








DOI 10.22363/2312-797X-2022-17-1-20-30
УДК 537.312.5:633.16

Научная статья / Research article

Последствия однократного воздействия нетермальной аргоновой плазмы на разных этапах органогенеза для роста и развития ячменя

Д.И. Петрухина  , О.В. Тхорик , В.И. Шишко ,
В.А. Харламов , П.Н. Цыгвинцев 

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии
и агроэкологии, г. Обнинск, Российская Федерация
 daria.petrukhina@outlook.com

Аннотация. Представлены результаты вегетационных экспериментов по действию низкотемпературной аргоновой плазмы на растения ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Владимир с целью изучения влияния на морфофизиологические показатели и урожайность. Воздействие плазмы проводилось однократно на трех этапах органогенеза растений ячменя: 3-й лист, кущение и выход в трубку. Длительность обработки составляла 15 и 30 мин. Растения выращивали до полной спелости. Было показано, что воздействие плазмой статистически значимо не изменяло большинство исследуемых показателей. Однако воздействие в течение 15 мин на растения ячменя в критический период развития (фаза 3 листа) приводило к увеличению массы корней растений на 77,8 % ($p < 0,05$) по сравнению с контрольными растениями. А после облучения в фазу кущения увеличивалось число колосков в колосе главного стебля на 18,5 % при обработке в течение 15 мин ($p < 0,001$) и 11,17 % после 30 мин воздействия ($p < 0,05$). Наблюдали увеличение числа продуктивных стеблей и число зерен с бокового стебля. В то же время воздействие в течение 30 мин в фазу 3 листа снижало высоту растений на 7 % ($p < 0,05$). А воздействие в фазу кущения на 39 % ($p < 0,01$) снижало массу корней растений ячменя относительно контрольных растений. Напротив, воздействие низкотемпературной плазмы на растения ячменя в фазу выхода в трубку было менее выражено по сравнению с воздействием на более ранних стадиях развития. Это можно объяснить меньшей чувствительностью данной стадии органогенеза. Полученные результаты влияния однократного воздействия плазмы на разных этапах органогенеза растения ячменя могут быть полезны с целью повышения урожайности ячменя.

Ключевые слова: ячмень, *Hordeum vulgare* L., нетермальная аргоновая плазма, морфо-физиология, урожайность

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Петрухина Д.И., Тхорик О.В., Шишко В.И., Харламов В.А., Цыгвинцев П.Н., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/1>

Финансирование. Благодарности. Работа выполнена в рамках Государственного задания № FGNE-2022–0003 Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии.

Вклад авторов: Петрухина Д.И. — анализ результатов и написание рукописи; Тхорик О.В. — обработка экспериментальных данных; Шишко В.И. и Харламов В.А. — проведение вегетационного эксперимента; Цыгвинцев П.Н. — планирование и руководство экспериментом.

История статьи: поступила в редакцию 2 февраля 2022 г., принята к публикации 25 февраля 2022 г.

Для цитирования: Петрухина Д.И., Тхорик О.В., Шишко В.И., Харламов В.А., Цыгвинцев П.Н. Последствия однократного воздействия нетермальной аргоновой плазмы на разных этапах органогенеза для роста и развития ячменя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2022. Т. 17. № 1. С. 20—30. doi: 10.22363/2312-797X-2022-17-1-20-30

Effects for barley growth and development of single exposure to low-temperature argon plasma at different organogenesis stages

Daria I. Petrukhina  , Oksana V. Tkhорik , Valentin I. Shishko ,
Vladimir A. Kharlamov , Pavel N. Tsygvintsev 

Russian Institute of Radiology and Agroecology, *Obninsk, Russian Federation*
 daria.petrukhina@outlook.com

Abstract. The paper presents the vegetation experiments results on the low-temperature argon plasma effect on barley plants (*Hordeum vulgare* L.) of the Vladimir cultivar and its influence on morphophysiological parameters and yield. Plasma treatment was once at three organogenesis stages of barley plants: 3rd leaf, tillering and booting. Plasma exposure was 15 and 30 min. The barley plants were grown to full maturity. Analysis of barley yield structure did not reveal clear patterns in the change in most parameters resulted from the plasma treatment. However, 15 min plasma exposure on barley plants in the critical development stage (3rd leaf) increased by 77.8 % ($p < 0.05$) the root weight of plants compared with control. After treatment at the tillering stage, the number of spikelets per main stem ear increased by 18.5 % ($p < 0.001$) after 15 min plasma exposure, and by 11.17 % ($p < 0.05$) after 30 min exposure. An increase in the number of productive stems and the number of grains per lateral stem ear was observed. At the same time, 30 min exposure in the 3rd leaf stage reduced by 7 % ($p < 0.05$) the plant height. And the treatment in the tillering stage reduced by 39 % ($p < 0.01$) the root weight of barley plants. The effect of low-temperature plasma on barley plants at the booting stage was less expressed to the plasma effect at earlier development stages. This can be explained by the lower sensitivity of this stage of organogenesis. The obtained effects of single exposure to low-temperature argon plasma at different organogenesis stages of barley plants can be useful to increase barley yields.

Key words: barley, *Hordeum vulgare* L., non-thermal argon plasma, morpho-physiology, yield

Conflicts of interest. The authors declared that they have no conflict of interest.

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of the State Assignment of the Russian Institute of Radiology and Agroecology no. FGNE-2022–0003.

Article history: Received: 2 February 2022. Accepted: 25 February 2022

For citation: Petrukhina DI, Tkhorik OV, Shishko VI, Kharlamov VA, Tsygvintsev PN. Effects for barley growth and development of single exposure to low-temperature argon plasma at different organogenesis stages. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2022; 17(1):20—30. doi: 10.22363/2312-797X-2022-17-1-20-30

Введение

Согласно литературным данным, использование низкотемпературной (холодной) плазмы атмосферного давления в агропромышленном комплексе находится в стадии первоначального бурного развития, но перспективы здесь открываются весьма обширные [1, 2]. Во многих зарубежных исследованиях уже было продемонстрировано негативное воздействие низкотемпературной плазмы на бактерии [3, 4]. Одним из наиболее вероятных практических применений низкотемпературной плазмы в агротехнологиях является предпосевная обработка семенного материала с целью обеззараживания их поверхности от микроорганизмов, а также для стимулирования прорастания семян, роста и развития растений [5]. В литературе приведены данные исследований обработки низкотемпературной плазмой для дезинфекции поверхностей различных семян: семян ячменя [6], сои [7], томатов [8], огурца и перца [9]; зерен кукурузы [10], семян маша, или бобов мунг [11], семян базилика [12].

Кроме того, в литературе сообщается, что низкотемпературная плазма наиболее эффективна в борьбе с микробной обсемененностью поверхности семян по сравнению с обработкой электронным пучком. Оба метода ускоряли прорастание семян при кратковременной плазменной обработке (< 120 с) и всех применяемых дозах обработки электронным пучком (8...60 кГр). Но даже самая низкая доза обработки электронным пучком в 8 кГр в этом исследовании вызвала аномалии корней у проростков, что свидетельствует о пагубном воздействии на ткань семян [13]. Однако не исследованы последствия воздействия низкотемпературной плазмы атмосферного давления на сельскохозяйственные растения. Это представляется интересным для целей повышения урожая и качества продукции в хозяйствах. Формирование у растений ячменя ответных реакций на действие низкотемпературной плазмы в различные этапы органогенеза не было изучено. В период образования вегетативных органов, а также в генеративный период развития растений, влияние плазменного воздействия может быть различным.

Цель исследования — изучение влияния в различные этапы органогенеза однократного воздействия низкотемпературной аргонной плазмы на рост, развитие и урожайность зерновых культур на примере ярового ячменя.

Материалы и методы исследования

Объект исследования — ячмень (*Hordeum vulgare* L.) ярового сорта Владимир. Растения выращивали в условиях вегетационного эксперимента в теплице в сосудах, содержащих 4,5 кг воздушно-сухой дерново-подзолистой почвы. В каждом сосуде выращивалось по 10 растений. Обработку растений проводили в различные фазы

органогенеза: 3-й лист, кущение и выход в трубку. Этапы органогенеза определяли, ориентируясь на публикации Zadoks et al. и Tottman [14, 15].

В качестве источника низкотемпературной плазмы использовали описанную ранее установку [16, 17]. Общий вид экспериментальной установки приведен на рис. 1. В установке генерируется микроволновый разряд коаксиальной конфигурации в струе аргона при атмосферном давлении.



Рис. 1. Источник СВЧ плазмы с коническим концентратором

Fig. 1. Source of microwave plasma with a conical concentrator

Для обеспечения равномерной обработки растений, а также снижения температуры потока при сохранении концентрации ионизации/активации на внешнем конце наконечника устроен газовый концентратор (рис. 2), выполненный двух частях из нержавеющей стали толщиной 0,4 мм. Концентратор образует расширительную камеру в виде усеченного конуса. Первая часть длиной 160 мм, диаметр основания конуса составил 100 мм, а диаметр его верхнего сечения—соответственно 60 мм. Вторая часть концентратора длиной 390 мм имела диаметр верхнего сечения 100 мм и диаметр основания 230 мм. Нижний край концентратора находился на расстоянии 5 см от поверхности земли в сосуде. Расход аргона составлял 5 л/мин. Длительность обработки— 15 и 30 мин.

Контролем служили необработанные растения. Действие низкотемпературной плазмы оценивали в конце вегетации по морфофизиологическим показателям и структуре урожая. Растения выращивали до полной спелости. Достоверность различий вариантов опыта относительно контроля устанавливали по *t*-критерию Стьюдента. В таблицах представлены средние значения и ошибка средней $X \pm m$.



Рис. 2. Процесс обработки растений СВЧ плазмой
Fig. 2. The process of treating plants with microwave plasma

Результаты исследования и обсуждение

Анализ структуры урожая показал, что воздействие низкотемпературной плазмой на растения ячменя в критический период развития (фаза 3-го листа) не оказало статистически значимого негативного эффекта на большинство параметров (табл. 1). Только высота растений, обработанных плазмой, была ниже относительно контрольных на 7 % ($p < 0,05$) после воздействия в течение 30 мин.

В то же время наблюдался значительный стимулирующий эффект на массу корней после 15 мин воздействия низкотемпературной плазмы (табл. 1). Масса корней растений, обработанных плазмой в течение 15 мин на 77,8 % ($p < 0,05$), превышала этот показатель у контрольных растений. Стимулирующее воздействие на корни растения ячменя могло способствовать появлению дополнительных боковых стеблей в процессе органогенеза. В эксперименте также наблюдали стимулирующий эффект от воздействия плазмой в течение 15 мин на число зерен с бокового стебля и их массу.

Морфофизиологические показатели и структура урожая ячменя сорта Владимир в фазе полной спелости обработки низкотемпературной плазмой в фазе развития 3-й лист

Morphophysiological parameters and yield structure of spring barley cv. Vladimir (full ripeness stage) after low-temperature plasma treatment in 3rd leaf stage

Показатель / Parameter	Длительность обработки плазмой / Plasma treatment duration					
	Контроль/ Control		15 мин (1/2 дозы)/ 15 min (1/2 dose)		30 мин (max доза)/ 30 min (max dose)	
	X	±m	X	±m	X	±m
Высота растения, см Plant height, cm	56,50	1,03	53,88	1,13	52,50*	1,43
Длина колоса, см Ear length, cm	8,05	0,19	7,70	0,20	7,83	0,19
Общее число стеблей, шт. Total stem numbers	1,90	0,14	1,85	0,15	1,95	0,14
Число продуктивных стеблей с колосом, шт. Number of productive stems	1,80	0,14	1,70	0,15	1,60	0,13
Число колосков в колосе главного стебля, шт. Number of spikelets per main stem ear	21,05	0,45	20,40	0,49	20,75	0,63
Число зерен в колосе главного стебля, шт. Grain numbers per main stem ear	16,25	0,51	16,00	0,70	15,10	0,60
Масса зерен с колоса главного стебля, г Grain weight per main stem ear, g	0,88	0,03	0,84	0,03	0,81	0,03
Число зерен в колосе бокового стебля, шт. Grain numbers per lateral stem ear	8,45	1,74	9,50	2,03	7,80	1,83
Масса зерен с колоса бокового стебля, г Grain weight per lateral stem ear, g	0,24	0,06	0,34	0,08	0,28	0,07
Масса корня, г Root weight, g	0,30	0,04	0,52*	0,08	0,23	0,02

*Различия с контролем достоверны при $p < 0,05$.

*Differences with controls are significant at $p < 0,05$.

Облучение растений ячменя низкотемпературной плазмой в фазу кушение оказало стимулирующий эффект на некоторые показатели. Наблюдали статистически значимое увеличение числа колосков в колосе главного стебля на 18,5 %

при обработке в течение 15 мин ($p < 0,001$) и 11,17 % после 30 мин воздействия ($p < 0,05$) (табл. 2). Так же можно отметить увеличение числа зерен с бокового стебля и их массы.

Таблица 2/ Table 2

Морфофизиологические показатели и структура урожая ячменя сорта Владимир в фазе полной спелости обработки низкотемпературной плазмой в фазе развития кущение
Morphophysiological parameters and yield structure of spring barley cv. Vladimir (full ripeness stage) after low-temperature plasma treatment in tillering stage

Показатель/ Parameter	Длительность обработки плазмой/ Plasma treatment duration					
	Контроль/ Control		15 мин (1/2 дозы)/ 15 min (1/2 dose)		30 мин (max доза)/ 30 min (max dose)	
	X	±m	X	±m	X	±m
Высота растения, см Plant height, cm	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Длина колоса, см Ear length, cm	7,70	0,24	7,73	0,19	7,63	0,23
Общее число стеблей, шт. Total stem numbers	1,90	0,12	1,70	0,13	2,10	0,12
Число продуктивных стеблей с колосом, шт. Number of productive stems	1,60	0,15	1,65	0,13	1,90	0,14
Число колосков в колосе главного стебля, шт. Number of spikelets per main stem ear	19,70	0,51	23,35***	0,50	21,90*	0,54
Число зерен в колосе главного стебля, шт. Grain numbers per main stem ear	14,85	0,59	15,35	0,60	15,55	0,62
Масса зерен с колоса главного стебля, г Grain weight per main stem ear, g	0,80	0,04	0,84	0,03	0,82	0,03
Число зерен в колосе бокового стебля, шт. Grain numbers per lateral stem ear	7,00	1,76	9,35	2,16	10,65	1,92
Масса зерен с колоса бокового стебля, г Grain weight per lateral stem ear, g	0,24	0,07	0,31	0,08	0,35	0,07
Масса корня, г Root weight, g	0,47	0,00	0,44	0,08	0,29**	0,04

Различия с контролем достоверны при: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Variables of significance: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

В то же время воздействие плазмой в течение 30 мин на 39 % ($p < 0,01$) снижало массу корней растений ячменя относительно контрольных растений. В целом, также как и после воздействия низкотемпературной плазмой на растения ячменя

в фазу 3-го листа, воздействие в фазу кущения не оказало статистически значимого негативного эффекта на большинство параметров (см. табл. 2).

Напротив, воздействие низкотемпературной плазмы на растения ячменя в фазу выхода в трубку было менее выражено по сравнению с воздействием на более ранних стадиях развития. Это можно объяснить меньшей чувствительностью данной стадии органогенеза. Также наблюдалась тенденция к увеличению числа продуктивных стеблей и числа зерен с бокового стебля. Однако воздействие в фазу выхода в трубку не оказало статистически значимого негативного эффекта на исследуемые параметры (табл. 3).

Таблица 3/ Table 3

Морфофизиологические показатели и структура урожая ячменя сорта Владимир в фазе полной спелости обработки низкотемпературной плазмой в фазе развития *выход в трубку*
Morphophysiological parameters and yield structure of spring barley cv. Vladimir (full ripeness stage) after low-temperature plasma treatment in *booting* stage

Показатель/ Parameter	Длительность обработки плазмой/ Plasma treatment duration					
	Контроль/ Control		15 мин (1/2 дозы)/ 15 min (1/2 dose)		30 мин (max доза)/ 30 min (max dose)	
	X	±m	X	±m	X	±m
Высота растения, см Plant height, cm	54,75	0,90	56,15	1,19	56,53	0,77
Длина колоса, см Ear length, cm	7,75	0,20	7,70	0,18	7,83	0,24
Общее число стеблей, шт. Total stem numbers	1,75	0,12	1,90	0,16	1,75	0,12
Число продуктивных стеблей с колосом, шт. Number of productive stems	1,60	0,11	1,80	0,16	1,65	0,13
Число колосков в колосе главного стебля, шт. Number of spikelets per main stem ear	21,35	0,50	21,35	0,51	21,75	0,48
Число зерен в колосе главного стебля, шт. Grain numbers per main stem ear	16,25	0,59	15,25	0,46	15,50	0,55
Масса зерен с колоса главного стебля, г Grain weight per main stem ear, g	0,87	0,03	0,83	0,03	0,85	0,03
Число зерен в колосе бокового стебля, шт. Grain numbers per lateral stem ear	7,60	1,68	9,65	1,89	8,80	1,84
Масса зерен с колоса бокового стебля, г Grain weight per lateral stem ear, g	0,31	0,07	0,30	0,07	0,28	0,07
Масса корня, г Root weight, g	0,27	0,03	0,27	0,03	0,24	0,03

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных в условиях вегетационного эксперимента исследований установлено, что с увеличением времени обработки низкотемпературной плазмой наблюдаются негативные эффекты физиологического состояния растений. Воздействие в течение 30 мин в фазу 3-го листа снижало высоту растений на 7 % ($p < 0,05$), а воздействие в фазу кущения снижало массу корней растений ячменя относительно контрольных растений на 39 % ($p < 0,01$). Воздействие в фазу выхода в трубку не оказало статистически значимого негативного эффекта на исследуемые параметры. Таким образом, эффективность воздействия нетермальной плазмы зависела от фазы органогенеза ячменя. На ранних стадиях эффективность воздействия была выше. Воздействие в течение 15 мин на растения ячменя в критический период развития (фаза 3-го листа) приводило к увеличению массы корней растений на 77,8 % ($p < 0,05$) по сравнению с контрольными растениями. А после облучения в фазу кущения увеличивалось число колосков в колосе главного стебля на 18,5 % при обработке в течение 15 мин ($p < 0,001$) и 11,17 % после 30 мин воздействия ($p < 0,05$). Подобный стимулирующий эффект может быть полезен с целью повышения урожайности ячменя.

References / Библиографический список

1. Attri P, Ishikawa K, Okumura T, Koga K, Shiratani M. Plasma agriculture from laboratory to farm: A review. *Processes*. 2020; 8(8):1002. doi: 10.3390/pr8081002
2. Ito M, Oh JS, Ohta T, Shiratani M, Hori M. Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies. *Plasma Processes and Polymers*. 2018; 15(2):1700073. doi: 10.1002/ppap.201700073
3. Niemira BA. Cold plasma decontamination of foods. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2012; 3(1):125—142. doi: 10.1146/annurev-food-022811-101132
4. Guo J, Huang K, Wang J. Bactericidal effect of various non-thermal plasma agents and the influence of experimental conditions in microbial inactivation: A review. *Food Control*. 2015; 50:482—490. doi: 10.1016/j.foodcont.2014.09.037
5. Mravlje J, Regvar M, Vogel-Mikuš K. Development of cold plasma technologies for surface decontamination of seed fungal pathogens: present status and perspectives. *Journal of Fungi*. 2021; 7(8):650. doi: 10.3390/jof7080650
6. Park Y, Oh KS, Oh J, Seok DC, Kim SB, Yoo SJ, et al. The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley. *Plasma Processes and Polymers*. 2018; 15(2):1600056. doi: 10.1002/ppap.201600056
7. Pizá MCP, Prevosto L, Zilli C, Cejas E, Kelly H, Balestrasse K. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018; 49:82—91. doi: 10.1016/j.ifset.2018.07.009
8. 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; 38(5):989—1001. doi: 10.1007/s11090-018-9916-0
9. Štěpánová V, Slavíček P, Kelar J, Prášil J, Smékal M, Stupavská M, et al. Atmospheric pressure plasma treatment of agricultural seeds of cucumber (*Cucumis sativus* L.) and pepper (*Capsicum annuum* L.) with effect on reduction of diseases and germination improvement. *Plasma Processes and Polymers*. 2017; 15(2):1700076. doi: 10.1002/ppap.201700076
10. Holubová L, Švubová R, Slováková L, Bokor B, Chobotová Kročková V, Renčko J, et al. Cold atmospheric pressure plasma treatment of maize grains—induction of growth, enzyme activities and heat shock proteins. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; 22(16):8509. doi: 10.3390/ijms22168509

11. Darmanin M, Fröhling A, Bußler S, Durek J, Neugart S, Schreiner M, et al. Aqueous and gaseous plasma applications for the treatment of mung bean seeds. *Scientific Reports*. 2021; 11(1):19681. doi: 10.1038/s41598-021-97823-1
12. Abarghuei FM, Etemadi M, Ramezani A, Esehaghbeygi A, Alizargar J. An application of cold atmospheric plasma to enhance physiological and biochemical traits of basil. *Plants*. 2021; 10(10):2088. doi: 10.3390/plants10102088
13. Waskow A, Butscher D, Oberbossel G, Klöti D, Rudolf von Rohr P, Büttner-Mainik A, et al. Low-energy electron beam has severe impact on seedling development compared to cold atmospheric pressure plasma. *Scientific Reports*. 2021; 11(1):16373. doi: 10.1038/s41598-021-95767-0
14. Zadoks JC, Chang TT, Konzak CF. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*. 1974; 14(6):415–421. doi: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x
15. Tottman DR. The decimal code for the growth stages of cereals, with illustrations. *Annals of applied biology*. 1987; 110(2):441–454. doi: 10.1111/j.1744-7348.1987.tb03275.x
16. Tikhonov VN, Aleshin SN, Ivanov IA, Tikhonov AV. The low-cost microwave plasma sources for science and industry applications. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; 927(1):012067. doi: 10.1088/1742-6596/927/1/012067
17. Ivanov IA, Tikhonov VN, Tikhonov AV. Microwave complex for obtaining low-temperature plasma at atmospheric pressure. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1393(1):012042. doi: 10.1088/1742-6596/1393/1/012042

Об авторах:

Петрухина Дарья Игоревна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 249032, Российская Федерация, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; e-mail: daria.petrukhina@outlook.com

ORCID 0000-0002-5790-9958

Тхорик Оксана Владимировна — научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 249032, Российская Федерация, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; e-mail: oxana.tkhorik@gmail.com

ORCID 0000-0001-5213-2150

Шишко Валентин Игоревич — научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 249032, Российская Федерация, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; e-mail: valentine585@yandex.ru

ORCID 0000-0002-0526-0579

Харламов Владимир Александрович — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 249032, Российская Федерация, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; e-mail: kharlamof@gmail.com

ORCID 0000-0003-3479-1800

Цыгвинцев Павел Николаевич — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 249032, Российская Федерация, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; e-mail: paul-gomel@mail.ru

ORCID 0000-0003-0214-7447

About authors:

Petrukhina Daria Igorevna — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 109 km Kievskoe ave., Obninsk, Kaluga region, 249032, Russian Federation; e-mail: daria.petrukhina@outlook.com ORCID 0000-0002-5790-9958

Tkhorik Oksana Vladimirovna—Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 109 km Kievskoe ave., Obninsk, Kaluga region, 249032, Russian Federation; e-mail: oxana.tkhorik@gmail.com

ORCID 0000–0001–5213–2150

Shishko Valentin Igorevich—Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 109 km Kievskoe ave., Obninsk, Kaluga region, 249032, Russian Federation; e-mail: valentine585@yandex.ru

ORCID 0000–0002–0526–0579

Kharlamov Vladimir Aleksandrovich—Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 109 km Kievskoe ave., Obninsk, Kaluga region, 249032, Russian Federation; e-mail: kharlamof@gmail.com

ORCID 0000–0003–3479–1800

Tsygvintsev Pavel Nikolayevich—Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 109 km Kievskoe ave., Obninsk, Kaluga region, 249032, Russian Federation; e-mail: paul-gomel@mail.ru

ORCID 0000–0003–0214–7447