

Научная статья

УДК 631.53.027.3:635.64:633.11

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-87-96>



Сравнение действия озона и постоянного электрического поля на морфофизиологические характеристики проростков томата (*Solanum lycopersicum* L.) и пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

Вадим Николаевич Нурминский*, Александр Вадимович Лазукин**,
Светлана Вячеславовна Гундарева**, Алексей Сергеевич Столбиков*,***,
Анастасия Валерьевна Третьякова***

*Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация

**НИУ «Московский энергетический институт», г. Москва, Российская Федерация

***Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Нурминский Вадим Николаевич, vadyanurm@mail.ru

Аннотация. Целью работы являлось изучение влияния озона и постоянного электрического поля на морфофизиологические характеристики проростков томата и пшеницы с целью создания эффективной и экологически безопасной технологии повышения ростового потенциала семян сельскохозяйственных культур. Обработку семян томата (*Solanum lycopersicum* L.) сорта Вентура и мягкой озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Иркутская проводили в течение 15 и 30 мин: при воздействии озона в дозах 1, 3 и 5 г/м³ и электрического поля при напряженности 1,6 и 2 кВ/см. Как озон, так и постоянное электрическое поле расширяют разброс данных по длине побега и корня, а также изменяют энергию прорастания семян. Выявлено, что в зависимости от концентрации озона и степени воздействия электрическим полем влияние обработки семян может быть как положительным, так и отрицательным. Лучший режим при озонировании семян томата достигался при обработке озоном в концентрации 5 г/м³ в течение 15 мин. Оптимальный режим воздействия электрического поля на семена томата – 1,6 кВ/см в течение 15 мин. Обнаружено, что пшеница реагирует на обработку не так интенсивно, как томат. В случае обработки семян пшеницы более предпочтительным является озонирование, обеспечивающее стимуляцию прорастания уже при воздействии 1 г/м³ озона продолжительностью 15 мин. Результаты экспериментов также показывают, что даже небольшие изменения режима воздействия как при выдержке в электрическом поле, так и при озонировании могут привести к повреждению семян, выраженному не только в ингибировании развития, но и в снижении энергии прорастания семян.

Ключевые слова: семена, проростки, озон, электрическое поле, морфофизиологические характеристики, предпосевная обработка

Благодарности. Авторы выражают благодарность О. И. Грабельных, д.б.н., заведующей лабораторией физиологической генетики Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН, за оказание методической помощи.

Работа выполнена с использованием коллекции ЦКП «Биоресурсный центр» Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН.

Финансирование. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-76-10019 (разработка систем электрофизической обработки, подбор концентрации и доз обработки).

Для цитирования: Нурминский В. Н., Лазукин А. В., Гундарева С. В., Столбиков А. С., Третьякова А. В. Сравнение действия озона и постоянного электрического поля на морфофизиологические характеристики проростков томата (*Solanum lycopersicum* L.) и пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 87–96. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-87-96>.

Original article

Comparison of the effect produced by ozone and constant electric field on the morphophysiological characteristics of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings

Vadim N. Nurminsky*, Alexander V. Lazukin**, Svetlana V. Gundareva**, Alexey S. Stolbikov*,***, Anastasia V. Tretyakova***

*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

**National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

***Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Corresponding author: Vadim N. Nurminsky, vadyanurm@mail.ru

Abstract. This study investigated the effect of ozone and constant electric field on the morphological and physiological characteristics of tomato and wheat seedlings with the purpose of creating an effective and environmentally friendly technology for increasing the growth potential of crop seeds. Seeds of cv. Ventura tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and cv. Irkutskaya soft winter wheat (*Triticum aestivum* L.) were exposed to ozone concentrations of 1, 3, and 5 g/m³ and electric field strengths of 1.6 and 2 kV/cm. The exposure time was 15 and 30 min. Both ozone and constant electric field were found to expand the spread of data on the shoot and root length, as well as alter the energy of seed germination. Depending on ozone concentrations and electric field strengths, the effect of seed treatment was established to be both positive and negative. The most optimal mode for ozonization of tomato seeds was achieved at an ozone concentration of 5 g/m³ for 15 minutes. The optimal mode for treating tomato seeds by electric field was achieved at an electric field strength of 1.6 kV/cm for 15 min. Wheat was determined to respond to treatment not as intensively as tomato. When treating wheat seeds, ozonization is a more preferable method, since it stimulates germination even at an ozone concentration of 1 g/m³ for 15 minutes. However, our experimental results showed that even small changes in the mode of exposure both to ozonization and electric field can result in seed damage, thereby inhibiting the development of plants and decreasing the seed germination energy.

Keywords: seeds, seedlings, ozone, electric field, morphophysiological characteristics, presowing treatment

Acknowledgements. The authors are grateful to O. I. Grabelnykh, Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Physiological Genetics, Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, for providing methodological assistance.

The work was carried out using the collection of the Central Collective Use "Bioresource Center" of the Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences.

Funding. The work was partially supported by the Russian Science Foundation, grant no. 18-76-10019 (development of electrophysical treatment systems, choosing concentration and treatment doses).

For citation: Nurminsky V. N., Lazukin A. V., Gundareva S. V., Stolbikov A. S., Tretyakova A. V. Comparison of the effect produced by ozone and constant electric field on the morphophysiological characteristics of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):87-96. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-87-96>.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование высокого урожая культурных растений зависит от качества посадочного материала. Состояние семян влияет на дружность всходов, устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессовым факторам и учитывается при расчете нормы посева [1, 2]. Даже при условии выполнения необходимых агротехнических рекомендаций (обеспечение надлежащего севооборота, своевременная уборка урожая и

послеуборочных отходов, соблюдение сроков внесения и концентраций химических средств защиты растений) качество используемого посевного материала часто оказывается невысоким. Кроме того, в биотехнологии существует ряд технологических приемов, снижающих всхожесть семян. Например, применение агентов для стерилизации поверхности семян, а также процесс трансформации [3].

Проблема повышения качества семян реша-

ется путем применения методов предпосевной подготовки, которые подразделяются на химические, биологические и электрофизические. Группа электрофизических методов в последнее время привлекает значительное внимание исследователей, поскольку данные методы экологически безопасны и просты в исполнении. Под электрофизическими методами предпосевной подготовки понимается обработка семян электрическим разрядом, электрическими и магнитными полями, в том числе статическими, облучением волнами различной длины (лазеры, ультрафиолет и т.д.), электроозонирование [4, 5]. Воздействие постоянного электрического поля и озона входит в число наиболее простых методов обработки растений, так как при этом эффективность полностью определяется экспозицией и геометрией электродной системы, обстоятельствами положения семян в ней, направлением поля и его напряженностью [6]. При электроозонировании эффективность воздействия определяется экспозицией и концентрацией озона в протоке воздуха [7].

В настоящее время предполагается, что электрофизические виды обработки создают кратковременный стресс в семенах, который выражается в повышении уровня активных форм кислорода (АФК) [8], запускающих активацию каскада защитных программ растительной клетки. Озон и другие АФК, образующиеся в низкотемпературной плазме (НТП), могут влиять на метаболизм растений, вызывая окислительное повреждение. Защитные механизмы растений от окислительного стресса включают активацию антиоксидантных ферментов [9, 10]. Есть работы, авторы которых исследовали влияние НТП-обработки на активность ферментов, деактивирующих АФК, включая супероксиддисмутазу, пероксидазу и каталазу [11]. Были обнаружены некоторые изменения в уровнях экспрессии генов, кодирующих эти ферменты в растениях, выращенных из семян, подвергшихся воздействию НТП, и такие изменения зависели от возраста проростков и времени воздействия. Однако не совсем ясно, является ли индуцированный НТП окислительный стресс причиной этих изменений, поскольку более высокая метаболическая активность обработанных плазмой семян также может генерировать АФК и тем самым вызывать изменение содержания антиоксидантных ферментов. Также исследованы изменения в уровнях эндогенных гормонов (ауксина и цитокинина) в семенах при воздействии плазмы. Обнаружено, что они коррелировали с усиленным ростом семян [12]. Было высказано предположение, что НТП-обработка семян влияет на биохимические процессы, происходящие внутри проростков. Однако подробности подобного влияния до сих пор не исследованы. Механизм стимуляции семян, обработанных НТП, основанный на антиоксидант-

ной активности проростков, предложен также в работе [13] на основании измерения концентраций соединений с сульфгидрильными группами в тканях проростков и их связи с динамикой роста растений [14]. В результате воздействия НТП наблюдается также интенсификация различных метаболических процессов, в том числе синтеза хлорофилла, который напрямую связан с обеспечением качества и количества получаемого урожая. Накопление хлорофилла, морфофизиологические характеристики проростков и качественно-количественные характеристики урожая исследовались, например, авторами работы [15]. Было установлено, что между этими показателями существует прямая связь. Таким образом, с учетом проведенных к настоящему времени исследований для оценки эффективности метода на первом этапе исследований можно использовать относительно простые и информативные биометрические методы анализа морфометрических показателей проростков. Растения различных видов отвечают на электрофизическую обработку семян неодинаково [16], различается их реакция на интенсивность воздействия и дозу экспозиции, в том числе и по сортам.

В обзоре [17] обобщены результаты газоразрядной обработки семян, которая считается наиболее многофакторной среди других электрофизических методов и сочетает в себе воздействия электрического поля и озона. Так, в работе [18] сравнивается 6 культур, включая пшеницу и томат, по ответу на газоразрядную обработку. Пшеница часто выбирается объектом исследований подобной направленности, поскольку эта культура – космополит, и во многих странах является основой продуктовой безопасности наряду с другими злаками. Из пасленовых культур в мировом сельском хозяйстве большой популярностью пользуются томаты благодаря высокой урожайности плодов, обилию питательных веществ в них, в том числе витаминов, необходимых в рационе питания. Также томаты уже много лет используются в биотехнологии для производства фармацевтических препаратов [19].

В настоящем исследовании проведено сравнение действия озона и постоянного электрического поля на морфофизиологические характеристики проростков пшеницы и томата с целью создания эффективной и экологически безопасной технологии для повышения ростового потенциала семян данных сельскохозяйственных культур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментов по исследованию влияния озона и постоянного электрического поля на всхожесть и прорастание семян томатов (*Solanum lycopersicum* L.) сорта Вентура (урожай 2018 г.) и мягкой озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Иркутская (урожай 2019 г.) проводили обработку

семян в течение 15 и 30 мин: при воздействии озона – в дозах 1, 3 и 5 г/м³ (при обработке семян томата), в дозах 1, 2 и 3 г/м³ (при обработке семян пшеницы), и электрического поля – при напряженности 1,6 и 2 кВ/см. Все эксперименты выполнялись в течение 2019–2020 гг.

Озонирование семян проводилось в слабом протоке влажного воздуха. Озон синтезировался в реакторе поверхностного разряда, концентрация озона в протоке воздуха поддерживалась постоянной. Обработка постоянным электрическим полем проводилась в электродной системе из двух параллельных алюминиевых пластин: на пластине, находящейся под положительным напряжением, раскладывались семена в один слой, вторая пластина заземлена. Расстояние между пластинами – 3 см (рис. 1).

Обработанные семена проращивали в индивидуальных контейнерах в темноте на двух слоях фильтровальной бумаги, увлажненной дистиллированной водой, при температуре 20 °С: томаты – в течение 5 сут., пшеница – в течение 3 сут. Энергию прорастания культур определяли

в соответствии с ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». В конце эксперимента измеряли длину побегов, индивидуальных корней и рассчитывали энергию прорастания.

Эксперимент проводили в трех биологических повторностях, в каждом варианте брали 75–100 семян.

Статистическая обработка данных была проведена с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни с применением программы SigmaPlot v.12.5. На гистограммах приведено распределение значений длины побега и корня, энергия прорастания семян (G), медиана длины побега (Me_n) и корня (Me_k).

Энергию прорастания G определяли как:

$$G = N_g / N_t \times 100,$$

где N_g – количество проросших семян, шт.; N_t – общее количество семян, шт.

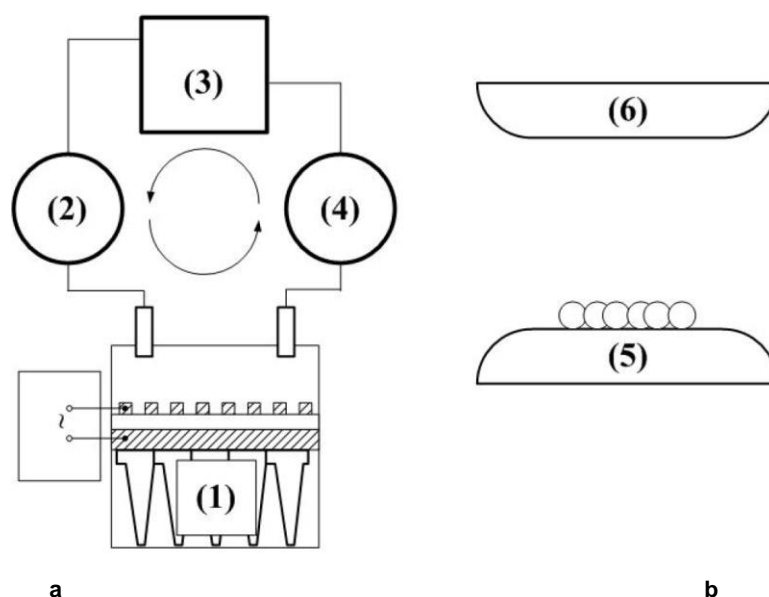


Рис. 1. Схема обработки семян: а – озонирование; б – постоянное электрическое поле;
1 – озонатор поверхностного разряда; 2 – измеритель концентрации озона;
3 – емкость с пробой; 4 – перистальтический насос;
5 – электрод под положительным высоким напряжением; 6 – заземленный электрод

Fig. 1. Scheme of seed treatment: a – ozonation; b – constant electric field;
1 – surface discharge ozonizer; 2 – tester of ozone concentration; 3 – sample container;
4 – peristaltic pump; 5 – electrode under positive high voltage; 6 – grounded electrode

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В наших экспериментах обработка семян как озоном, так и постоянным электрическим полем влияла на энергию прорастания и морфометрические показатели проростков томата (рис. 2). При воздействии озоном характер распределения проростков по длине побега и корня заметно менялся, с увеличением концентрации озона разброс дан-

ных по длине побега и корня возрастал.

Отмечено, что уже в концентрации 1 г/м³ озон существенно влиял на длину корня проростков, увеличивая ее почти в 2 раза, что особенно хорошо видно на гистограммах распределения (рис. 2, б). Максимальное удлинение побега и корня происходило в вариантах воздействия 5 г/м³ озона в течение 15 мин и электрического

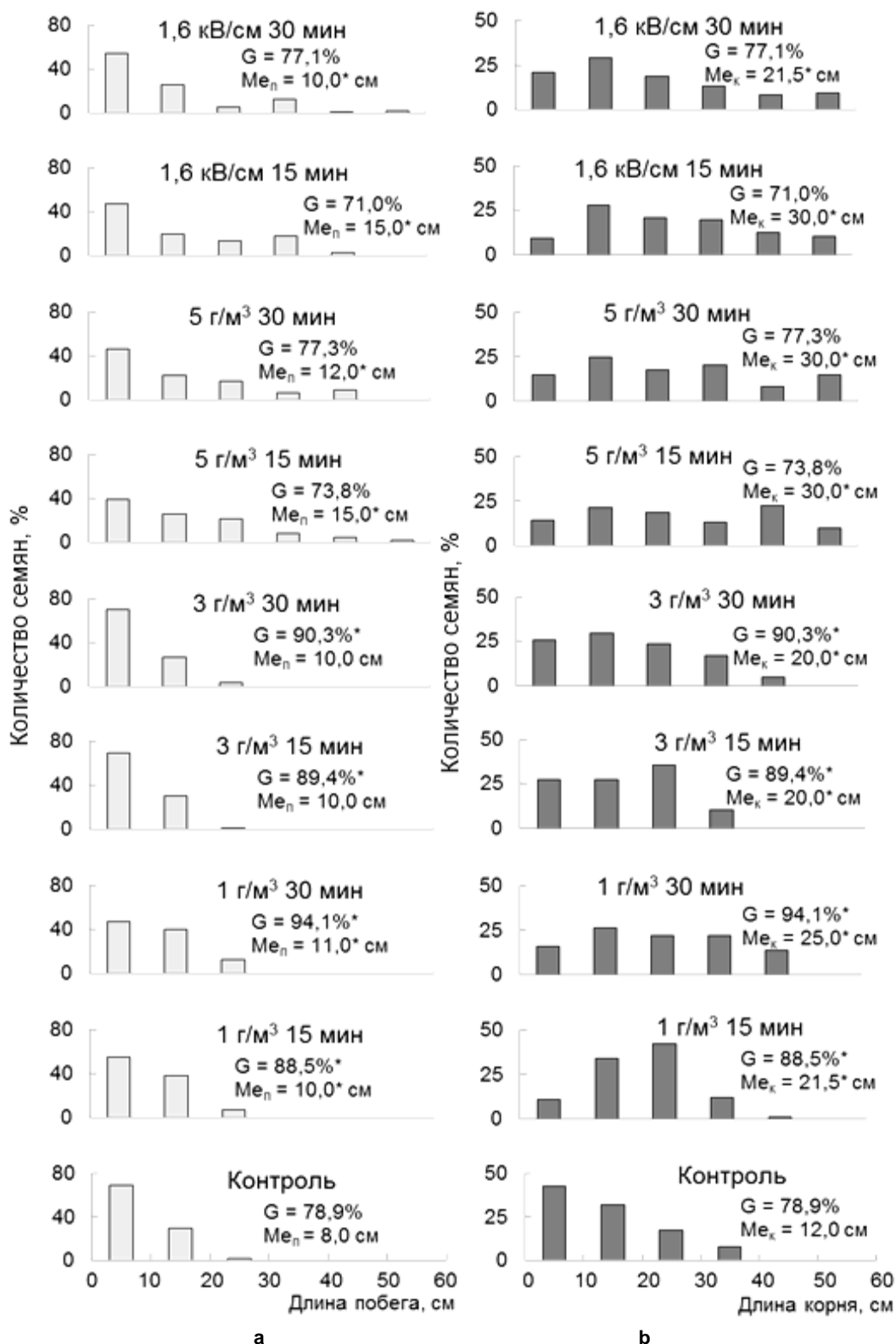


Рис. 2. Распределение растений томата в зависимости от длины побега (а) и корня (б) после обработки семян озонem и электрическим полем. G – энергия прорастания семян, %; Me_n и Me_k – медианы длины побега и корня соответственно, см.* – достоверные отличия от контроля (тест Манна – Уитни, p < 0,05)

Fig. 2. Distribution of tomato plants depending on the length of (a) shoots and (b) roots after treatment with ozone and electric field. G – germination energy of seeds, %; Me_{sh} and Me_r are the medians of shoot and root length respectively, cm.* – significant differences from control (Mann – Whitney test, p < 0.05)

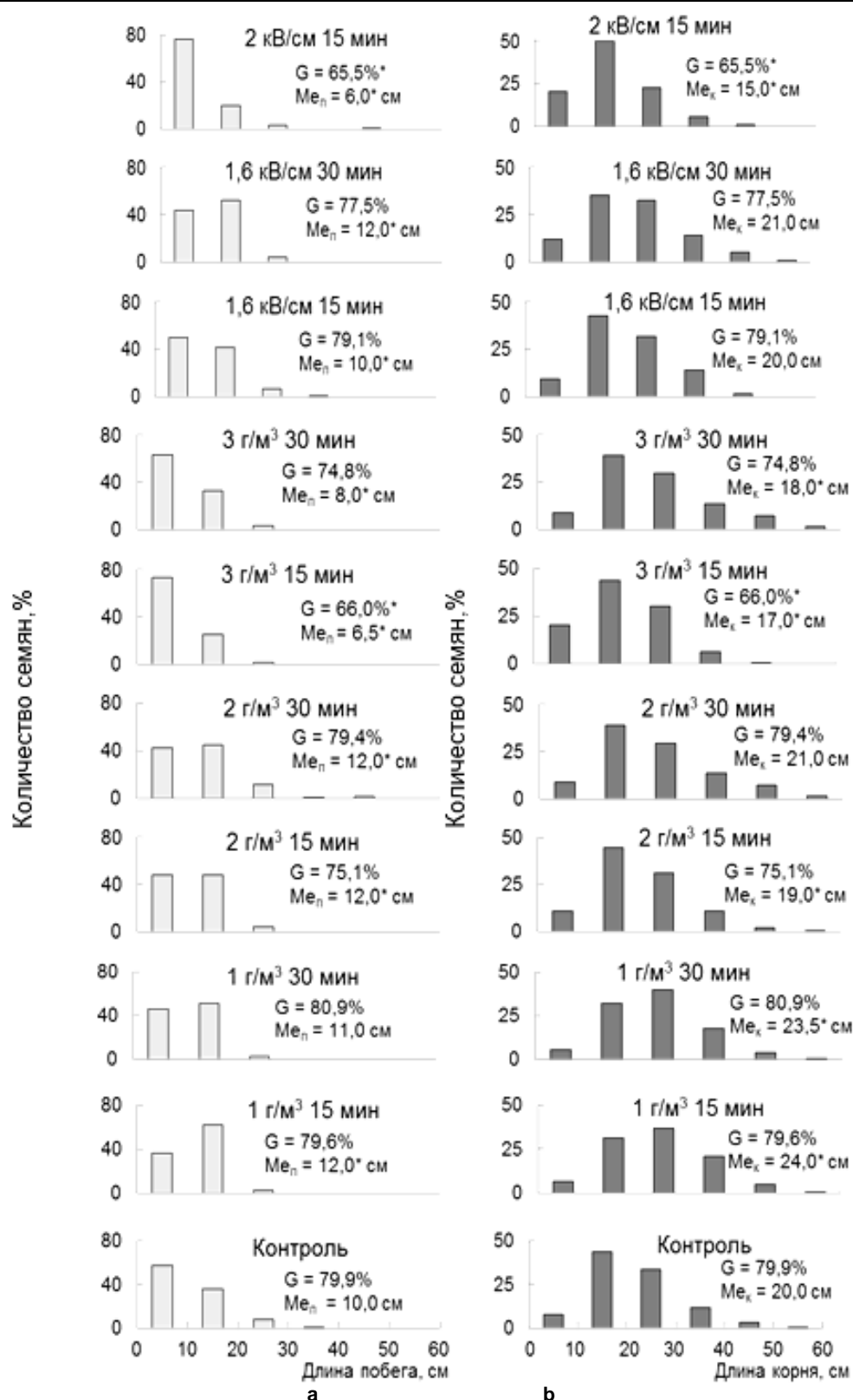


Рис. 3. Распределение растений пшеницы в зависимости от длины побега (а) и корня (б) после обработки семян озонem и электрическим полем.

G – энергия прорастания семян, %; Me_n и Me_k – медианы длины побега и корня соответственно, см.* – достоверные отличия от контроля (тест Манна – Уитни, p<0,05)

Fig. 3. Distribution of wheat plants depending on the length of (a) shoots and (b) roots after treatment with ozone and electric field.

G – germination energy of seeds, %; Me_n and Me_k are the medians of shoot and root length respectively, cm.* – significant differences from control (Mann – Whitney test, p<0.05)

поля напряжением 1,6 кВ/см также в течение 15 мин. Энергия прорастания семян томата при воздействии озона 1 и 3 г/м³ достоверно повышалась, особенно сильно при концентрации озона 1 г/м³ в течение 30 мин. Эффект электрического поля 1,6 кВ/см на прорастание семян томатов был схож с вариантом 5 г/м³ озона.

Подобные результаты ускорения прорастания были получены при обработке семян томата низкотемпературной плазмой в течение 5 мин: средняя длина корня увеличивалась почти в 3 раза, побега – в 1,65 раза [20]. В нашем случае лучший режим озонирования достигался при сочетании 15-минутной экспозиции и дозы озона 5 г/м³: средняя длина корня возрастала в 2,5 раза, побега – в 1,9. Оптимальный режим воздействия электрического поля (15 мин и 1,6 кВ/см) обеспечивал аналогичное возрастание побега и корня (см. рис. 2). Полученные результаты указывают на то, что электрофизическая обработка, несмотря на различия методов, работает однотипно, и эффективность ответа во многом определяется реакцией семени, что справедливо, по крайней мере, на семенах томатов.

Озон и электрическое поле также оказывали эффект на прорастание семян пшеницы (см. рис. 3). При действии озона в концентрации 1 г/м³ увеличивалась длина побега и корня по сравнению с контролем. Результаты экспериментов показали, что 15-минутной обработки было достаточно для повышения анализируемых показателей, увеличение времени воздействия до 30 мин не оказывало усиления эффекта. В варианте концентрации озона 2 г/м³ длина побега также была больше, чем в контроле, однако в этом случае достоверного увеличения длины корня зафиксировано не было, наоборот, отмечалось небольшое его уменьшение при обработке в течение 15 мин (см. рис. 3, а). При этом наблюдалась тенденция к снижению энергии прорастания семян, которая в этом варианте обработки снизилась почти на 5%. Значимое снижение энергии прорастания наблюдалось в варианте обработки 3 г/м³ озона 15 мин. Рост побега и корня также заметно отставал от контрольных значений при увеличении концентрации озона.

Воздействие электрическим полем 1,6 кВ/см увеличивало длину побега проростков пшеницы, не влияя на длину корня. Однако увеличение

напряженности до 2 кВ/см приводило к существенному уменьшению длины побега и корня в сравнении с контролем и к снижению всхожести (см. рис. 3, б). Пшеница реагировала на обработку не так интенсивно, как томат. Результаты показывают, что даже небольшие изменения режима воздействия как при выдержке в электрическом поле, так и при озонировании могут привести к повреждению семян, выраженному не только в значимом ингибировании развития, но и в тенденции к снижению энергии прорастания. В случае обработки семян пшеницы более предпочтительным является озонирование, обеспечивающее стимуляцию уже при дозе озона 1 г/м³ и воздействии в течение 15 мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выявлено, что как озон, так и постоянное электрическое поле в рассмотренных режимах влияют на морфофизиологические характеристики проростков томата и пшеницы, расширяя разброс данных по длине побега и корня и изменяя энергию прорастания. В зависимости от концентрации озона и степени воздействия электрическим полем влияние обработки семян может быть как положительным, так и отрицательным. Наибольший положительный эффект был отмечен при обработке семян томатов озоном в концентрации 5 г/м³ в течение 15 мин и электрическим полем 1,6 кВ/см в течение 15 мин (в каждом из режимов равнозначное увеличение длины корней проростков в 2,5 раза, побегов – в 1,9 раза от показателей контроля), а семян пшеницы – озоном в концентрации 1–2 г/м³ (увеличение длины корней и побегов в 1,2 раза от контроля).

Полученные результаты позволяют рассматривать обработку посадочного материала озоном и постоянным электрическим полем как технологию, обеспечивающую повышение качественных характеристик прорастания растений томата и пшеницы. Эффект от обработки семян томатов озоном и электрическим полем сравним с эффектом, вызываемым низкотемпературной плазмой газового разряда [20], однако, на наш взгляд, техника применения озона и электрического поля более проста в использовании и лучше подходит для дальнейшего внедрения в сельскохозяйственную практику.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тихонова О. С., Фатыхов И. Ш. Влияние нормы высева семян на качество зерна озимых зерновых культур в Среднем Предуралье // Вестник Башкирского государственного аграрно-университета. 2012. N 4 (24). С. 14–16.
2. Торопова Е. Ю., Захаров А. Ф. Предпосевная подготовка семян яровой пшеницы в условиях ресурсосберегающих технологий // Защита и карантин растений. 2017. N 3. С. 28–31.
3. Khadeeva N. V., Yakovleva E. Yu., Sydoruk K. V.,

- Korostyleva T. V., Istomina E. A., Dunaevsky Ya. E., et al. Molecular genetic analysis of collection of transgenic tobacco plants with buckwheat serine proteases inhibitor gene during long-term subculture // Russian Journal of Genetics. 2017. Vol. 53, no. 11. P. 1200–1210. <https://doi.org/10.1134/S1022795417110047>.
4. Aladjadiyan A. Physical factors for plant growth stimulation improve food quality. In: A. Aladjadiyan (ed.). Food production – approaches, challenges and tasks. Chapter 9. Rijeka: In Tech Publish-

ing, 2012. P. 145–168. <https://doi.org/10.5772/32039>.

5. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 86. P. 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>.

6. Krivov S. A., Lazukin A. V., Serdyukov Y. A., Gundareva S. V., Romanov G. A. Effect of constant high-voltage electric field on wheat seed germination // *IOP SciNotes*. 2020. Vol. 1, no. 2. P. 024002. <https://doi.org/10.1088/2633-1357/aba1f6>.

7. Avdeeva V., Zorina E., Bezgina J., Kolosova O. Influence of ozone on germination and germinating energy of winter wheat seeds // *Engineering for Rural Development: 17th International Scientific Conference*. 23–25 May 2018, Jelgava, Latvia. 2018. P. 543–546. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N128>.

8. Hayashi N., Ono R., Nakano R., Shiratani M., Tashiro K., Kuhara S., et al. DNA microarray analysis of plant seeds irradiated by active oxygen species in oxygen plasma // *Plasma Medicine*. 2016. Vol. 6, no. 3-4. P. 459–471. <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2016018933>.

9. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends in Plant Science*. 2002. Vol. 7, no. 9. P. 405–410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9).

10. Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2010. Vol. 48, no. 12. P. 909–930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>.

11. Henselová M., Slováková L., Martinka M., Zahoranová A. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma // *Biologia*. 2012. Vol. 67, no. 3. P. 490–497. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0046-5>.

12. Stolárik T., Henselová M., Martinka M., Novák O., Zahoranová A., Černák M. Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.) // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015. Vol. 35, no. 4. P. 659–676. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8>.

1. Tikhonova O. S., Fatykhov I. Sh. Of grain of winter grain crops on the average preduralye influence of norm of seeding of seeds on quality. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2012;4:14-16. (In Russian).

2. Toropova E. Yu., Zakharov A. F. Pre-sowing treatment of seeds of spring wheat under the conditions of resource-saving. *Zashchita i karantin rastenii = Plant protection and quarantine*. 2017;3:28-31. (In Russian).

3. Khadeeva N. V., Yakovleva E. Yu., Sydoruk K. V., Korostyleva T. V., Istomina E. A., Dunaevsky Ya. E., et al. Molecular genetic analysis of collection of trans-

13. Hayashi N., Ono R., Shiratani M., Yonesu A. Antioxidative activity and growth regulation of Brassicaceae induced by oxygen radical irradiation // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 54, no. 6. Article number 06GD01. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.06GD01>.

14. Los A., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P. J., Bourke P. Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics // *Plasma Processes and Polymers*. 2019. Vol. 16, no. 4. Article number 1800148. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800148>.

15. Roy N. C., Hasan M. M., Kabir A. H., Reza M. A., Talukder M. R., Chowdhury A. N. Atmospheric pressure gliding arc discharge plasma treatments for improving germination, growth and yield of wheat // *Plasma Science and Technology*. 2018. Vol. 20, no. 11. Article number 115501. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aac647>.

16. Bourke P., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P. J., Keener K. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production // *Trends in Biotechnology*. 2018. Vol. 36, no. 6. P. 615–626. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001>.

17. Šerá B., Šerý M. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains // *Plasma Science and Technology*. 2018. Vol. 20, no. 4. Article number 044012. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaacc6>.

18. Liu B., Honnorat B., Yang H., Arancibia J., Rajjou L., Rousseau A. Non-thermal DBD plasma array on seed germination of different plant species // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018. Vol. 52, no. 2. Article number 025401. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae771>.

19. Van Eck J., Kirk D. D., Walmsley A. M. Tomato (*Lycopersicon esculentum*) // *Methods in Molecular Biology book series*. 2006. Vol. 343. P. 459–473. <https://doi:10.1385/1-59745-130-4:459>.

20. Măgureanu M., Sîrbu R., Dobrin D., Gîdea M. Stimulation of the germination and early growth of tomato seeds by non-thermal plasma // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2018. Vol. 38. P. 989–1001. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9916-0>.

REFERENCES

genic tobacco plants with buckwheat serine proteases inhibitor gene during long-term subculture. *Russian Journal of Genetics*. 2017;53(11):1200-1210. <https://doi.org/10.1134/S1022795417110047>.

4. Aladjadjiyan A. Physical factors for plant growth stimulation improve food quality. In: A. Aladjadjiyan (ed.). *Food production – approaches, challenges and tasks*. Chapter 9. Rijeka: In Tech Publishing, 2012. p. 145-168. <https://doi.org/10.5772/32039>.

5. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;86:95-108. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>.

6. Krivov S. A., Lazukin A. V., Serdyukov Y. A., Gundareva S. V., Romanov G. A. Effect of constant high-voltage electric field on wheat seed germination. *IOP SciNotes*. 2020;1(2):024002. <https://doi.org/10.1088/2633-1357/aba1f6>.
7. Avdeeva V., Zorina E., Bezgina J., Kolosova O. Influence of ozone on germination and germinating energy of winter wheat seeds. In: *Engineering for Rural Development: Proceedings of 17th International Scientific Conference*, 23–25 May 2018, Jelgava, Latvia. 2018, p. 543-546. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N128>.
8. Hayashi N., Ono R., Nakano R., Shiratani M., Tashiro K., Kuhara S., et al. DNA microarray analysis of plant seeds irradiated by active oxygen species in oxygen plasma. *Plasma Medicine*. 2016;6(3-4):459-471. <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2016018933>.
9. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*. 2002;7(9):405-410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9).
10. Gill S. S., Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2010;48(12):909-930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>.
11. Henselová M., Slovákova L., Martinka M., Zahoranová A. Growth, anatomy and enzyme activity changes in maize roots induced by treatment of seeds with low-temperature plasma. *Biologia*. 2012;67(3):490-497. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0046-5>.
12. Stolárik T., Henselová M., Martinka M., Novák O., Zahoranová A., Černák M. Effect of low-temperature plasma on the structure of seeds, growth and metabolism of endogenous phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2015;35(4):659-676. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8>.
13. Hayashi N., Ono R., Shiratani M., Yonesu A. Antioxidative activity and growth regulation of Brassicaceae induced by oxygen radical irradiation. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2015;54(6). Article number 06GD01. <https://doi.org/10.7567/JJAP.54.06GD01>.
14. Los A., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P. J., Bourke P. Investigation of mechanisms involved in germination enhancement of wheat (*Triticum aestivum*) by cold plasma: Effects on seed surface chemistry and characteristics. *Plasma Processes and Polymers*. 2019;16(4). Article number 1800148. <https://doi.org/10.1002/ppap.201800148>.
15. Roy N. C., Hasan M. M., Kabir A. H., Reza M. A., Talukder M. R., Chowdhury A. N. Atmospheric pressure gliding arc discharge plasma treatments for improving germination, growth and yield of wheat. *Plasma Science and Technology*. 2018;20(11). Article number 115501. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aac647>.
16. Bourke P., Ziuzina D., Boehm D., Cullen P. J., Keener K. The potential of cold plasma for safe and sustainable food production. *Trends in Biotechnology*. 2018;36(6):615-626. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.11.001>.
17. Šerá B., Šerý M. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains. *Plasma Science and Technology*. 2018;20(4). Article number 044012. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaacc6>.
18. Liu B., Honnorat B., Yang H., Arancibia J., Rajjou L., Rousseau A. Non-thermal DBD plasma array on seed germination of different plant species. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018;52(2). Article number 025401. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae771>.
19. Van Eck J., Kirk D. D., Walmsley A. M. Tomato (*Lycopersicon esculentum*). In: Walker J. M. (ed.) *Methods in Molecular Biology*. 2006;343:459-473. <https://doi.org/10.1385/1-59745-130-4:459>.
20. Măgureanu M., Sirbu R., Dobrin D., Gîdea M. Stimulation of the germination and early growth of tomato seeds by non-thermal plasma. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2018;38:989-1001. <https://doi.org/10.1007/s11090-018-9916-0>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В. Н. Нурминский,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии и биохимии
растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
vadyanurm@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1265-1639>

А. В. Лазукин,
инженер,
НИУ «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14,
Российская Федерация,
lazukin_av@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9771-7013>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim N. Nurminsky,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
vadyanurm@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1265-1639>

Alexander V. Lazukin,
Engineer,
NRU "Moscow Power Engineering Institute",
14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250,
Russian Federation,
lazukin_av@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9771-7013>

С. В. Гундарева,
младший научный сотрудник,
НИУ «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14,
Российская Федерация,
gundareva-sv@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9671-1373>

А. С. Столбиков,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии и биохимии
растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация;
доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1, Россий-
ская Федерация,
valkir5@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6392-9365>

А. В. Третьякова,
к.б.н., доцент,
Иркутский государственный университет,
664025, г. Иркутск, ул. Сухэ-Батора, 5,
Российская Федерация,
anastasiya_chepi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1995-0909>

Вклад авторов

В. Н. Нурминский – выполнение эксперимен-
тальной части работы; обобщение результа-
тов; написание рукописи.
А. В. Лазукин – подготовка приборной базы;
выполнение экспериментальной части работы;
обобщение результатов; написание рукописи.
С. В. Гундарева – подготовка приборной базы;
обобщение результатов; написание рукописи.
А. С. Столбиков – выполнение эксперимен-
тальной части работы; обобщение результа-
тов; написание рукописи.
А. В. Третьякова – выполнение эксперимен-
тальной части работы; обобщение результа-
тов; написание рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.02.2021.
Одобрена после рецензирования 15.02.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.

Svetlana V. Gundareva,
Junior Researcher,
NRU “Moscow Power Engineering Institute”,
14, Krasnokazarmennaya St., Moscow, 111250,
Russian Federation,
gundareva-sv@rambler.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9671-1373>

Aleksey S. Stolbikov,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation;
Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, K. Marx St., Irkutsk, 664003, Russian Federa-
tion,
valkir5@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6392-9365>

Anastasia V. Tretyakova,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Irkutsk State University,
5, Sukhbaatar St., Irkutsk, 664025, Russian Fed-
eration,
anastasiya_chepi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1995-0909>

Contribution of the authors

Vadim N. Nurminsky – implementation of the ex-
perimental part of the work; generalization of re-
sults; writing a manuscript.
Alexander V. Lazukin – preparation of the instru-
ment base; implementation of the experimental
part of the work; generalization of results; writing
a manuscript.
Svetlana V. Gundareva – preparation of the in-
strument base; generalization of results; writing a
manuscript.
Aleksey S. Stolbikov – implementation of the ex-
perimental part of the work; generalization of re-
sults; writing a manuscript.
Anastasia V. Tretyakova – implementation of the
experimental part of the work; generalization of
results; writing a manuscript.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 02.02.2021.
Approved after reviewing 15.02.2022.
Accepted for publication 28.02.2022.