

ВЛИЯНИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МЭВ НА РОСТ ПАТОГЕНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

¹А.А. Малюга, ¹Н.С. Чуликова, ^{2,3}У.А. Близнюк, ^{2,3}А.П. Черняев, ^{2,3,4}П.Ю. Борщеговская, ³Д.С. Юров, ^{2,3}Я.В. Зубрицкая, ³В.С. Ипатова, ²П.А. Шимко, ^{4,5}И.А. Родин

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Краснообск, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Россия

E-mail: anna_malyuga@mail.ru

Для цитирования: Влияние ускоренных электронов с энергией 1 МэВ на рост патогенов сельскохозяйственных растений / А.А. Малюга, Н.С. Чуликова, У.А. Близнюк, А.П. Черняев, П.Ю. Борщеговская, Д.С. Юров, Я.В. Зубрицкая, В.С. Ипатова, П.А. Шимко, И.А. Родин // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2025. – № 1(74). – С. 47–58. – DOI 10.31677/2072-6724-2025-74-1-47-58.

Ключевые слова: мицелий, патогенные грибы, диаметр колоний, радиационная обработка, ускоренные электроны, защита растений.

Реферат. Показано, что на третьи сутки после посева на питательную среду высечек из прошедшего облучение низкоэнергетическими ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ в диапазоне доз от 100 Гр до 10 000 Гр мицелиального мата грибов родов *Fusarium* и *Alternaria* наибольшее подавление роста большинства их штаммов наблюдали при облучении дозами от 5 000 Гр и выше. В среднем по дозе наименьший рост грибов отмечен при облучении дозой 5 000 Гр. В этом случае средний диаметр колоний у изученных штаммов составлял 9,7 мм, что на 74,6 % меньше, чем в контрольных образцах. Показано, что обработка пучком электронов привела к снижению диаметальной скорости роста для семи из двенадцати исследуемых штаммов фитопатогенов. Облучение мицелия грибов различных штаммов в дозах 100, 1 000 и 10 000 Гр подавляло их рост на 4–10, 13–39 и 62–63 % соответственно, в зависимости от вида гриба и его штамма. Для дозовых зависимостей диаметров колоний штаммов Г-4 и К-91 (*Fusarium* spp.), ТАН-1 (*Alternaria* spp.), Т-1 и Т-2 (*B. sorokiniana*) и ШК-25 и ШП-28 (*R. solani*) были получены явные аппроксимирующие сигмоидальные зависимости, свидетельствующие о различной радиочувствительности штаммов фитопатогенных грибов, обусловленной их морфологическими особенностями. Наиболее радиочувствительным показал себя штамм ШК-25 (*R. solani*), ингибирование роста колоний которого наблюдалось при облучении в дозе 1 000 Гр. Наименее радиочувствительными оказались штаммы ТАН-1 (*Alternaria* spp.), S-1 (*S. nodorum*) и К-7.2, К-21 и К-37 – *Fusarium* spp., ингибирование роста которых не наблюдалось даже при облучении в дозах 10 000 Гр.

THE EFFECT OF ACCELERATED ELECTRONS WITH AN ENERGY OF 1 MEV ON THE GROWTH OF AGRICULTURAL PLANT PATHOGENS

¹A.A. Malyuga, ¹N.S. Chulikova, ^{2,3}U.A. Bliznyuk, ^{2,3}A.P. Chernyaev, ^{2,3,4}P.Yu. Borshchegovskaya, ³D.S. Yurov, ^{2,3}Ya.V. Zubritskaya, ³V.S. Ipatova, ²P.A. Shimko, ^{4,5}I.A. Rodin

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Russia

²Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴Department of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵Department of Epidemiology and Evidence-Based Medicine, Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

E-mail: anna_malyuga@mail.ru

Keywords: mycelium, pathogenic fungi, colony diameter, radiation treatment, accelerated electrons, plant protection.

*Abstract. It was shown that on the third day after sowing on the nutrient medium of die-cuts from irradiated low-energy accelerated electrons with a maximum energy of 1 MeV in the dose range from 100 Gy to 10000 Gy mycelial mat of fungi of various strains of the genera *Fusarium* and *Alternaria*, the greatest suppression of the growth of most fungi was observed when irradiated at dose from 5000 Gy and above. On average, the smallest growth of fungi was observed at a dose of 5000 Gy. In this case, the average colony diameter of the studied strains was 9.7 mm, which is 74.6% less than in the control samples. It is shown that electron beam treatment led to a decrease in the diametrical growth rate for 7 of the 12 studied strains of phytopathogens. Irradiation of mycelium of fungi of various strains at doses of 100, 1000 and 10000 Gy suppressed their growth by 4-10, 13-39 and 62-63 %, respectively, depending on the type of fungus and its strain. For dose dependences of colony diameters of strains G-4 and K-91 *Fusarium* spp., TAN-1 *Alternaria* spp., T-1 and T-2 *B. sorokiniana* and SHK-25 and SHP-28 *R. solani*, explicit approximating sigmoidal dependences were obtained, indicating different radiosensitivity of strains of phytopathogenic fungi due to their morphological features. The most radiosensitive strain was SHK-25 (*R. solani*), the inhibition of colony growth of which was observed when irradiated at a dose of 1000 Gy. The least radiosensitive strains were TAN-1 (*Alternaria* spp.), S-1 (*S. nodorum*) and K-7.2, K-21 and K-37 – *Fusarium* spp., whose growth inhibition was not observed even when irradiated at doses of 10000 Gy.*

Одной из причин потерь урожая является поражение сельскохозяйственных культур различными видами заболеваний. Широкое распространение имеют такие болезни растений, как септориоз, корневая гниль, фузариоз, альтернариоз у пшеницы и ризоктониоз картофеля. Причиной их возникновения является наличие на семенном материале, растениях или в почве представителей грибов родов *Fusarium* и *Alternaria*, а также таких патогенов, как *Septoria nodorum* (*S. nodorum*), *Bipolaris sorokiniana* (*B. sorokiniana*) и *Rhizoctonia solani* (*R. solani*) [1–14].

Обеспечение экологической безопасности возделывания сельскохозяйственных культур предусматривает проведение защитных мероприятий, не наносящих вреда окружающей среде, с сохранением функций ее саморегулирования и быстрого восстановления [15]. В то время как химические методы защиты оказывают негативное влияние на агроценоз, а механические и биологические методы отличаются высокой трудоемкостью или малой эффективностью, физические методы, такие как применение ультразвука, электромагнитных полей и ионизирующих излучений, позволяют снижать численность вредных организмов в условиях защищенного грунта и проводить дезинсекцию семенного материала, минимизируя негативные последствия для окружающей среды [16–19]. Помимо этого, большой интерес вызывает применение излучения для стимуляции ростовых процессов и повышения устойчивости растений [20–21]. Согласно МАГАТЭ, эффективным физическим методом обработки как материалов, так и биологических объектов является обработка низкоэнергетическими ускоренными электронами и фотонами [22–23], поскольку их источники более безопасны по сравнению с радионуклидными и

имеют регулируемую мощность и более высокую производительность.

В силу разнообразия грибных патогенов и поражаемых ими сельскохозяйственных культур возникает необходимость исследования влияния ионизирующего излучения на чистые культуры фитопатогенов. При этом, с учетом акцента на переход к обработке с использованием ускорителей электронов, особый интерес представляет изучение влияния на грибы радиационной обработки с использованием низкоэнергетических электронов.

Целью исследований являлось изучение влияния различных доз обработки ускоренными электронами с энергией 1 МэВ на рост чистых культур возбудителей болезней сельскохозяйственных растений, таких как грибы *Fusarium* spp. и *Alternaria* spp., *Septoria nodorum* (*S. nodorum*), *Bipolaris sorokiniana* (*B. sorokiniana*) и *Rhizoctonia solani* (*R. solani*).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделение чистых культур грибов

В качестве объектов исследования использовали грибы родов *Fusarium* (штаммы Г-4, К-91, К-7.2, К-21, К-37), *Alternaria* (штаммы Е-1, ТАН-1), а также *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker (= *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kurib.) Drechsler ex Dastur) (штаммы Т-1, Т-2), *Septoria nodorum* (Berk.) Berk (= *Leptosphaeria nodorum* E. Muell., = *Phaeosphaeria nodorum* (E. Muell.) Hedjar.) (штамм S-1) и *Rhizoctonia solani* J.G. Kuhn (= *Thanatephorus cucumeris* (A.B. Frank) Donk.) (штаммы ШК-25, ШП-28), выделенные из пораженных листьев, стеблей и семян сельскохозяйственных растений, собранных в период 2021–2023 гг. в Новосибирской области. В процессе выделения

грибов пораженные части растений тщательно отмывали и обрабатывали 70%-м раствором этилового спирта для стерилизации от поверхностных сапрофитов. Далее стерильным скальпелем на границе здоровой и пораженной растительной ткани вырезали образцы тканей и закладывали на картофельно-декстрозный агар [24] или агар Чапека [24], в зависимости от типа гриба, с добавлением антибиотиков стрептомицина сульфата и хлорамфеникола (левомецитин натрия сукцинат) в концентрации 20 мг/л. Для идентификации родов и видов грибов использовали соответствующие определители [25–28].

Полученные чистые культуры грибов высевали на среду Чапека с добавлением стрептомицина

и хлорамфеникола, помещенную в стерильные пластиковые чашки Петри диаметром 30 мм, и далее инкубировали при температуре 25 °С в течение семи дней для последующего облучения.

Облучение чистых культур грибов ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ

Облучение чистых культур грибов в чашках Петри диаметром 30 мм ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ осуществляли с использованием линейного ускорителя электронов УЭЛР-1-25-Т-001 со средней мощностью пучка 25 кВт, спектр которого представлен на рис. 1.

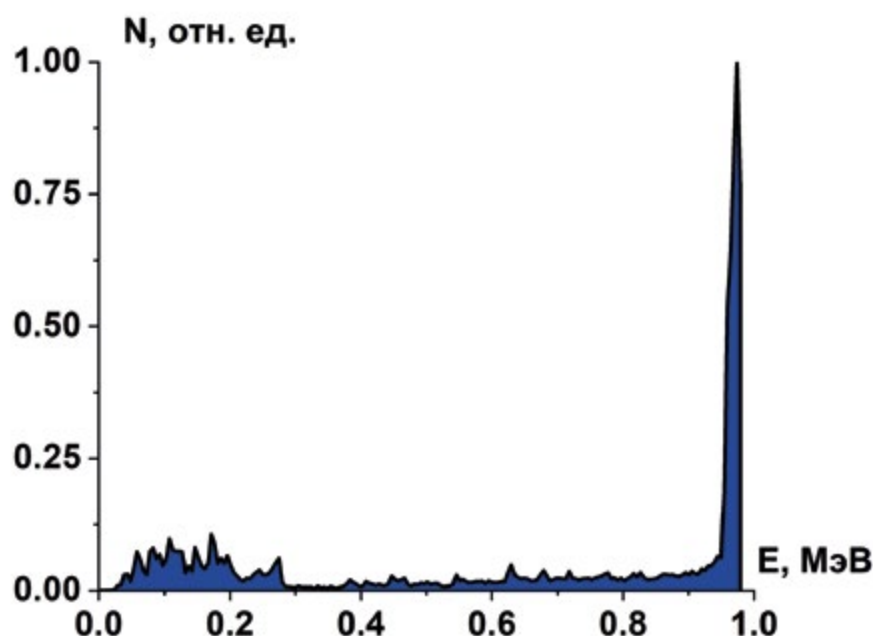


Рис. 1. Спектр линейного ускорителя электронов УЭЛР-1-25-Т-001
Spectrum linear electron accelerator of the WELR-1-25-T001

Для обеспечения равномерного облучения чистых культур фитопатогенов их выкладывали на дюралюминиевую пластину, расположенную на расстоянии 12 см от выхода пучка электронов, и облучали с двух противоположных сторон, по половине дозы облучения с каждой стороны. На рис. 2 представлено рассчитанное с помощью компьютерного моделирования с использованием программного кода Geant 4 [29] трехмерное распределение поглощенной дозы в цилиндре из воды, имитирующем питательную среду с мицелием. В ходе численных экспериментов моделировалось двухстороннее облучение водного фантома электронами, энергетический спектр которых со-

ответствовал спектру, представленному на рис. 1. Из рис. 2 видно, что однородность распределения поглощенной дозы в водном цилиндре, равная отношению максимального значения дозы к ее минимальному значению в объеме цилиндра, составила 0,75, что свидетельствует о высокой степени равномерности облучения электронами образцов мицелия.

Для контроля дозы, поглощенной образцами фитопатогенов, в ходе облучения фиксировали заряд $Q_{\text{эксп}}$, поглощенный частью дюралюминиевой пластины, не занятой образцами грибов, время экспозиции $t_{\text{облуч}}$ и ток пучка электронов I .

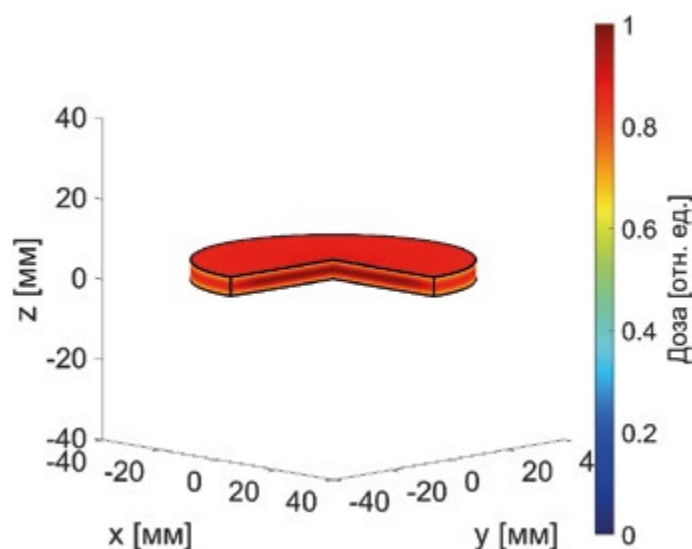


Рис. 2. Карта дозового распределения при облучении образца мицелия ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ

A map of the dose distribution during irradiation of a mycelium sample with accelerated electrons with a maximum energy of 1 MeV

Дозу, поглощенную образцами фитопатогенов, определяли с использованием дозиметрического раствора Фрикке [30], погрешность дозиметрии данного метода составляла 12 %. Облучение дозиметрического раствора объемом 3 мл в чашках Петри диаметром 30 мм проводили в соответствии со схемой облучения чистых культур фитопатогенов, ток пучка при облучении дозиметрического раствора составил 80 нА. Было получено, что мощность дозы, поглощенной дозиметрическим раствором, при облучении пучком электронов при токе пучка 80 нА составила $(0,6 \pm 0,1)$ Гр/с. Дозы, поглощенные образцами фитопатогенов в ходе облучения, рассчитывались,

исходя из предположения о линейном возрастании заряда, поглощенного дюралюминиевой пластиной, от времени облучения образцов, а также о линейном возрастании мощности дозы, поглощенной образцами, с возрастанием тока пучка электронов. Данные о значениях заряда $Q_{\text{эксп}}$, поглощенного дюралюминиевой пластиной, времени экспозиции $t_{\text{облуч}}$, тока пучка электронов I и дозы, поглощенной образцами, представлены в табл. 1. Погрешность определения поглощенной дозы составляла 15 %. Облучение проводилось при температуре 20 °С, необлученные образцы фитопатогенов находились в тех же температурных условиях, что и облучаемые.

Таблица 1

Данные облучения чистых культур грибов в дозах 100–10000 Гр
на линейном ускорителе электронов УЭЛР-1-25-Т-001
Data on irradiation of pure fungal cultures at doses of 100–10,000 Gy
on the UELR-1-25-T-001 linear electron accelerator

Сеанс облучения		$t_{\text{облуч'}}$, с,	$D_{\text{Фрикке}}^{\text{изм}}$ Гр	$D_{\text{расч'}}$	$Q_{\text{эксп'}}$, нКл	I , нА
1	1 (доза 1)	77/85	50/50	6575/6555	80	
	2 (доза 1)	92/101	50/50	6570/6540	80	
2	3 (доза 2)	88/112	500/500	65430/65790	800	
	4 (доза 2)	98/110	500/500	65670/65550	800	
3	5 (доза 3)	198/210	2500/2500	326700/326060	1800	
	6 (доза 3)	190/217	2500/2500	326800/326146	1800	
4	7 (доза 4)	129/115	5000/5000	654500/657100	7000	
	8 (доза 4)	105/116	5000/5000	653800/654300	7000	

Образцы чистых культур фитопатогенов облучались в дозах 100, 1 000, 5 000 и 10 000 Гр для изучения влияния ускоренных электронов на рост двенадцати штаммов грибов различных видов в широком диапазоне доз. Для каждой дозы проводили по 2 сеанса облучения, в ходе которых на дюралюминиевую пластину выкладывали по 6 образцов чистых культур грибов различных штаммов. Всего было проведено 8 сеансов обработки пучком электронов.

Оценка влияния радиационной обработки ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ на чистые культуры грибов

После облучения из мицелиального мата каждого штамма различных видов грибов пробочным сверлом вырезали пять дисков диаметром 5 мм и раскладывали на среду Чапека с добавлением стрептомицина и хлорамфеникола. Далее проводили мониторинг роста грибов путем измерения диаметра колоний на 3, 5 и 7-й день после высева. Температура инкубации составляла 25 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходя из данных замеров с третьих по седьмые сутки диаметров колоний грибов, выращенных из облученных и необлученных образцов мицелия, можно сказать, что полученные значения различались как для грибов разных штаммов, так и для отдельных штаммов одного вида гриба (табл. 2). Рост мицелия для пяти из рассматриваемых штаммов на седьмые сутки был ограничен размерами чашек Петри. Рост диаметров колоний штамма *Fusarium* spp. – Г-4 и штамма *R. solani*– ШП-28 был значительно замедлен при их облучении дозой 1 000 Гр – диаметры их колоний были отличны от нуля только при замере на пятые сутки после высева.

Анализ динамики роста колоний грибов показал, что зависимости их диаметров от времени, прошедшего после высева на питательную среду, имели линейный вид. На рис. 3 представлены зависимости диаметров колоний штамма К-7.2 гриба рода *Fusarium*, выращенного из облученных различными дозами чистых культур фитопатогена, от времени измерения с третьих по седьмые сутки после посева.

Таблица 2

Влияние различных доз ионизирующего излучения на рост чистых культур грибов возбудителей болезней сельскохозяйственных культур
The effect of different doses of ionizing radiation on the growth of pure cultures of fungi causing diseases of agricultural crops

Вариант	Диаметр колоний грибов, мм												Средние по дозе
	<i>Fusarium</i> spp.					<i>Alternaria</i> spp.		<i>B. sorokiniana</i>		<i>R. solani</i>		<i>S. nodorum</i>	
	Г-4	К-91	К-21	К-7.2	К-37	Е-1	ТАН-1	Т-1	Т-2	ШК-25	ШП-28	С-1	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Третьи сутки													
Контроль	33,0	40,3	45,0	32,0	49,3	29,0	28,3	41,0	45,0	16,0	1,6	41,7	34,8
100 Гр	29,3	39,3	40,7	21,3	48,0	28,7	25,7	43,5	43,3	15,7	18,3	22,0	31,3
1000 Гр	0	29,7	34,0	25,7	48,0	27,7	26,3	31,3	31,7	0	0	30,0	23,7
5000 Гр	0	0	0	21,7	45,0	24,3	0	0	0	0	0	25,7	9,7
10000 Гр	0	0	32,5	36,5	48,3	32,7	0	0	0	0	0	25,0	14,6
НСР _{0,5}	1,2	1,1	3,6	3,1	2,9	2,5	1,6	1,7	2,6	0,5	1,3	1,7	
Пятые сутки													
Контроль	55,3	66,7	90,0	54,3	80,0	51,0	45,7	72,3	74,5	25,5	28,0	67,0	59,2
100 Гр	54,7	67,0	80,0	38	80,0	53,8	43,0	69,0	70,7	26,3	29,0	33,0	53,7
1000 Гр	35,0	56,0	90,0	44,5	77,7	46,3	43,3	61,7	51,3	0	6,3	39,0	45,9
5000 Гр	0	0	0	38	71,0	40,7	0	0	0	0	0	33,0	15,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
10000 Гр	0	0	76,5	58,5	79,3	52,7	0	0	0	0	0	34,3	25,1
НСР _{0,5}	1,0	2,2	2,0	3,7	2,1	4,0	1,3	1,5	3,4	1,3	2,3	3,7	
Седьмые сутки													
Контроль	78,0	90,0	–	71,7	90,0	62,8	62,7	90,0	90,0	36,7	40,0	90,0	72,9
100 Гр	80,7	90,0	–	57,3	90,0	61,3	58,7	85,0	88,3	35,7	40,0	36,0	70,6
1000 Гр	60,0	83,5	–	62,3	90,0	57,7	60,0	85,0	68,5	0	17,0	45,0	61,3
5000 Гр	0	0	–	58,3	90,0	57,0	0	0	0	0	0	35,7	26,8
10000 Гр	0	0	–	77,5	90,0	63,0	0	0	0	0	0	35,0	29,1
НСР _{0,5}	1,7	1,2	–	4,3	0	3,4	1,3	5,7	2,6	2,5	2,8	4,2	

Для анализа влияния дозы облучения на диаметральную скорость роста фитопатогенов различных штаммов в ходе исследования рассчитывали значения диаметральных скоростей роста колоний грибов, выращенных из облученных в различных дозах образцов мицелия, по углу наклона аппроксимирующих кривых зависимостей

диаметров их колоний от времени наблюдения (см. рис. 3). Приведенная ниже цветовая карта отражает величины полученных значений диаметральной скорости роста фитопатогенов в мм/сутки от дозы облучения чистых культур грибов различных штаммов (рис. 4).

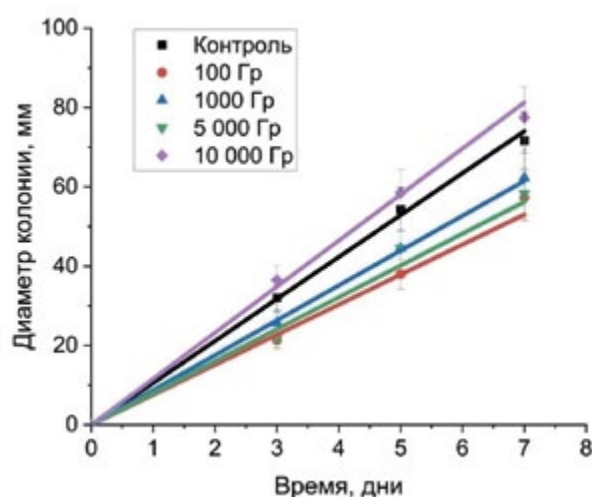


Рис. 3. Аппроксимирующие прямые для зависимостей диаметров колоний от полученной дозы излучения для штамма К-7.2 гриба рода *Fusarium*

Approximating lines for the dependences of colony diameters on the received radiation dose for strain K-7.2 of the fungus of the genus *Fusarium*

Можно отметить, что наибольшее подавляющее воздействие ускоренных электронов в диапазоне доз от 100 Гр до 10 000 Гр было оказано на штамм ШК-25 (*R. solani*), рост которого был ингибирован при облучении в дозах от 1 000 Гр и выше. Облучение дозами 5 000 и 10 000 Гр ингибировало рост штаммов Г-4 и К-91 (*Fusarium* spp.), ТАН-1 (*Alternaria* spp.), а также ШП-28 (*R. solani*) и двух изученных штаммов гриба *B. sorokiniana*. Для штамма К-21 (*Fusarium* spp.), однако, ингибирование роста колоний происходило исключительно при их обработке в дозе 5 000 Гр. Явное снижение диаметральной скорости

роста колоний с увеличением дозы наблюдалось при облучении штамма S-1 (*S. nodorum*). Следует отметить, что облучение пучком электронов в дозах до 10 000 Гр штамма Е-1 (*Alternaria* spp.) и штаммов К-37, К-7.2 (*Fusarium* spp.) в дозах до 10 000 Гр не привело к снижению диаметральной скорости роста колоний культур фитопатогенов. Более того, обработка в дозе 10 000 Гр стимулировала рост штаммов Е-1 и К-7.2 (*Fusarium* spp.) по сравнению с необлученными образцами. Полученные результаты свидетельствуют о различной радиорезистентности грибов не только разных видов, но и различных штаммов.

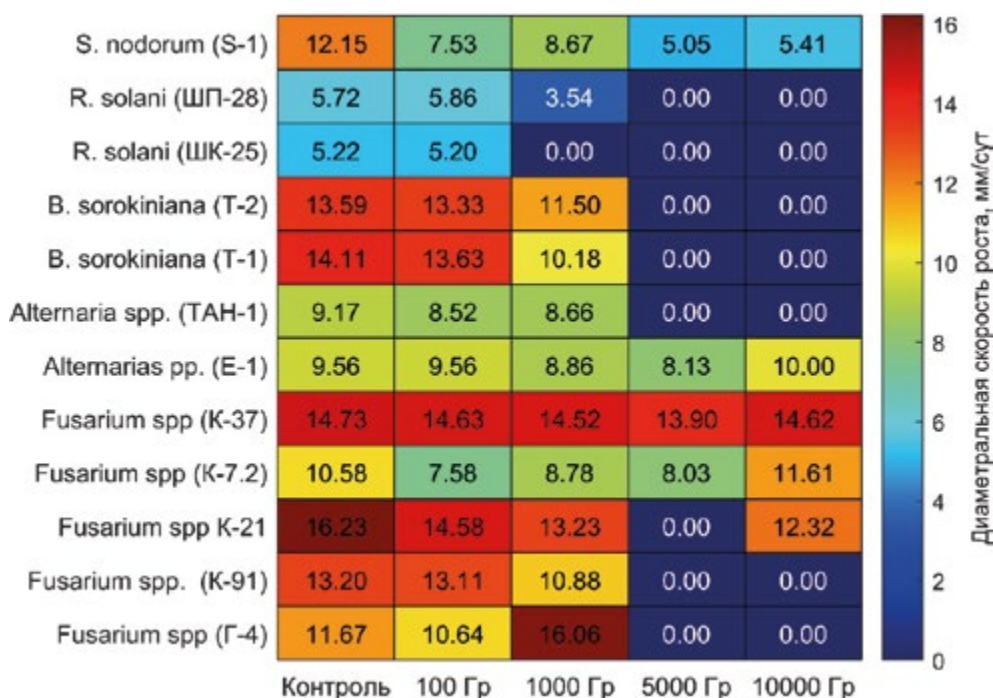


Рис. 4. Показатели диаметральных скоростей роста колоний грибов, выращенных из чистых культур грибов различных штаммов, облученных в различных дозах
Indicators of diametrical growth rates of fungal colonies grown from pure cultures of fungi of various strains irradiated at various doses

Для анализа зависимостей диаметров колоний грибов от дозы облучения, поглощенной чистыми культурами фитопатогенов, были выбраны данные диаметров колоний грибов, зафиксированные на пятый день наблюдений, так как к седьмым суткам дальнейший рост некоторых грибов был ограничен размерами чашек Петри.

В результате анализа данных зависимостей диаметра колоний от дозы облучения было установлено, что дозовые зависимости их диаметров (штаммы Г-4, К-91, ТАН-1, Т-1, Т-2, ШК-25, ШП-28) имеют сигмоидальный характер (рис. 5).

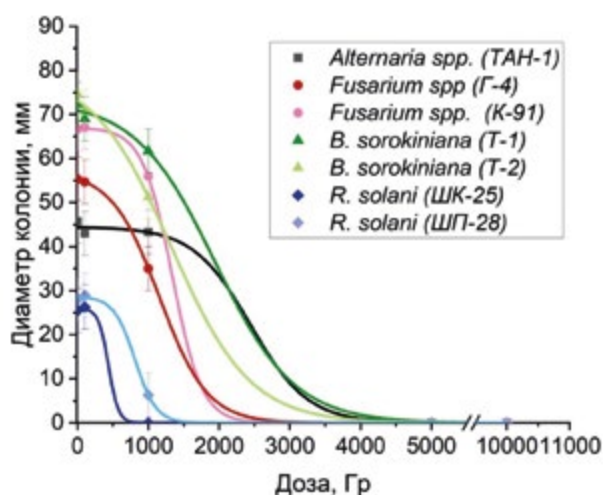


Рис. 5. Дозовые зависимости диаметров колоний грибов от дозы облучения чистых культур фитопатогенов (символы) и соответствующие им зависимости (линии)
Dose dependences of the diameters of fungal colonies on the radiation dose of pure phytopathogen cultures (symbols) and their corresponding dependences (lines)

Сигмоидальный характер зависимостей, представленных на рис. 5, может быть объяснен, исходя из вероятностной модели радиационного поражения клетки [31], согласно которой ингибирование роста отдельно взятой клетки гриба в колонии зависит не только от вероятности поражения ее критических структур, но и от радиочувствительности отдельных клеток мицелиального мата, представляющих собой статистический ансамбль клеток с различной радиорезистентностью. Следует отметить, что неоднородность радиочувствительности клеток гриба проявилась при высокой однородности облучения мицелиального мата, а также при высокой вероятности взаимодействия электронов с клетками культур мицелия, локализованного на поверхности питательной среды в ходе облучения пучком электронов.

Экспериментальные данные зависимостей диаметров колоний от дозы облучения аппроксимировались следующей зависимостью:

$$d(D) = \frac{a}{1 + e^{\frac{1}{\lambda}(D - D_{1/2})}},$$

где d – диаметр колонии; a – максимальное значение величины диаметральной скорости роста колоний; $1/\lambda$ – параметр, характеризующий ширину распределения функции; $D_{1/2}$ – доза, при которой диаметр колоний способных к росту грибов снижается вдвое.

Значения параметров сигмоидальных зависимостей, аппроксимированных по формуле, представлены в табл. 3. Следует отметить, что для штаммов К-7.2, К-21, К-37 (*Fusarium* spp.), штамма Е-1 (*Alternaria* spp.) и штамма S-1 (*S. nodorum*) явных зависимостей диаметров колоний от дозы выявлено не было.

Таблица 3

Значения коэффициентов функций аппроксимирующих сигмоидальных кривых
Values of coefficients of functions approximating sigmoidal curves

Штамм	a , мм	λ , Гр	$D_{1/2}$, Гр	R^2
<i>Fusarium</i> spp (Г-4)	57,124±0,004	338,62± 0,19	1155,32±0,03	1
<i>Fusarium</i> spp. (К-91)	67,0 ± 1,1	210 ± 30	1340±510	0,999
<i>B. sorokiniana</i> (Т-1)	73 ± 4	560 ± 390	1940 ±480	0,999
<i>B. sorokiniana</i> (Т-2)	80 ± 19	560 ± 60	1320±60	0,999
<i>R. solani</i> (ШК-25)	26,0 ± 0,8	70 ± 29	440± 230	0,999
<i>R. solani</i> (ШП-28)	28,7 ± 1,5	150 ± 19	810± 240	0,999
<i>Alternaria</i> spp. (ТАН-1)	44,5 ± 1,2	410 ± 70	2440± 230	0,998

Разницу в радиочувствительности фитопатогенов в зависимости от их морфологии подтверждают и другие научные работы. Так, в работе [32] при облучении ускоренными электронами спор грибов *B. cinerea*, *P. expansum* и *R. stolonifer* наиболее радиорезистентными оказались образцы *B. cinerea*, для полного подавления роста которых потребовалось их облучение в дозе 4 000 Гр, при этом ингибирующая развитие грибов *P. expansum* и *R. stolonifer* доза составила 2 000 Гр. В работе [33] для полного ингибирования роста грибов *Penicillium* spp., *Fusarium* spp. и *Aspergillus* spp. на семенах кукурузы потребовалось облучение ускоренными электронами с энергией 6 МэВ в

дозах 1 700, 2 500 и 4 800 Гр соответственно. Кривая выживаемости от дозы излучения для указанных грибов также имела сигмоидальный характер.

Анализ литературных данных показал, что воздействие ионизирующим излучением может также оказать стимулирующее влияние на рост грибов. В работе [34] облучение грибов рода *Alternaria* на семенах ясеня обыкновенного (*Fraxinus celsior* L.) в дозе 1 000 Гр увеличило долю зараженных ими семян на 67 %. Группой исследователей из университета Иешивы [35] был обнаружен феномен ускорения метаболизма

ряда микроскопических грибов под действием гамма-излучения за счет активации меланина.

ВЫВОДЫ

1. Радиационная обработка чистых культур грибов патогенов сельскохозяйственных растений ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ может как стимулировать, так и полностью подавлять рост мицелия.

2. Общий подавляющий эффект на рост изученных штаммов грибов оказало облучение в дозе 5 000 Гр, что приводило к снижению диаметров колоний на 66–67 % по сравнению с показателями необлученных культур фитопатогенов. Облучение исходного мицелия грибов штаммов в дозах 100, 1 000 и 10 000 Гр подавляло их рост на 4–10, 13–39 и 62–63 % соответственно в зависимости от вида гриба и его штамма.

3. Обработка пучком электронов привела к снижению диаметральной скорости роста для семи из двенадцати исследуемых штаммов фитопатогенов. Для дозовых зависимостей диаметров колоний штаммов Г-4 и К-91 (*Fusarium* spp.), ТАН-1 (*Alternaria* spp.), Т-1 и Т-2 (*B. sorokiniana*) и ШК-25 и ШП-28 (*R. solani*) были получены ап-

проксимирующие сигмоидальные зависимости, свидетельствующие о различной радиочувствительности штаммов фитопатогенных грибов, обусловленной их морфологическими особенностями.

4. Наиболее радиочувствительным показал себя штамм ШК-25 (*R. solani*), ингибирование роста колоний которого наблюдалось при облучении в дозе 1 000 Гр. Наименее радиочувствительными оказались штаммы ТАН-1 (*Alternaria* spp.), S-1 (*S. nodorum*) и К-7.2, К-21 и К-37 – *Fusarium* spp., ингибирование роста которых не наблюдалось даже при облучении в дозах 10 000 Гр.

5. Поскольку современные исследования свидетельствуют о перспективности предпосевной радиационной обработки семенного материала с целью улучшения фитопатогенного состояния семян и повышения их продуктивности, различная радиобиологическая чувствительность грибов различных видов и штаммов, поражающих сельскохозяйственные культуры, должна быть учтена при выборе оптимальных параметров радиационного воздействия при обработке семенного материала сельскохозяйственных культур.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-63-00075.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тупеневич С.М. Корневая гниль яровой пшеницы в засушливых районах Северного Казахстана и степных районах Западной Сибири // Корневые гнили хлебных злаков и меры борьбы с ними: Мат-лы конф. / Под ред. В.Ф. Пересыпкина. – М.: Колос, 1970. – С. 3–8.
2. Билай В.И. Фузариоз. – Киев: Наукова думка, 1977. – 442 с.
3. Foliar blight of wheat in Nepal: resistance breeding, epidemiology and disease management / D. Bhandari, M.R. Bhatta, E. Duveillier [et al.] // Proceedings of the Fourth International Wheat Tan Spot and Spot Blotch Workshop. July 21–24, 2002.
4. Terentjeva I. Evaluation of genetic resources of wheat and barley from Far East of Russia for resistance to *Fusarium* head blight / T.Y. Gagkaeva, M.M. Levitin, E. Zuev [et al.] // Journal of Applied Genetics 43A. – 2002. – Vol. 22. – P. 9–236.
5. *Indefungorum* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.indexfungorum.org/> (дата обращения: 15.09.2023).
6. Заикин Б.А. Борьба с болезнями картофеля требует комплексного подхода // Картофель и овощи. – 2003. – № 3. – С. 25–27.
7. Иванюк В.Г., Александров О.Т. Особенности проявления ризоктониоза картофеля в Белоруссии // Микология и фитопатология. – 2000. – № 34, Т. 5. – С. 51–59.
8. Учебно-методическое пособие по диагностике основных грибных болезней хлебных злаков / Т.И. Ишкова, Л.И. Берестецкая, Е.Л. Гасич [и др.]. – СПб., 2001. – 73 с.
9. Лейченко С.В. Морфолого-культуральные признаки и патогенность *Rhizoctonia solani* Kueh. из различных экологических районов страны // Селекция и семеноводство картофеля. М., 1985. – С. 86–92.
10. Малюга А.А., Коняева Н.М., Енина Н.Н. Система защиты картофеля от болезней и вредителей в Новосибирской области: Практик. руководство. – Новосибирск, 2003. – 140 с.
11. Пересыпкин В.Ф. Атлас болезней полевых культур. – Киев: Урожай, 1981. – 248 с.
12. Санина А.А., Анциферова Л.В. Видовой состав грибов рода *Septoria* Sacc. на пшенице в Европейской части СССР / Микология и фитопатология. – 1991. – Т. 25. – Вып. 3. – С. 250–252.

13. Чумаков А.Е., Захарова Т.И. Вредоносность болезней сельскохозяйственных культур. – М.: Агропромиздат, 1990. – 127 с.
14. Шпилова Н.П. Видовой состав и биоэкологические особенности возбудителей фузариоза семян зерновых культур: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – СПб., 1994. – 23 с.
15. Санин С.С. Стратегия современной защиты растений при интенсивном зернопроизводстве // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3(66). – С. 35–39.
16. Илларионов А.И. Современные методы защиты растений: учеб. пособие. – Воронеж, 2018. – 307 с.
17. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В. Перспективы развития методов и технических средств защиты сельскохозяйственных растений // Агроинженерия. – 2021. – № 1(101). – С. 26–35.
18. Magnetic field stimulation effect on germination and antioxidant activities of presown hybrid seeds of sunflower and its seedlings / S.A. Bukhari [et al.] // Journal of Food Quality. – 2021. – Vol. 2021, № 1. – P. 5594183. – DOI: 10.1155/2021/5594183.
19. The influence of physical treatments on seed germination and seedling development of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) / S.M. Singeorzan [et al.] // Forests. – 2022. – Vol. 13, № 9. – P. 1498. – DOI: 10.3390/813091498.
20. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants / S.V. Gudkov [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2019. – Vol. 202. – P. 8–24. – DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.02.001.
21. Volkova P.Y., Bondarenko E.V., Kazakova E.A. Radiation hormesis in plants // Current Opinion in Toxicology. – 2022. – Vol. 30. – P. 100334.
22. Liou J. Streamlining Food Pest Control Through Irradiation. Applications of Accelerators and Other Sources of Ionizing Radiation. May, 2022. – Vol. 63-2. – URL: <https://www.iaea.org/bulletin/streamlining-food-pest-control-through-irradiation>. – (дата обращения: 20.10.2024).
23. Madsen M. Industrial Irradiation for a Better World. Applications of Accelerators and Other Sources of Ionizing Radiation. May, 2022. Vol. 63-2. – URL: <https://www.iaea.org/bulletin/industrial-irradiation-for-a-better-world>. – (дата обращения: 18.01.2024).
24. ГОСТ 12044–93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. Издание официальное. Agricultural seeds. Methods for determination of disease infestation. М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2011. – С. 162.
25. Пидопличко М.Н. Грибы-паразиты культурных растений: определитель. Т. 3. Пикнидиальные грибы. – Киев: Наукова думка, 1978. – 232 с.
26. Самтон Д., Фотергилл А., Ринальди М. Определитель патогенных и условно патогенных грибов. – М.: Мир. – 2001. – 486 с.
27. Шпилова Н.П., Иващенко В.Г. Систематика и диагностика грибов рода *Fusarium* на зерновых культурах. – СПб., 2008. – 84 с.
28. Ганнибал Ф.Б. Мониторинг альтернариозов сельскохозяйственных культур и идентификация грибов рода *Alternaria*. – СПб., 2011. – 70 с.
29. Geant4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. – Vol. 506, Issue 3. – P. 250–303.
30. ASTM. Standard practice for using the Fricke reference-standard dosimetry system. – 2006.
31. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения): учеб. для студентов вузов. – М.: Фарматлит, 2024. – 442 с.
32. Effects of ionizing radiation on postharvest fungal pathogens / R.D. Jeong [et al.] // The plant pathology journal. – 2015. – Vol. 31, № 2. – P. 176.
33. Inactivation effect of electron beam irradiation on fungal load of naturally contaminated maize seeds / M.R. Nemțanu [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2014. – Vol. 94, № 13. – P. 2668–2673.
34. Влияние ионизирующего излучения на развитие патогенных грибов рода *Alternaria* на семенах ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.) / А.Н. Раздайковин [и др.] // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы. – 2018. – С. 114–117.
35. Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi / E. Dadachova [et al.]. – PLoS One. – 2007. – № 2(5). – e457. – DOI: 10.1371/journal.pone.0000457. – PMID 17520016.

REFERENCES

1. Tupenevich S.M., Kornevye gnili khlebnykh zlakov i mery bor'by s nimi (Root rot of cereals and measures to combat them), Proceedings of the Conference Title, Moscow: Kolos, 1970, pp. 3–8. (In Russ.)
2. Bilai V.I., Fuzarii (Fusarium), Kiev: Naukova dumka, 1977, 442 p.

3. Bhandari D., Bhatta M.R., Duvellier E. [et al.], Foliar blight of wheat in Nepal: resistance breeding, epidemiology and disease management, *Proceedings of the Fourth International Wheat Tan Spot and Spot Blotch Workshop*, July 21–24, 2002.
4. Gagkaeva T.Y., Levitin M.M., Zuev E. [et al.], Terentjeva I. Evaluation of genetic resources of wheat and barley from Far East of Russia for resistance to *Fusarium* head blight, *Journal of Applied Genetics* 43A, 2002, Vol. 22, pp. 9–236.
5. <http://www.indexfungorum.org>
6. Zaikin B.A., *Kartofel' i ovoshchi*, 2003, No. 3. pp. 25–27. (In Russ.)
7. Ivanyuk, V.G., Aleksandrov O.T., *Mikologiya i fitoptologiya*, 2000, No. 34(5), pp. 51–59. (In Russ.)
8. Ishkova T.I., Berestetskaya L.I., Gasich E.L. i dr., *Uchebno-metodicheskoe posobie po diagnostike osnovnykh gribnykh boleznei khlebnnykh zlakov* (Educational and methodological guide for the diagnosis of the main fungal diseases of cereals), Sankt-Peterburg: VIZR, 2001, 73 p.
9. Leichenkova S.V., *Selektsiya i semenovodstvo kartofelya* (Potato breeding and seed production), Moscow, 1985, pp. 86–92.
10. Malyuga A.A., Konyaeva N.M., Enina N.N., *Sistema zashchity kartofelya ot boleznei i vrediteli v Novosibirskoi oblasti* (Potato protection system against diseases and pests in the Novosibirsk region), Novosibirsk, 2003, 140 p.
11. Peresypkin V.F., *Atlas boleznei polevykh kul'tur* (Atlas of diseases of field crops), Kiev: Urozhai, 1981, 248 p.
12. Sanina A.A., Antsiferova L.V., *Mikologiya i fitopatologiya*, 1991, Vol. 25, No. 3, pp. 250–252. (In Russ.)
13. Chumakov A.E., Zakharova T.I., *Vredonosnost' boleznei sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (The harmfulness of diseases of agricultural crops), Moscow: Agropromizdat, 1990, 127 p.
14. Shipilova N.P., *Vidovoi sostav i bioekologicheskie osobennosti vzbuditelei fuzarioza semyan zernovykh kul'tur* (Species composition and bioecological features of the causative agents of fusarium of grain seeds), Abstract of candidate's dissertation, Sankt-Peterburg, 1994, 23 p.
15. Sanin S.S., *Vestnik OrelGAU*, 2017, No. 3(66), pp. 35–39. (In Russ.)
16. Illarionov A.I., *Sovremennye metody zashchity rastenii* (Modern methods of plant protection), Voronezh, 2018, 307 p.
17. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eshchin A.V., *Agroinzhenneriya*, 2021, No. 1(101), pp. 26–35. (In Russ.)
18. Bukhari S.A. [et al.], Magnetic field stimulation effect on germination and antioxidant activities of presown hybrid seeds of sunflower and its seedlings, *Journal of Food Quality*, 2021, Vol. 2021, No. 1, pp. 5594183, DOI: 10.1155/2021/5594183.
19. Singeorzan S.M. [et al.], The influence of physical treatments on seed germination and seedling development of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.), *Forests*, 2022, Vol. 13, No. 9, pp. 1498, DOI: 10.3390/813091498.
20. Gudkov S.V. [et al.], Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants, *Journal of environmental radioactivity*, 2019, Vol. 202, pp. 8–24, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.02.001.
21. Volkova P.Y., Bondarenko E.V., Kazakova E.A., Radiation hormesis in plants, *Current Opinion in Toxicology*, 2022, Vol. 30, pp. 100334.
22. Liou J., *Streamlining Food Pest Control Through Irradiation. Applications of Accelerators and Other Sources of Ionizing Radiation*, May, 2022, Vol. 63, <https://www.iaea.org/bulletin/streamlining-food-pest-control-through-irradiation>.
23. Madsen M., *Industrial Irradiation for a Better World. Applications of Accelerators and Other Sources of Ionizing Radiation*, May, 2022, Vol. 63–2, <https://www.iaea.org/bulletin/industrial-irradiation-for-a-better-world>.
24. GOST 12044-93, *Semena sel'skokhozyaistvennykh kul'tur. Metody opredeleniya zarazhennosti boleznyami. Izdanie ofitsial'noe. Agricultural seeds. Methods for determination of disease infestation* (Seeds of agricultural crops. Methods for determining disease infection. The publication is official. Agricultural seeds. Methods for determining disease infection), Moscow: STANDARTINFORM, 2011, 162 p. (In Russ.)
25. Pidoplichko M.N., *Griby-parazity kul'turnykh rastenii: opredelitel'. T. 3. Pknidial'nye griby* (Fungi-parasites of cultivated plants: determinant. Vol. 3. Pycnidial fungi), Kiev: Naukova dumka, 1978, 232 p.
26. Satton D., Fotergill A., Rinal'di M., *Opredelitel' patogennykh i uslovno patogennykh gribov* (Determinant of pathogenic and conditionally pathogenic fungi), Moscow: Mir, 2001, 486 p.
27. Shipilova N.P., Ivashchenko V.G., *Sistematika i diagnostika gribov roda Fusarium na zernovykh kul'turakh* (Systematics and diagnostics of fungi of the genus *Fusarium* on grain crops), Sankt-Peterburg, 2008, 84 p.
28. Gannibal F.B., *Monitoring al'ternariozov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur i identifikatsiya gribov roda Alternaria* (Monitoring of crop alternarioses and identification of fungi of the genus *Alternaria*), Sankt-Peterburg, 2011, 70 p.
29. Agostinelli S. [et al.], Geant4 – a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, Vol. 506, No. 3, pp. 250–303.
30. ASTM. *Standard practice for using the Fricke reference-standard dosimetry system*, 2006.
31. Kudryashov Yu.B., *Radiatsionnaya biofizika (ioniziruyushchie izlucheniya)* (Radiation biophysics (ionizing radiation)), Moscow: Farmatlit, 2004, 412 p.

32. Jeong R.D. [et al.], Effects of ionizing radiation on postharvest fungal pathogens, *The plant pathology journal*, 2015, Vol. 31, No. 2, pp. 176.
33. Nemțanu M.R. [et al.], Inactivation effect of electron beam irradiation on fungal load of naturally contaminated maize seeds, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, Vol. 94, No. 13, pp. 2668–2673.
34. Razdaivodin A.N. i dr., *Radiatsionnye tekhnologii v sel'skom khozyaistve i pishchevoi promyshlennosti: sostoyanie i perspektivy* (Radiation technologies in agriculture and food industry: state and prospects), 2018, pp. 114–117.
35. Dadachova E. [et al.], Ionizing radiation changes the electronic properties of melanin and enhances the growth of melanized fungi, *PLoS One*, 2007, No. 2(5), e457, DOI: 10.1371/journal.pone.0000457, PMID 17520016.

Информация об авторах:

А.А. Мalyуга, доктор сельскохозяйственных наук,
 Н.С. Чуликова, кандидат сельскохозяйственных наук
 У.А. Близняк, доктор физико-математических наук
 А.П. Черняев, доктор физико-математических наук
 П.Ю. Борщеговская, кандидат физико-математических наук
 Д.С. Юров, кандидат физико-математических наук
 Я.В. Зубрицкая, программист 1 категории
 В.С. Ипатова, младший научный сотрудник
 П.А. Шимко, студент
 И.А. Родин, доктор химических наук

Contribution of the authors:

A.A. Malyuga, Doctor of Agricultural Sciences
 N.S. Chulikova, PhD in Agricultural Sciences
 Bliznyuk U.A., Doctor of Physics and Mathematics
 A.P. Chernyaev, Doctor of Physics and Mathematics
 P.Yu. Borshchegovskaya, PhD in Physics and Mathematics
 D.S. Yurov, PhD in Physics and Mathematics
 Ya.V. Zubritskaya, 1st category programmer
 V.S. Ipatova, junior research fellow
 P.A. Shimko, student
 Rodin I.A., Doctor of Chemistry

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.