

УДК 537.527; 533.924; 632.08
EDN: TGDHJD

PACS: 52.77.-j; 52.80.-s; 81.65.Mq



Действие продуктов распада плазмы апокампиического разряда на урожайность картофеля (*Solanum tuberosum* L.)

Э. А. Соснин, И. А. Викторова, О. Н. Грецкая, В. А. Панарин,
В. С. Скакун, С. А. Нужных

Представлены результаты обработки клубней картофеля продуктами плазмы апокампиического разряда. Показано, что такая обработка может снизить их контаминацию и как результат, создать благоприятные условия для формирования урожая. Для этого проведена предпосевная обработка клубней картофеля двух сортов «Гала» и «Королева Анна», которые помещались в контейнер, где зажигали апокампиический разряд в воздухе атмосферного давления.

Ключевые слова: активные частицы окислов азота, апокампиический разряд, клубни, урожайность.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-22-28

Введение

Воздействие плазмы на хозяйственно-ценные растения на различных этапах их развития является предметом сравнительно недавно оформившейся прикладной дисциплины – т. н. плазменного сельского хозяйства (от англ. plasma agriculture [1–3]) или агроплазмохимии. Исследования проводят как в лабораторных, так и в полевых условиях. В лабораторных условиях изучают действие предпосевной плазменной обработки семян на всхожесть, морфологические и физиологические параметры растений на ранних этапах онтогенеза. В свою очередь полевые исследования дают ответ на самый важный для хозяйственной практики вопрос об урожайности

культуры. В настоящее время известно, что плазменная обработка на предпосевной фазе развития увеличивает всхожесть семян, закаливает растения к неблагоприятным факторам внешней среды, ускоряет развитие и созревание плодов, повышает урожайность. Обработка плодов и семян после сбора урожая увеличивает сроки его хранения [1–4].

Мы предлагаем разделять непосредственную обработку и косвенную. В первом случае плазма непосредственно контактирует с объектами обработки. Во втором случае плазма формируется отдельно, образует химически активные газы – продукты распада плазмы – которые далее действуют на объекты.

В настоящее время продолжается активное накопление экспериментальных данных

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

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

Викторова Ирина Александровна³, доцент, к.с.-х.н.

Грецкая Ольга Николаевна², инженер.

Панарин Виктор Александрович¹, н.с., к.ф.-м.н.

Скакун Виктор Семенович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Нужных Светлана Анатольевна², н.с., к.биол.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.

³ Томский сельскохозяйственный институт – филиал Новосибирского государственного аграрного университета.

Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 11.

Статья поступила в редакцию 19.12.2022

После доработки 13.01.2023

Принята к публикации 16.01.2023

© Соснин Э. А., Викторова И. А., Грецкая О. Н., Панарин В. А., Скакун В. С., Нужных С. А., 2023

о влиянии плазмы, полученной в различных условиях (тип разряда, газовая среда и её давление, геометрия) на развитие растений. Например, воздействие на семена пшеницы плазмы атмосферного давления в Аг вызывает травление поверхности семян, что в свою очередь стимулирует процессы набухания семян и, как следствие, приводит к ускорению прорастания [5]. Некоторые химически активные частицы – продукты распада плазмы, полученной в He – попадая в устьица листьев, могут инактивировать возбудителей грибковых и вирусных заболеваний растений [6]. Другой пример: плазма коронного разряда, действуя на зараженные различными возбудителями грибковых заболеваний семена озимой пшеницы и озимого ячменя оказывает фунгицидное действие, что было связано с образованием в области разряда озона [7].

Отдельный интерес представляет плазма и продукты её распада, полученные в разрядах в воздухе атмосферного давления (смесь кислорода, азота, углекислого газа и паров воды). Этот способ получения плазмы позволяет отказаться от инертных газов и оборудования, необходимого для работы при пониженных давлениях, что упрощает процедуру обработки. Состав такой плазмы зависит от типа разряда [8] и может включать в себя как активные частицы кислорода (O_3 , синглетный кислород), колебательно и электронно возбужденные молекулы атомы и/или молекулы (O_2 , H_2 , N_2 , CO , CO_2 , H_2O), гидроксильные радикалы ($HO\bullet$, $HO_2\bullet$), перекись водорода (H_2O_2) и активные частицы окислов азота (NO , NO_2 , NO_3 и др.) [9, 10].

В настоящем исследовании будут представлены данные полевых исследований по воздействию продуктов распада атмосферной плазмы на урожайность картофеля. Новизна работы обусловлена тем, что, во-первых, воздействие атмосферной плазмы на клубни растений в случае, когда плазмообразующим газом является воздух, почти не изучено, а в известных нам работах действие осуществляют с помощью плазмы разрядов в инертных газах [11]. Последнее при масштабировании процедуры обработки приведёт к существенным затратам благородных газов. Во-вторых, в качестве источника плазмы в воздухе использован апокампический разряд (АР) в воздухе при атмосферном давлении [12, 13]. Ра-

нее этот разряд в плазменном сельском хозяйстве почти не использовался, за исключением нашей работы [14], где было выявлено фунгицидное действие продуктов распада плазмы по отношению к плесневым грибам, контаминирующим семена зерновых культур яровая пшеница (сорт «Иргина») и смеси сортов ржи. На основании этого мы выдвинули гипотезу о том, что обработка продуктами плазмы апокампического разряда клубней картофеля может снизить их контаминацию и как результат, создать благоприятные условия для формирования урожая. Настоящая статья посвящена проверке этой гипотезы в полевых условиях. Кроме того, мы обсудим вероятный механизм воздействия, который будет связан с образованием активных частиц окислов азота.

Экспериментальная техника и методики

Блок-схема установки для обработки посевного материала представлена на рисунке.

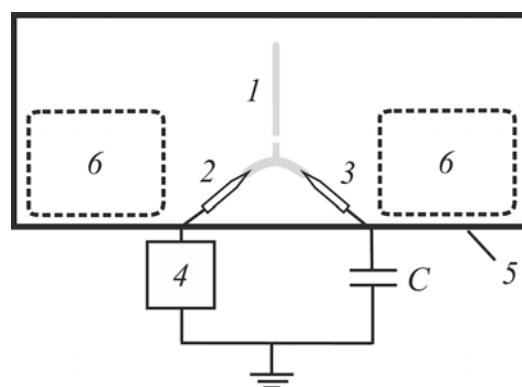


Рисунок. Схема установки: 1 – апокампический разряд; 2, 3 – электроды; 4 – источник питания; 5 – контейнер; 6 – места расположения посевного материала

Апокампический разряд 1 зажигали между остриями электродами 2 и 3 из стали, образующими разрядный промежуток $d = 7,5$ мм. На электрод 2 подавали импульсы напряжения положительной полярности с частотой $f = 25$ кГц, длительностью импульса $\tau = 1,5$ мкс и амплитудой $U_p = 12,5$ кВ. Электрод 3 имел развязку с заземлением через ёмкость C (1,5 пФ). Разряд представляет собой визуально наблюдаемый яркий изогнутый канал между электродами 2 и 3, от места максимального изгиба которого прорастают менее яркие каналы (один или несколько) – апокам-

пы. Явление чувствительно к энергии, вводимой в разрядный промежуток: варьируя величины C и U_p можно получать как хорошо известный режим импульсной искры, так и режим с апокампами. Это в свою очередь повлияет на состав плазмы и продукты её распада [15], о чём ещё будет сказано далее при обсуждении результатов.

Разряд зажигали в контейнере 5 из диэлектрического материала объёмом ~ 26 л ($38 \times 32 \times 22$ см). В контейнере были предусмотрены места 6 для размещения посадочного материала картофеля. Апокампиский разряд изменял состав воздуха в контейнере, и образованные продукты распада плазмы действовали на посадочный материал. Для этого клубни картофеля размещались вокруг электродов 2 и 3 в два слоя. Величина одной навески около 5 кг (в среднем – 40 клубней). Свободная от картофеля зона составляла половину объёма контейнера. Контейнер был герметичным, не вентилировался и не встряхивался во время обработки. После обработки одной навески, контейнер проветривался и в него помещали новую партию клубней. Во время процедуры энергопотребление источника питания составляло 12 Вт, при амплитудной величине тока разряда 0,7 А и длительности 300 нс.

Применялось два варианта обработки: одновременно с горением апокампиского разряда за время Δt_1 и с дополнительным выдерживанием навески с посадочным материалом в контейнере после прекращения разряда за время Δt_2 . Режимы выбирались, исходя из нашего предыдущего опыта обработки пшеницы [14], а также на основе оценки состояния посадочного материала.

В качестве посевного материала были выбраны клубни среднеспелого сорта картофеля «Гала» (код сорта: 9705642) и раннеспелого сорта «Королева Анна» (код сорта: 8756248), отобранные в картофелеводческом хозяйстве Томского района Томской области. Выбор культур был обусловлен экономическим значением данных культур для региона, где далее проводились полевые исследования.

Следует отметить, что в картофелехранилище на клубнях сорта «Королева Анна» была отмечена фитофторозно-фузариозная гниль. Возбудителями данного заболевания

являются оомицет *Phytophthora infestans* и виды рода *Fusarium*. Диагностируются эти патогены в основном по признакам, свойственным отдельным заболеваниям. Клубни в поле поражаются двумя путями: спорами, попадающими с листьев и вместе с дождём просачивающимися в землю, во время уборки – при соприкосновении клубней с поражённой ботвой. Особенно сильное заражение происходит при уборке незрелого картофеля с легко сдирающейся кожурой или на механически повреждённых клубнях. Фузариозной сухой гнилью (фузариоз клубней) клубни обычно заражаются ещё в поле. Инфекция, кроме почвы, может сохраняться на больных клубнях и в картофелехранилищах. Проникают грибы в клубни через поранения кожуры, места поражения фитофторозом, паршой обыкновенной и другими болезнями [16].

Посадку картофеля после хранения и обработки производили на полях ФГБУ «Госсорткомиссии» расположенной в с. Ключи Томского района. Опыты проводили в соответствии с основными требованиями по Б. А. Доспехову [17] и З. И. Журбицкому [18]. Использовались Методические указания НИИ овощных культур [19].

Фенологические фазы устанавливали по методике Госсортсети. Расчёт площади листьев осуществляли по формулам регрессии на основе методики Н. Ф. Коняева [17]. Физиологические показатели роста и развития растений исследовали по общепринятым методикам [19].

Предшествующей культурой была морковь. Перед посадкой поле пролущили лущильниками в агрегате с трактором МТЗ-82 на глубину 18 см, так как поле после моркови было рыхлое и пополнившееся органическими остатками (корневыми волосками моркови) и чистые от сорняков.

Посадку провели для трёх вариантов опыта: 1) контрольный вариант (К) – клубни картофеля без обработки; 2) обработка клубней картофеля АР $\Delta t_1 = 2$ мин; 3) $\Delta t_1 = 2$ мин, $\Delta t_2 = 8$ мин.

Площадь опытной делянки составляла 20 м^2 , плотность посадки – 3 растения на 1 м^2 .

Направление рядов – с востока – на запад. Норма высева – по 17 картофелин на каждый вариант. Расстояние между рядками –

70 см. Ширина делянки – 1 м. Расстояние между вариантами, делянками – 0,5 м. Почва опытного участка – серая лесная среднесуглинистая.

Результаты эксперимента и их обсуждение

За период вегетации провели окучивание посадок и замеры длины стеблей картофеля и их толщину, данные представлены в табл. 1. Длина и толщина стебля картофеля были са-

мыми большими в варианте 2 (обработка клубней АР в течение 2 мин). Стебель на растениях был не вытянутый, мощный и хорошо развитый.

При выкопке картофеля осуществили разделение клубней по фракциям по всем вариантам (табл. 2). Наилучшая урожайность была также во 2 варианте. Здесь клубней крупной фракции на сорте «Гала» на 21 % больше контрольного варианта и на 15 % третьего варианта.

Таблица 1

Биометрические показатели картофеля по вариантам опыта

| Вариант опыта | Сорт «Гала» | | | | | |
|----------------------|------------------|---------|---------|--------------------|---------|---------|
| | Длина стебля, см | | | Толщина стебля, мм | | |
| | 27 июня | 11 июля | 27 июля | 27 июня | 11 июля | 27 июля |
| 1 | 14,80 | 25,32 | 41,68 | 6,28 | 6,78 | 7,03 |
| 2 | 16,68 | 26,59 | 46,36 | 6,88 | 6,80 | 7,97 |
| 3 | 14,42 | 25,67 | 45,00 | 6,27 | 6,48 | 7,68 |
| Сорт «Королева Анна» | | | | | | |
| 1 | 12,44 | 17,02 | 35,58 | 5,52 | 6,32 | 6,88 |
| 2 | 13,01 | 18,06 | 37,04 | 6,98 | 7,67 | 7,82 |
| 3 | 12,68 | 17,59 | 36,42 | 6,42 | 6,84 | 7,15 |

Таблица 2

Структура урожайности картофеля по вариантам опыта (среднее)

| Вариант | Урожай, ц/га | Сорт «Гала», клубни | | | | | |
|------------------------------|--------------|---------------------|------|---------|------|--------|------|
| | | крупные | | средние | | мелкие | |
| | | ц/га | % | ц/га | % | ц/га | % |
| 1 | 243,1 | 128,7 | 53,0 | 85,8 | 35,3 | 28,6 | 11,7 |
| 2 | 426,3 | 315,9 | 74,0 | 61,6 | 14,0 | 48,8 | 12,0 |
| 3 | 155,1 | 92,0 | 59,0 | 57,5 | 37,0 | 5,60 | 4,0 |
| Сорт «Королева Анна», клубни | | | | | | | |
| 1 | 128,8 | 85,0 | 66,0 | 39,5 | 31,0 | 3,78 | 3,0 |
| 2 | 167,98 | 91,0 | 54,2 | 72,0 | 42,9 | 4,98 | 2,9 |
| 3 | 111,7 | 74,7 | 66,9 | 34,0 | 30,4 | 3,0 | 2,7 |

На сорте «Королева Анна» наибольшая урожайность получена во втором варианте (167,98 ц/га), это на 39,18 ц/га больше контрольного варианта и на 56,28 ц/га больше третьего варианта. Но в 3-м варианте картофеля крупной фракции больше чем во втором варианте и контроле.

Полученные данные, вне зависимости от сорта картофеля, свидетельствуют, что использованная обработка повышает урожайность картофеля, хотя и обладает специфичностью. Ранее

было показано, что действие NO на растения (а не семена и плоды) может вызывать как их рост в целом, так и рост его отдельных частей или вызывала замедление роста растений (см. обзор в [14]). В нашем случае между воздействием на посевной материал и посадкой проходило несколько дней, поэтому говорить о сигнальном характере действия не следует.

Мы связываем полученные данные с тем, что обработка продуктами распада атмосферной плазмы апокампиического разряда

обеспечивает фунгицидное действие продуктов распада плазмы по отношению к возбудителям фитофторозно-фузариозной гнили. Какие физические механизмы это обеспечивают?

Известно, что разряд в воздухе сопровождается целым рядом реакций [8–10]:

Электронный удар вызывает диссоциацию молекул кислорода и возбуждение молекулярного азота до различных возбужденных состояний N_2^* . Энергия возбужденного N_2^* может быть использована для получения атомов кислорода, азота и первичного оксида азота (NO), что в свою очередь приводит к образованию как озона, так и различных окислов. Варьируя параметры электронов и плотность газовой среды можно получать из исходного воздуха озон и окислы азота. Если образуется много озона, то можно решать задачу окисления загрязнителей, содержащихся в воздухе. Если получаем преимущественно окислы азота, то такую смесь можно использовать для травления и бактерицидной обработки.

Как было экспериментально и теоретически показано в [20, 21], специфика апокампического разряда в воздухе атмосферного давления состоит в том, что для его формирования газ в канале разряда должен разогреться до температуры около 1000 °С. В этих условиях, как было показано в модели Зельдовича [22], на образование продуктов распада плазмы начинает заметно влиять температура. В частности, производство озона в реакции $O_2 + O + M \rightarrow O_3 + M$ (где M – третья частица) может полностью прекратиться и смениться на преимущественное образование окислов азота (NO, NO₂ и N₂O), что обусловлено достижением критической концентрации окислов NO_x, при которой атомы кислорода реагируют с окислами азота быстрее, чем в реакциях с O₂ и O₃. В [23] эти процессы были названы «каталитической» рекомбинацией атомов кислорода в окислы азота. Поэтому в условиях АР из воздуха получаем газовую среду с преобладанием окислов азота над остальными активными частицами.

Таким образом полученные нами результаты можно связать с фунгицидным действием указанных продуктов распада плазмы АР. Такое протравливание посевного материала окислами азота приводит к его оздоровле-

нию, растения формируются без задержек, быстрее дают листья и быстрее созревают, что и влияет на урожайность культур.

Понятно, что этот же подход можно использовать при обработке инога посадочного материала, подверженного воздействию возбудителей болезней растений.

Заключение

Экспериментально обоснован способ повышения урожайности картофеля с помощью продуктов распада плазмы апокампического разряда в воздухе атмосферного давления. Полевые исследования, проведенные на двух сортах картофеля («Гала» и «Королева Анна»), выявили увеличение биометрических показателей картофеля по мере развития растений (длина и толщина стебля). Использованное воздействие обладает сортоспецифичностью: оценка структуры урожая показала, что наибольшую урожайность даёт сравнительно кратковременная обработка картофеля сорта «Королева Анна» разрядом в течение 2 мин. В этом случае оценочная урожайность составляет 167,98 ц/га, что на 39,18 ц/га больше контрольного варианта (без обработки) и на 56,28 ц/га больше варианта, в котором осуществлялась длительная обработка в течение 10 мин. Можно предположить, что 2-х минутная экспозиция достаточна для обработки посадочного материала, не вызывает его угнетения. На основе анализа данных о свойствах апокампического разряда сделан вывод о фунгицидном действии продуктов распада плазмы.

Проведенные исследования следует продолжить, чтобы получить данные, необходимые для создания технологических установок по обработке посадочного материала. И здесь будут необходимы в том числе и сравнительные исследования действия различных типов атмосферной плазмы на конкретные объекты, имеющие хозяйственное значение.

*Исследование выполнено в рамках
Государственного задания ИСЭ СО РАН,
проект № FWRM-2021-0014.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Puač N., Gherardi M., Shiratani M. / Plasma Proc. Polym. 2017. Vol. 15. № 2. P. e1700174.
2. Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K., Shiratani M. / Processes. 2020. Vol. 8. № 8. P. 1002.
3. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J., Rojas-Pierce M., Hernández R., Gatiboni L., Stapelmann K. / Plasma Proc. Polym. 2021. Vol. 18. № 1. P. e2000162.
4. Takaki K., Hayashi N., Wang D., Ohshima T. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. Vol. 52. № 47. P. 473001.
5. Балданов Б. Б., Ранжуров Ц. В., Сордонова М. Н., Будажапов Л. В. / Прикладная физика. 2019. № 1. С. 41.
6. Zhang X., Liu D., Zhou R., Song Y., Sun Y., Zhang Q., Niu J., Fan H., Yang S. / Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. № 4. P. 043702.
7. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S., Mikhailovskaya T. O., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A., Dudarev D. P. / IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. Vol. 49. № 3. P. 1034.
8. Иванова И. П., Трофимова С. В., Карпель Вель Лейтнер Н., Аристова Н. А., Архипова Е. В., Бурхина О. Е., Сыроева В. А., Пискарев И. М. / Современные технологии в медицине. 2012. № 2. С. 20.
9. Kossyi I., Kostinsky A., Matveyev A. A., Silakov V. P. / Plasma Sources Sci. Technol. 1992. Vol. 1. № 3. P. 207.
10. Акишев Ю. С. / Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 8. С. 26.
11. Гордеев Ю. А., Макаров Н. Б. / Плодородие. 2009. № 6. С. 18.
12. Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Тарасенко В. Ф., Бакуит Е. Х. / Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 12. С. 857.
13. Соснин Э. А., Найдис Г. В., Тарасенко В. Ф., Скакун В. С., Панарин В. А., Бабаева Н. Ю. / ЖЭТФ. 2017. Т. 152. Вып. 5(11). С. 1081.
14. Жданова О. С., Гольцова П. А., Диденко М. В., Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Викторова И. А. / Современные научные исследования и инновации. 2016. № 11 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/11/74282> (дата обращения: 30.11.2022).
15. Гильванова И. Р., Еникеев А. Р., Федяев В. В., Усманов И. Ю., Рахманкулова З. Ф. / Вестник Башкирского университета. 2014. Т. 19. № 1. С. 54.
16. Пересыпкин Е. О. Сельскохозяйственная фитопатология. – М.: Агропромиздат, 1989.
17. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. – М.: Агропромиздат, 1985.
18. Журбицкий З. И. Теория и практика вегетационного метода. – М.: Колос, 1968.
19. Литвинов С. С. Методика проведения опытов с овощными культурами. – М.: ГНУ ВНИИ овощеводства, 2011.
20. Андреев М. В., Кузнецов В. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Панарин В. А., Тарасенко В. Ф. / Прикладная физика. 2016. № 6. С. 32.
21. Соснин Э. А., Андреев М. В., Диденко М. В., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф. / ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 911.
22. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Клумов Б. А., Фортвов В. Е. / УФН. 2014. Т. 184. № 3. С. 247.
23. Eliasson B., Kogelschatz U. / IEEE Trans. Plasma Sci. 1991. Vol. 19. № 2. P. 309.

PACS: 52.77.-j; 52.80.-s; 81.65.Mq

The effect of plasma decay products of the apocampic discharge on potato (*Solanum tuberosum* L.) yield

*E. A. Sosnin^{1,2}, I. A. Viktorova³, O. N. Gretskaya², V. A. Panarin¹,
V. S. Skakun¹ and S. A. Nuznich²*

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

³ Tomsk Agricultural Institute – branch of Novosibirsk State Agrarian University
11 Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russia

Received 19.12.2022; revised 13.01.2023; accepted 16.01.2023

The hypothesis was tested that the treatment of potato tubers exposed to rotting during storage with plasma products of the apocalyptic discharge can reduce their contamination and, as a re-

sult, create favorable conditions for the formation of a crop. For this purpose, pre-sowing treatment of potato tubers of two varieties "Gala" and "Koroleva Anna" was carried out, which were placed in a container where an apocampic discharge was ignited in atmospheric pressure air. It is shown that the processing improves the biometric parameters of potatoes as plants develop, and also increases the yield of the crop. The substantiation of the use of apocampic discharge for obtaining the fungicidal effect of plasma decay products is given.

Keywords: active nitrogen particles, apocampic discharge, tubers, yield.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-22-28

REFERENCES

1. Puač N., Gherardi M. and Shiratani M., Plasma Proc. Polym. **15** (2), e1700174 (2017).
2. Attri P., Ishikawa K., Okumura T., Koga K. and Shiratani M., Processes **8** (8), 1002 (2020).
3. Ranieri P., Sponsel N., Kizer J., Rojas-Pierce M., Hernández R., Gatiboni L. and Stapelmann K., Plasma Proc. Polym. **18** (1), e2000162 (2021).
4. Takaki K., Hayashi N., Wang D. and Ohshima T., J. Phys. D: Appl. Phys. **52** (47), 473001 (2019).
5. Baldanov B. B., Ranzhurov Ts. V., Sordonova M. N. and Budazhapov L. V., Applied Physics, № 1, 41 (2019) [in Russian].
6. Zhang X., Liu D., Zhou R., Song Y., Sun Y., Zhang Q., Niu J., Fan H. and Yang S., Appl. Phys. Lett. **104** (4), 043702 (2014).
7. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Deshko K. I., Zaitsev F. S., Mikhailovskaya T. O., Shvarov A. P., Izotov A. M., Tarasenko B. A. and Dudarev D. P., IEEE Transactions on Plasma Science **49** (3), P. 1034 (2021).
8. Ivanova I. P., Trofimova S. V., Karpel Vel Leitner N., Aristova N. A., Arkhipova E. V., Burkhina O. E., Sysoeva V. A. and Piskaryov I. M., Modern Technologies in Medicine, № 2, 20 (2012).
9. Kossyi I., Kostinsky A., Matveyev A. A. and Silakov V. P., Plasma Sources Sci. Tech. **1** (3), 207 (1992).
10. Akishev Y. S., Chem. Chem. Tech. **62** (8), 26 (2019).
11. Gordeev Y. A. and Makarov N. B., Fertility (Plodorodie), № 6, 18 (2009).
12. Sosnin E. A., Skakun V. S., Panarin V. A., Pechenitsin D. S., Tarasenko V. F. and Baksht E. Kh., JETF Letters **103** (12), 761 (2016).
13. Sosnin E. A., Naidis G. V., Tarasenko V. F., Skakun V. S., Panarin V. A. and Babaeva N. Yu., JETP **125** (5), 920 (2017).
14. Zhdanova O. S., Goltsova P. A., Didenko M. V., Sosnin E. A., Panarin V. A., Skakun V. S., Viktorova I. A., Modern scientific researches and innovations № 11 (2016), URL: <https://web.snauka.ru/en/issues/2016/11/74282> (date of application: 12.12.2022).
15. Gil'vanova I. R., Enikeev A. R., Fedyayev V. V., Usmanov I. Yu. and Rachmankulova Z. F., Vestnik Baskirskogo Universiteta **19** (1), 54 (2014).
16. Peresypkin E. O., Agricultural phytopathology, Moscow, Argopromizdat, 1989.
17. Dospechov B. A., Methodology of field experience, Moscow, Argopromizdat, 1985.
18. Zurditski Z. I., Theory and practice of the vegetative method, Moscow, Kolos, 1968.
19. Livinov S. S., Methods of conducting experiments with vegetable crops, Moscow, GNU VNII Institute of vegetable growing, 2011.
20. Andreev M. V., Kuznetsov V. S., Skakun V. S., Sosnin E. A., Panarin V. A. and Tarasenko V. F., Applied Physics, № 6, 32 (2016) [in Russian].
21. Sosnin E. A., Andreev M. V., Didenko M. V., Panarin V. A., Skakun V. S. and Tarasenko V. F., High Temperature **56** (6), 837 (2018).
22. Ivanov M. F., Kiverin A. D., Klumov B. A. and Fortov V. E., Phys. Usp. **57** (3), 249 (2014).
23. Eliasson B. and Kogelschatz U., IEEE Trans. Plasma Sci. **19** (2), 309 (1991).