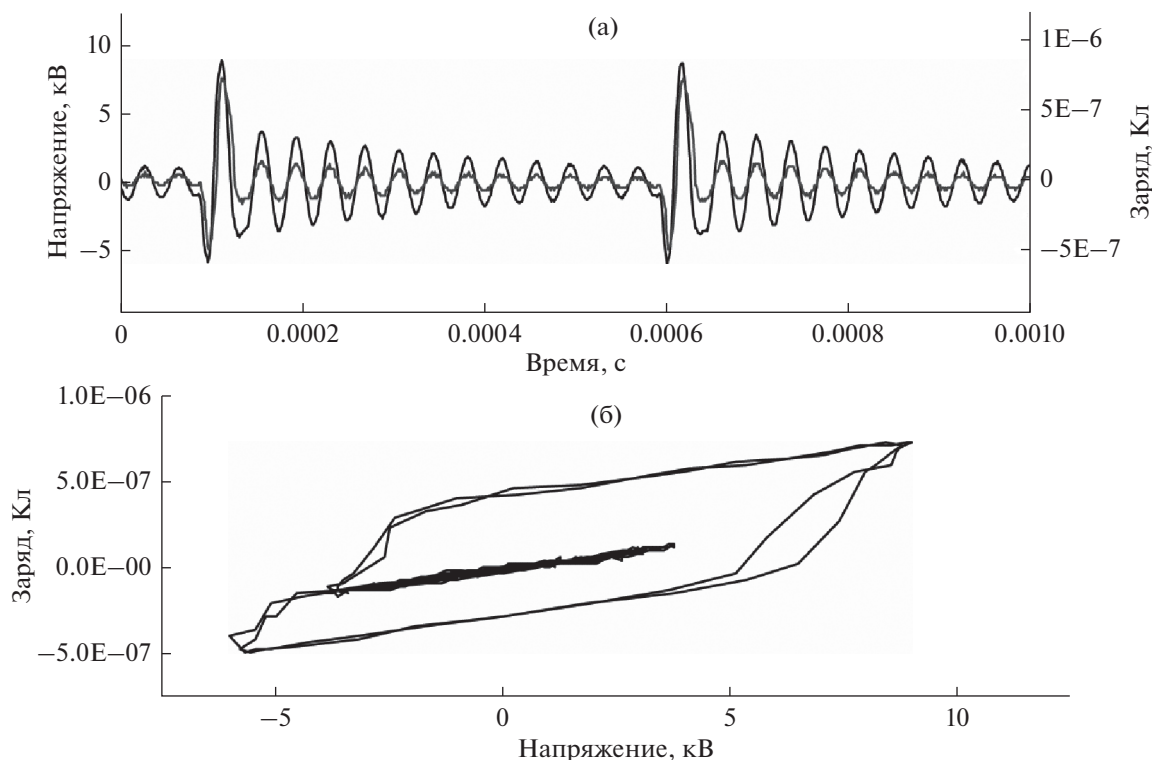


Рис. 2. Осциллограммы высоковольтных импульсов напряжения (а) и вольт-кулоновская характеристика (б) барьерного разряда.

где f – частота повторения импульсов напряжения (Гц), E – энергия (Дж) одного импульса напряжения, рассчитанная из вольт-кулоновской характеристики (рис. 2).

Во всех экспериментах расход воздуха на входе в реактор составлял ~200 мл/мин, температура реактора была постоянной и равнялась 25°C.

Разрядный промежуток между электродами объемом 9.6 см³ служит для закладки семян. Семена предварительно не подготавливались и равномерно располагались в разрядной зоне реактора, занимая в среднем 2/3 от площади разрядной зоны. После воздействия электрическим разрядом семена находились на воздухе и дополнительной обработке не подвергались.

Оценка посевных качеств семян (энергии прорастания и лабораторной всхожести) проводилась в лабораторных условиях на перлите [9]. Растения выращивались из семян в светокультуре до технической спелости (35 суток) в почве, состоящей из равных количеств чернозема, перегноя и торфа. Семена *Lactuca sativa* L. высевались в контейнерах с дренажными отверстиями. Источником излучения служили лампы ДНаЗ-150 (ООО “Рефлак”, Россия). Интенсивность светового потока составляла 120 Вт/м², фотопериод – 16 ч, температура воздуха – 24°C.

В качестве контроля использовались необработанные плазмой семена и растения, выращенные из них. Опытные семена подвергались предпосевной обработке плазмой в течение 5, 10, 15 и 25 с. Выбор продолжительности воздействия сделан произвольно на основании анализа литературных данных, показывающих, что время обработки семян плазмой должно определяться толщиной семенной кожуры и ее проницаемостью [2, 3].

В динамике проводились измерения длины главного корня семян, определялись число и площадь поверхности листьев, сырая и сухая биомасса растений.

Длина главного корня семени измерялась цифровым штангенциркулем Digital Caliper 0-150 mm (Manufactures & Suppliers, China).

Для определения сырой массы и массы сухого вещества растения вынимались из почвы, корневая система промывалась водой, лишняя влага удалялась фильтровальной бумагой. Для определения массы сухого вещества растения высушивались в сушильном шкафу при температуре 103–105°C до постоянного веса. Взвешивание проводилось на электронных аналитических весах Acculab ALC-210d4 (Acculab, USA).

Для определения площади поверхности листьев растений использовалась программа по определению площади сложных фигур “AreaS” (Самарская

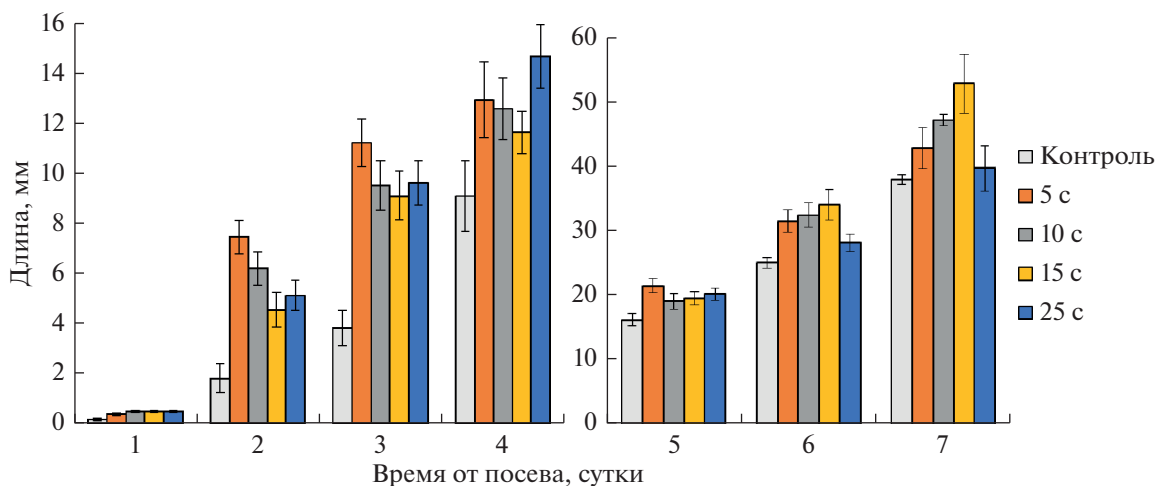


Рис. 3. Динамика длины главного корня семян *Lactuca sativa* L. “Лолло Бионда”, необработанных (контроль) и обработанных плазмой барьерного разряда.

государственная сельскохозяйственная академия, Россия). Работа программы основана на сканировании двух фигур, площадь, одной из которых известна (шаблон), их сравнением с последующим расчетом площади исследуемой фигуры. Погрешность определения площади не превышает 0.001%.

Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений определялось на спектрофотометре UV-VIS spectrophotometer Shimadzu UV-2600 (Shimadzu Corporation, Japan) с последующим расчетом по формуле Хольма–Веттштейна для ацетонных вытяжек [10].

Оценка достоверности результатов исследований проводилась при 95% уровне надежности (уровень значимости – 0.05). На рисунках приведены средние арифметические значения с двухсторонним доверительным интервалом из трех независимых экспериментов, каждый из которых проведен в трех биологических повторностях на 40 растениях.

За результат анализа лабораторной всхожести и энергии прорастания принимались среднееарифметические значения данных анализа четырех проб по 100 семян в каждой при допустимом расхождении результатов, указанных в ГОСТ 12038-84 [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воздействие плазмы на семена в течение 5, 10 и 15 с способствовало повышению их лабораторной всхожести на 1–2%, а увеличение времени обработки до 25 с приводило к ее угнетению.

Однако энергия прорастания всех опытных семян *Lactuca sativa* L. относительно контроля была выше на величину от 11 до 23%, причем определенной зависимости величины изменений от длительности их обработки плазмой не выявлено.

Удлинение главного корня у опытных семян относительно контроля происходило более интенсивно, скорость роста определялась продолжительностью обработки семян плазмой (рис. 3).

Полученный результат указывает на улучшение посевных качеств семян *Lactuca sativa* L. при их обработке плазмой барьерного разряда. В соответствии с литературными данными, это может быть связано с модифицированием поверхности семенной оболочки под воздействием плазмы, что приводит к увеличению смачиваемости семян, водной проницаемости и поглощения ими воды [1, 4, 6]. Кроме того, в семени изменяется уровень гормонального баланса и ферментативной активности, что вызывает положительные метаболические последствия за счет активного использования запасов семени [1, 4, 6].

Также показано, что увеличение экспозиции плазмой может приводить как к повышению, так и к уменьшению ростовой активности семян из-за передозировки активным кислородом и азотом, образующимися под воздействием плазмы и выполняющих важную функцию в регуляции эндогенных гормонов на стадии прорастания семян и в начале развития растений [1, 3]. Увеличение времени обработки семян до 25 с, вероятно, приводит не только к модифицированию семенной поверхности, но и к частичному ее разрушению [6]. Это способствует как еще большему поступлению влаги внутрь семени, так и активации протекания биохимических процессов, что уменьшает период индукции ответных ростовых реакций. Снижение ростовых реакций у опытных семян с самой короткой (5 с) и самой длинной (25 с) плазменной обработкой на 5–7 сутки связано с интенсивным расходом запасов семени в начальный период.

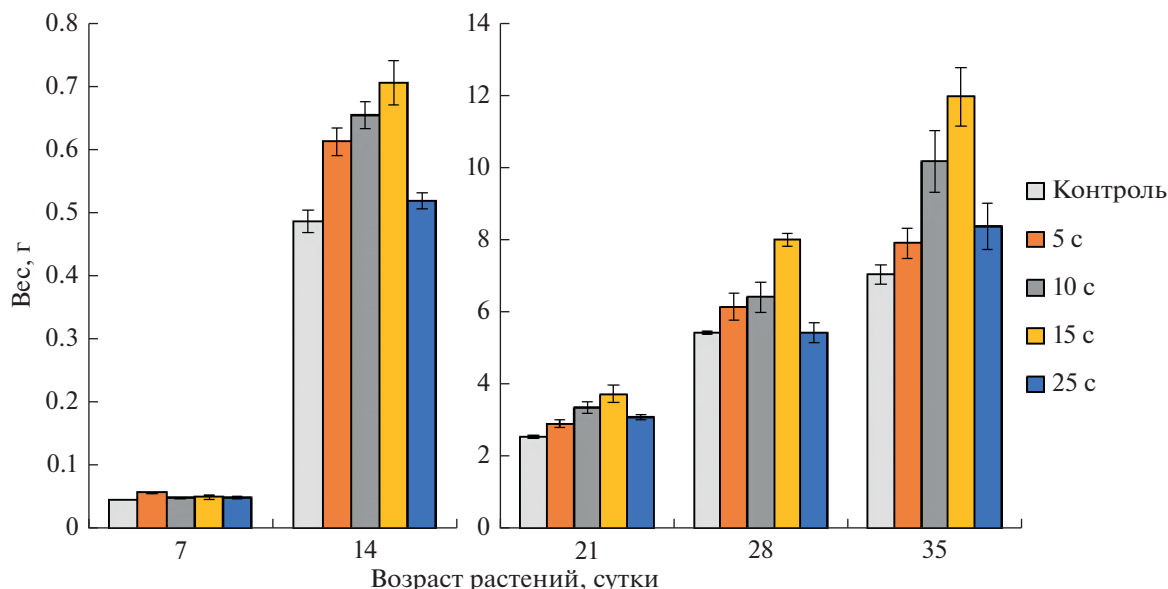


Рис. 4. Динамика сырой массы надземной части *Lactuca sativa* L. “Лолло Бионда”, необработанных (контроль) и обработанных плазмой барьерного разряда.

В дальнейшем вплоть до достижения технической спелости более активное формирование ассимилирующей поверхности и корневой системы отмечалось у растений, культивируемых из семян с 10 и 15-секундной обработкой, что с середины онтогенеза было связано с более высоким содержанием фотосинтетических пигментов в листьях. Аналогичные данные были получены при исследовании влияния плазмы на арахис, результаты которых показали стимулирование роста растений путем увеличения содержания хлорофилла [11].

Выявили постоянное увеличение накопления биомассы у всех опытных растений относительно контроля (рис. 4), при этом формирование новых листовых пластинок в опыте происходило менее активно по сравнению с ростом и развитием ранее сформированных. Это указывает на то, что активное развитие надземной части опытных растений происходило как за счет интенсивного роста образовавшихся ранее листьев, так и формирования новых листовых пластинок. Увеличение сырой и сухой биомассы опытных растений было сопряжено с развитием их ассимилирующей поверхности и корневой системы.

В момент ликвидации относительно контроля в опыте у растений, выращенных из обработанных плазмой в течение 5, 10, 15 и 25 с семян, были больше площадь поверхности листьев на 21, 61, 65 и 24%, сырая масса надземной части на 12, 45, 70 и 19%, сырая масса на 38, 85, 96 и 28% соответственно. Однако масса сухого вещества достоверно не различалась у контрольных и у опытных растений с 5 и 25-секундной обработкой семян, т.е. на данный момент онтогенеза, вероятно, про-

исходит дезактивация биохимических процессов в растениях, на что дополнительно указывает снижение уровня фотосинтетических пигментов.

Таким образом, растения, выращенные из семян, обработанных плазмой в течение 10 и 15 с, характеризовались интенсивным ростом, развитием и повышенной продуктивностью относительно других опытных и контрольных растений. В ходе всего периода вегетации между контролем и данными опытными растениями эти различия только нарастали. Такой результат может быть связан с тем, что при 10 и 15-секундной обработке происходит проникновение в семя оптимального количества активных частиц, а также УФ-излучения и озона из плазмы разряда [1, 2, 12, 13]. Это приводит к положительному сдвигу некоторых метаболических и биосинтетических процессов, а также сигнальных путей [3–6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показывают, что предпосевная обработка семян *Lactuca sativa* L. “Лолло Бионда” плазмой барьерного разряда способствует улучшению ростовых процессов и повышению продуктивности выращенных из них растений. Оптимальным временем обработки плазмой семян, позволяющим запустить более активную программу морфогенеза, является 10 и 15 с в данных условиях при активной мощности разряда ~7 Вт.

Опытные семена и растения отличаются от контрольных по нескольким параметрам: всхожесть обработанных семян увеличивается на 1–2%; энергия прорастания таких семян повы-

шается на 11–16%; увеличивается в 2–2.5 раза длина осевых органов опытных проростков; активируется рост и развитие вегетативных органов надземной и корневой системы опытных растений, что приводит к увеличению общей сырой биомассы на 60–80%; с середины вегетации наблюдается повышенное содержание на 12–25% фотосинтетических пигментов в листьях опытных растений.

Результаты наших исследований показывают, что экологически чистая технология предпосевной обработки семян *Lactuca sativa* L. плазмой барьерного разряда может применяться в сельском хозяйстве для улучшения их посевных качеств и повышения продуктивности растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stolárik T., Henselová M., Martinka M., Novák O., Zahoranová A., Černák M.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. V. 35(4). P. 659.
2. *Randeniya L.K., de Groot G.J.J.B.* // Plasma Processes Polym. 2015. V. 12(7). P. 608.
3. *Šerá B., Špatenka P., Šerý M., Vrchotová N., Hrušková I.* // IEEE Transactions on Plasma Sci. V. 38. № 10. 2010. P. 2963.
4. *Tong J., He R., Zhang X., Han R., Chen W., Yang S.* // Plasma Sci. Technol. 2014. V. 16. № 3. P. 260.
5. *Henselová M., Slováková L., Martinka M., Zahoranová A.* // Biologia. 2012. V. 67. № 3. P. 490.
6. *Park Y., Oh K.S., Oh J., Seok D.C., Kim S.B., Yoo S.J., Lee M.-J.* // Plasma Process Polym. 2016. 1–8.
7. *Marcović D., Borcean I.* // Res. J. Agric. Sci. 2009. V. 41. № 3. P. 96.
8. *Bosch L., Pfohl K., Avramidis G., Wieneke S., Viöl W., Karlovsky P.* // Toxins. 2017. V. 9. № 3. P. 97.
9. ГОСТ 12038-84. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2011. 64 с.
10. *Tchoupakhina G.N., Maslennikov P.V., Skrypnik L.N., Besserezhnova M.I.* // Tomsk State University Journal of Biology. 2012. № 2(18). P. 171.
11. *Li L., Li J., Shen M., Hou J., Shao H., Dong Y., Jiang J.* // Plasma Sci. Technol. 2016. V. 18. № 10. P. 1027.
12. *Sarinont T., Amano T., Koga K., Shiratani M., Hayashi N.* // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2015. V. 1723.
13. *Ehlbeck J., Schnabel U., Polak M., Winter J., Von Woedike Th., Brandenburg R., Von Dem Hagen T., Weltmann K.-D.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. № 1. P. 13002.