

Научная статья
УДК: 633.14:632.482.31
DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-229-238



Сорта озимой ржи, умеренно устойчивые к спорынье

Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого, Киров, Россия

Автор, ответственный за переписку: Люция Муллаахметовна Щеклеина, immunitet@fanc-sv.ru

Актуальность. Спорынья зерновых культур (возбудитель гриб *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.) – прогрессирующее заболевание озимой ржи. Устойчивые к болезни сорта ржи отсутствуют, а селекционные методы защиты в РФ не разработаны.

Материалы и методы. Материалом для исследований послужили 97 сортов озимой ржи. Проведен биохимический анализ склероциев гриба, изучен состав и содержание эргоалкалоидов (ЭА) в склероциях *C. purpurea* из Кировской популяции, исследована связь между биометрией склероциев и содержанием ЭА, токсичностью и патогенностью *C. purpurea*. Применяли общеизвестные методы оценки устойчивости и анализа ЭА.

Результаты и выводы. Выделено 14 наименее поражаемых патогеном сортов: 'Флора', 'Кипрез', 'Графиня', 'Лика', 'Батист', 'Симфония', 'Гармония', 'Садко', 'Паром', 'Вираз', 'Саратовская 7', 'Волхова', 'Новая Эра', 'Подарок', которые могут быть использованы в селекции на устойчивость к спорынье. В склероциях *C. purpurea* идентифицированы три вида ЭА: эргокрестин, эрготамин и его стереоизомер эргокрестинин. Сорта 'Лика', 'Симфония' и 'Гармония' наименее поражаемы спорыньей, а формирующиеся на растениях этих сортов склероции не накапливают ЭА. Установлена достоверная ($r = 0,50-0,60$) зависимость между поражением и биометрическими показателями склероциев *C. purpurea*; между засоренностью зерна склероциями и их биометрией ($r = 0,63-0,78$). Выявлена слабая положительная связь ($r = 0,22$) между токсичностью и патогенностью *C. purpurea*. Обнаружена отрицательная связь между массой склероциев и накоплением в них ЭА ($r = -0,46$), что указывает на биологическую опасность мелких склероциев, попавших в семенные и продовольственные партии зерна.

Ключевые слова: *Secale cereale* L., *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul., искусственная инокуляция, поражение, засоренность, биометрия склероциев, корреляционные связи

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания согласно тематическому плану по проекту № 0767-2019-0095 «Разработка и внедрение фундаментальных научных инновационных подходов, ориентированных на изучение и использование разнообразия генетических ресурсов, создание адаптивных генисточников озимой ржи с комплексным сочетанием улучшенных параметров селекционно-ценных признаков; на создание сортов озимой ржи северного экотипа целевого использования с повышенной зимостойкостью, стабильной продуктивностью, устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессорам; на разработку технологии производства современных сортов для повышения эффективности использования их продуктивного потенциала с учетом изменения климатических условий и нарастания фитопатогенной нагрузки для укрепления продовольственной безопасности страны и создания продуктов здорового питания».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Щеклеина Л.М., Шешегова Т.К. Сорта озимой ржи, умеренно устойчивые к спорынье. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):229-238. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-229-238

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-229-238

Winter rye cultivars moderately resistant to ergot

Lucia M. Shchekleina*, Tatiana K. Sheshegova

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Corresponding author: Lucia M. Shchekleina, immunitet@fanc-sv.ru

Background. Cereal ergot caused by the fungus *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. is a progressive disease of winter rye. There are no rye cultivars resistant to the disease, and breeding methods of protection have not been developed in Russia.

Materials and methods. The material for the research included 97 winter rye cultivars. A biochemical analysis of the sclerotia of the fungus was carried out, the composition and content of ergot alkaloids (EA) in the sclerotia of *C. purpurea* from the Kirov population were studied, and the relationship between the biometry of sclerotia and the EA content, toxicity and pathogenicity of *C. purpurea* was analyzed. Well-known methods of resistance assessment and EA analysis were applied.

Results and conclusions. Fourteen cultivars least affected by the pathogen were identified: 'Flora', 'Kiprez', 'Grafinya', 'Lika', 'Batist', 'Simfoniya', 'Garmoniya', 'Sadko', 'Parom', 'Virazh', 'Saratovskaya 7', 'Volkhova', 'Novaya Era', and 'Podarok'. They can be used in breeding for ergot resistance. Three types of EA were identified in *C. purpurea* sclerotia: ergocristine, ergotamine, and its stereoisomer ergocristinine. Cvs. 'Lika', 'Simfoniya' and 'Garmoniya' were the least affected by ergot, and the sclerotia formed on the plants of these cultivars did not accumulate EA. A significant ($r = 0.50-0.60$) correlation was found between lesions and biometric parameters of *C. purpurea* sclerotia, and between grain contamination with sclerotia and their biometrics ($r = 0.63-0.78$). A weak positive correlation ($r = 0.22$) was detected between the toxicity and pathogenicity of *C. purpurea*. A negative correlation was established between the weight of sclerotia and the accumulation of EA in them ($r = -0.46$), which indicated the biological danger of small sclerotia that got into the seed and food batches of grain.

Keywords: *Secale cereale* L., *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul., artificial inoculation, lesion, infestation, sclerotia biometrics, correlations

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the State Task, research theme No. FSZS-2019-0095 "Development and implementation of fundamental scientific innovative approaches focused on the study and use of the diversity of genetic resources, generation of adaptable genetic sources of winter rye with a complex combination of improved parameters of traits valuable for breeding; on the development of winter rye cultivars of the northern ecotype for targeted use with increased winter hardiness, stable productivity, resistance to biotic and abiotic stressors; on the development of a technology for the production of modern cultivars to improve the efficiency of implementing their productive potential, taking into account changes in climatic conditions and an increase in phytopathogenic pressure to strengthen the country's food security and release healthy food products".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shchekleina L.M., Sheshegova T.K. Winter rye cultivars moderately resistant to ergot. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(4):229-238. DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-229-238

Введение

Серьезной фитосанитарной и биоэкологической проблемой в РФ и за рубежом становится нарастающее распространение на посевах зерновых культур спорыньи (возбудитель – гриб *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.) (Shchekleina, 2019; Kodisch et al., 2020b; Miedaner et al., 2021; Kobulyansky, Solodukhina, 2021). В связи с ужесточением отечественных и зарубежных ГОСТов, которые не допускают наличия склероциев в семенах высших репродукций (Goncharenko, 2009; Miedaner, Geiger, 2015), проблема борьбы с болезнью приобрела приоритетное значение. Наиболее опасно присутствие склероциев в зерне, идущем на переработку, поскольку гриб является источником микотоксинов – эргоалкалоидов (ЭА) (Gagkaeva et al., 2012; Grusie et al., 2018). По данным канадских ученых (Scott et al., 1992), даже при 0,004-процентном содержании склероциев в продовольственной пшенице, в муке накапливается до шести видов ЭА, а при 0,03-процентном их общее количество увеличивается в 2,7 раза. Хотя способность *C. purpurea* продуцировать ЭА является наследственно закрепленным свойством, содержание и состав алкалоидов зависят от генотипа растения и климатических факторов (Pazoutova et al., 2000; Zvonkova et al., 2005; Miedaner, Geiger, 2015; Grusie et al., 2018). Наиболее распространенными алкалоидами *C. purpurea* являются эрготетрин, эрготамин, эргокорнин, эргокриптин, эргозин и эргокристин (Wolff et al., 1983). Другими исследованиями (Pazoutova et al., 2000; Miedaner, Geiger 2015) отмечены значительные различия в спектре ЭА *C. purpurea* из различных географических регионов. Обнаружено также влияние местоположения посевов и погодных условий на концентрацию и спектр ЭА в склероциях. По данным немецких исследователей (Miedaner, Geiger 2015), в первый год обработки конидиями гриба посевов ржи в склероциях преобладали эрготамин (25%) и эргозин (18%), а на другой год – эргозин (25%) и эргокристин (24%). Кроме того, для каждого ЭА известны менее токсичные изомеры (Mainka et al., 2007). В связи с тем, что до сих пор вид и степень токсичности отдельных ЭА для животных неизвестны, для оценки токсичности используется общая концентрация ЭА.

Расширение ареала и повышение вредоносности спорыньи обусловлено рядом причин. Определенную опасность представляют неиспользуемые земли сельскохозяйственного назначения, в которых сохраняются и накапливаются инфекционные структуры *C. purpurea*. Много вопросов и к современным технологиям возделывания культур, направленным на минимизацию обработки почвы. В условиях нестабильности климатических факторов негативное влияние антропогенных и техногенных факторов на полевые биоценозы еще более усиливается. В Кировской области *C. purpurea* ежегодно инфицирует растения на половине посевной площади озимых зерновых культур. Доля зараженных растений в биоценозах ржи варьирует от 0,2% до 8,0% (Shchekleina, 2020; Sheshhegova et al., 2021).

Современные семячистительные технологии не обеспечивают надежную защиту от попадания склероциев в семенной материал, поскольку физико-механические свойства зерна ржи и склероциев очень сходны (Sysuev et al., 2017). Одним из свойств, по которым спорынья отличается от ржи, является удельная масса, что позволяет использовать растворы соли определенной концентрации для отделения зерна от склероциев (Sysuev et al., 2019).

В пределах рода *Secale* L. практически отсутствуют источники устойчивости к спорынье, что значительно затрудняет селекцию (Ponomareva, Ponomarev, 2001; Shchekleina, Sheshhegova, 2020), а современные сорта ржи не изучены по устойчивости к болезни при искусственной инокуляции *C. purpurea*. Недостаточна информация о биохимических и иных механизмах устойчивости к *C. purpurea*, нет данных о структуре и содержании ЭА в Кировской популяции гриба. Цель нашего исследования – поиск слабовосприимчивых к спорынье сортов озимой ржи, на растениях которых формируются нетоксичные склероции *C. purpurea*.

Материалы и методы

Исследования проведены в 2016–2021 гг. в Федеральном аграрном научном центре Северо-Востока (ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров). Материал для исследований – 29 перспективных сортов озимой ржи конкурсного испытания селекции ФАНЦ Северо-Востока, 25 отечественных сортов из других научно-исследовательских учреждений РФ и 43 образца из коллекции ВИР, в том числе низкопентозановые сорта: 'Подарок', 'Вавиловская', 'Янтарная', 'Берегиня', 'Красноярская универсальная'. Образцы изучали на фитопатологическом участке на делянках площадью 1 м² при норме высева 250 всхожих зерен, в 2-кратной повторности. При создании инфекционного фона применяли авторскую методику (Sheshhegova et al., 2018) с использованием патогенных штаммов *C. purpurea* (Cl.p./16, P-18/с., P-19, P-20 м.р.) из рабочей коллекции лаборатории иммунитета и защиты растений. Инокулом в виде споровой суспензии с титром 10⁵ спор/мл вносили с помощью шприца в завязь цветков средней части колоса в фазу зеленых пыльников (51 по шкале Zadoks).

В фазу восковой спелости зерна (85 по шкале Zadoks) учитывали степень поражения растений (количество растений со склероциями в выборке) и засоренность зерна склероциями (весовое содержание склероциев в зерне), выраженные в процентах. Характеристику по устойчивости к спорынье давали на основании шкалы T. Miedaner et al. (2010), согласно которой при распространении болезни в посевах от 0 до 0,5% и наличии склероциев в анализируемой выборке от 0 до 0,01% сорт относится к высокоустойчивым; от 0,5% до 1,5% и от 0,01% до 0,10% – к среднеустойчивым; от 1,5% до 3,0% и от 0,10% до 0,30% и выше – к восприимчивым.

Для поиска возможной связи между проявлением спорыньи в посевах и токсичностью склероциев анализировали их длину и ширину. Замеры проводили при помощи штангенциркуля (ШЦ-I-0,125 0,1 КЛБ). Среднюю массу одного склероция определяли путем деления общей массы рожков на их количество.

Биохимический анализ склероциев у 20 разных по восприимчивости сортов ржи проведен на экспериментальной базе института биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН – в ФИЦ «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (ИБФМ РАН, г. Пушкино). ЭА извлекали из одного грамма измельченных склероциев двумя методами. В первом случае склероции экстрагировали трижды 50-процентным водным раствором ацетона, содержащим H₂SO₄ для создания кислой среды (рН 4,5). Объединенный экстракт концентрировали на роторном испарителе до половины первоначального объема. В полученную водную фракцию вносили 25-процентный раствор аммиака до рН 9-10 и экстрагировали три раза хлороформом. Хлоро-

формные экстракты подсушивали безводным Na_2SO_4 и упаривали на роторном испарителе. Второй метод заключался в экстракции склероциев смесью хлороформа и метанола в соотношении 1 : 1. Анализ экстрактов осуществляли методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) на пластинках силикагеля (Silica gel F254, Merck, Германия) в системах: хлороформ – метанол – 25-процентный NH_4OH (90 : 10 : 0.1) (I) и (80 : 20 : 0.2) (II). ЭА обнаруживали по поглощению и флуоресценции в УФ-свете (264 и 360 нм) и после опрыскивания пластин реактивом Эрлиха. Выделение и очистку ЭА проводили препаративной ТСХ на пластинах силикагеля. Идентификацию метаболитов осуществляли сохроматографией со стандартными образцами и с помощью данных УФ-спектроскопии и масс-спектрометрии. УФ-спектры соединений в метаноле получали на спектрофотометре UV-160A (Shimadzu, Япония). Масс-спектры соединений регистрировали на квадрупольном масс-спектрометре LCQ Advantage MAX (Thermo Finnigan, Германия), используя одноканальный шприцевой насос для прямого ввода образца в камеру для химической ионизации при атмосферном давлении. Содержание суммарного количества ЭА в экстрактах определяли спектрофотометрически в метаноле при $\lambda = 313$ нм. Расчет вели используя коэффициент молярной экстинкции эрготамина ($\log \epsilon = 3.86$). Измерения каждого образца экстракта проводили не менее пяти раз.

Для статистической обработки результатов применяли пакет программ статистического и биометрико-генетического анализа в растениеводстве и селекции AGROS (версия 2.07) и пакет программ Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение

Для инокуляции завязи использовали высокопатогенные штаммы *S. purpurea* (рис. 1). Культурально-морфологические признаки изолятов (цвет, структура воздушного и субстратного мицелия, топография колоний, размер и форма конидий) были в целом схожи друг с другом. Два штамма на картофельно-глюкозном агаре (КГА) отличались однородным белым войлочным мицелием, небольшой морщинистостью среды и в культуре имели две зоны: большую, состоящую из белого шерстистого мицелия, расположенного на морщинистой поверхности

среды, и зону по периферии с бежевым мицелием на ровной поверхности. Два других имели две зоны: краевую, состоящую из ровной поверхности, на которой тонким слоем распределяется белый мицелий, и центральную, отличающуюся морщинистостью поверхности среды с редкими на ней островками мицелия.

При искусственной инокуляции все сорта ржи оказались восприимчивы к спорынье, однако признак значительно варьировал ($V = 60\%$). Для селекции можно отобрать наименее поражаемые биотипы. Среди сортов селекции ФАНЦ Северо-Востока определен интерес представляют районированные сорта 'Флора', 'Кипрез' и 'Графиня', переданные на Государственное испытание 'Лица' и 'Батист', а также новые популяции, проходящие конкурсное испытание: 'Симфония', 'Гармония' и 'Садко' (табл. 1). Степень поражения этих сортов варьировала от 32,4% до 46,4% при засоренности зерна склероциями 0,53%–2,54%. Поражение наиболее восприимчивого (индикаторного) сорта равнялось 95,0%, засоренность склероциями – 10,4%.

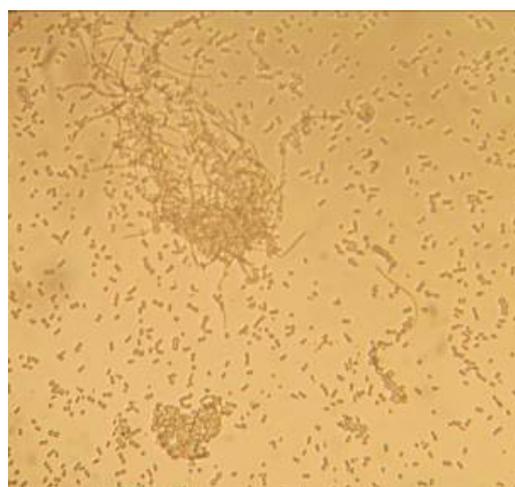
Поражение большинства сортов из других НИУ РФ в 2017 г. составило 100%. В среднем за годы изучения относительно меньше поражались и засорялись склероциями сорта 'Паром', 'Вираз', 'Саратовская 7' и 'Волхова'.

Коллекцию генетических ресурсов растений ВИР трактуют как базис исходного материала для селекции многих культур (Safonova et al., 2019). В наших исследованиях среди коллекционных образцов иммунологическую ценность по предварительным данным представляют 'Чулпан 2', 'Харьковская 60-2', 'Чулпан 4', 'Россиянка 2', 'Таловская 2', 'Волжанка 2', 'Новая Эра', 'Подарок', 'Рушник 2', 'Берегиня', 'МосВИР 12-244/16'. Коллекционные образцы были несколько более устойчивы к спорынье по сравнению с сортами селекции ФАНЦ Северо-Востока. Выделенные сорта могут быть использованы в селекции озимой ржи на повышение устойчивости к спорынье.

В 2018–2020 гг. для выявления возможной связи биометрических показателей склероциев с токсичностью *S. purpurea* провели анализ склероциев, собранных на 20 различающихся по восприимчивости сортах ржи. Общая масса склероциев с 1 м^2 у сортов селекции ФАНЦ Северо-Востока варьировала от 5,11 г ('Симфония') до



а



b

Рис. 1. Чистая культура гриба *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.:
а – внешний вид колонии штамма, б – микрофотография культуры

Fig. 1. Pure culture of the fungus *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.:
а – appearance of the strain's colony, б – micrograph of the culture

Таблица 1. Наименее поражаемые спорыньей сорта озимой ржи
(искусственная инокуляция, г. Киров, 2016–2021 гг.)**Table 1. Winter rye cultivars least affected by ergot**
(artificial inoculation, Kirov, 2016–2021)

Сорт / Cultivar	Поражение, % / Lesion, %	Засоренность зерна склероциями, % / Contamination of grain with sclerotia, %
Сорта ФАНЦ Северо-Востока (2016–2021 гг.) / Cultivars of the FANC North-East (2016–2021)		
Флора	32,4 ± 6,30	1,57 ± 0,71
Кипрез	32,6 ± 6,15	0,70 ± 0,55
Графиня	37,9 ± 12,44	0,65 ± 0,55
Садко	39,3 ± 9,00	1,00 ± 0,77
Симфония	38,7 ± 10,48	0,65 ± 0,57
Лица	39,4 ± 8,50	0,53 ± 0,44
Батист	43,4 ± 10,13	2,54 ± 0,38
Гармония	46,4 ± 10,15	0,67 ± 0,52
Индикаторный сорт	95,0 ± 5,00	10,40 ± 7,50
Среднее по сортименту	58,0	3,24
Сорта других НИУ РФ (2016–2021 гг.) / Cultivars from other research centers (2016–2021)		
Паром	45,9 ± 0,85	6,20 ± 2,05
Вираз	50,1 ± 0,10	3,10 ± 0,20
Саратовская 7	52,0 ± 1,60	14,70 ± 3,50
Волхова	54,4 ± 1,60	14,25 ± 3,65
Индикаторный сорт	95,0 ± 5,00	35,40 ± 12,70
Среднее по сортименту	67,8	14,27
Образцы коллекции ВИР (2020–2021 гг.) / Accessions from the VIR collection (2020–2021)		
Чулпан 2	14,2	0,60
Харьковская 60-2	28,5	1,50
Чулпан 4	31,2	1,40
Россиянка 2	17,6	0,90
Таловская 2	25,0	1,90
Волжанка 2	33,3	1,70
Новая Эра	45,9 ± 0,85	2,30 ± 0,10
Подарок	42,9 ± 0,10	0,60 ± 0,30
Рушник 2	37,5	2,60
Берегиня	40,0	3,00
МосВИР 12-244/16	41,1	1,80
Индикаторный сорт	100,0	37,0
Среднее по сортименту	60,9	6,65

22,50 г ('Вятка 2'), у коллекционных образцов – от 0,75 г ('Подарок') до 13,45 г ('Вавиловская'). Следует отметить, что инфекционную нагрузку определяет не только количество склероциев, но и их размер, поскольку крупные склероции образуют больше стром с плодовыми телами. В наших исследованиях масса одного склероция на сортах селекции ФАНЦ Северо-Востока изменялась от 0,09 г ('Симфония') до 0,23 г ('Ниоба'), на коллекционных образцах – от 0,05 г ('Подарок') до 0,16 г ('Берегиня') (рис. 2).

склероции ('Ниоба', 'Грация', 'Графит', 'Перепел', 'Садко', 'Батист', 'Берегиня'), сорта с относительно мелкими склероциями ('Подарок', 'Симфония', 'Лица', 'Триумф', 'Сара', 'Гармония', 'Вятка 2', 'Фалёнская 4', 'Янтарная', 'Вавиловская'), сорта с наиболее крупными и многочисленными склероциями ('Грация', 'Перепел', 'Ниоба', 'Берегиня') и сорта с немногочисленными и относительно мелкими склероциями ('Подарок', 'Симфония', 'Гармония', 'Лица', 'Рушник 2').

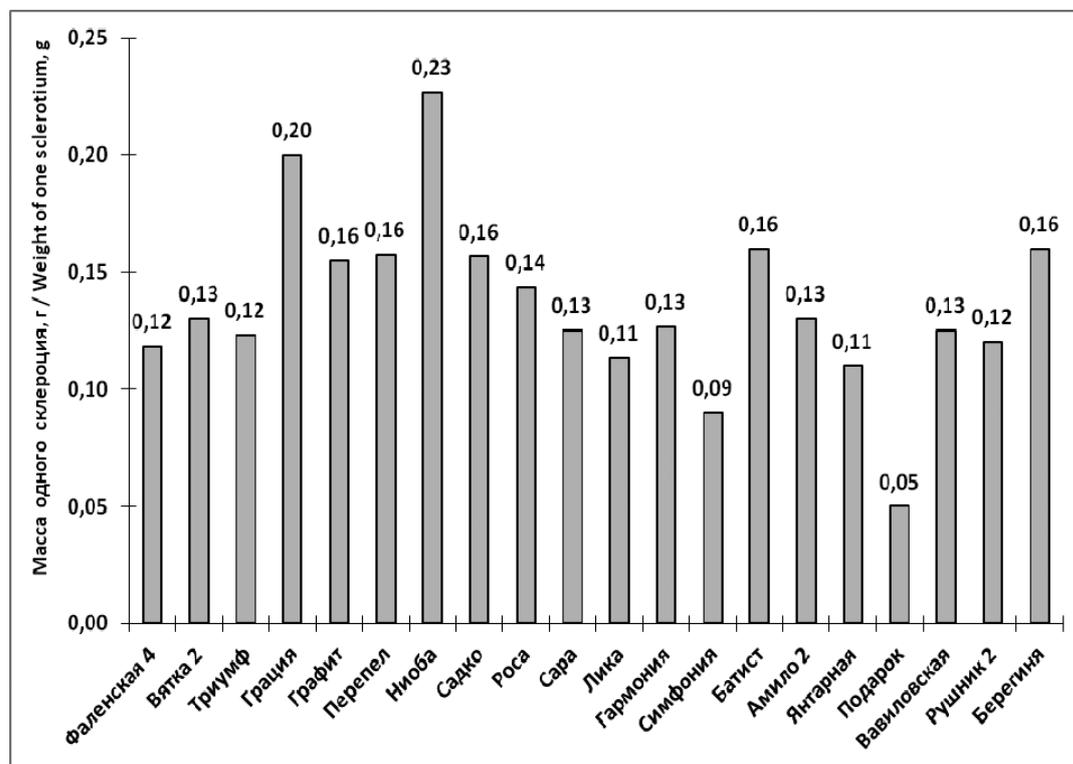


Рис. 2. Средняя масса одного склероция на разных по восприимчивости сортах ржи (г. Киров, 2016–2021 гг.)

Fig. 2. Average weight of one sclerotium on rye cultivars differing in susceptibility (Kirov, 2016–2021)

Наиболее крупные склероции (0,16–0,23 г) сформировались на сортах 'Ниоба', 'Грация', 'Графит', 'Перепел', 'Садко', 'Батист', а относительно мелкие (0,09–0,13 г) – на сортах 'Симфония', 'Лица', 'Триумф', 'Сара', 'Гармония', 'Вятка 2' и 'Фалёнская 4'. У коллекционных образцов обнаружены относительно мелкие (0,05–0,10 г) склероции (табл. 2). Выявлена значительная изменчивость длины и ширины склероциев. На сортах ФАНЦ Северо-Востока формировались склероции, длина которых варьировала от 15,93 мм ('Симфония') до 23,33 мм ('Ниоба'), а ширина – от 2,55 ('Вятка 2') до 4,40 мм ('Грация'); на образцах коллекции ВИР формировались склероции длиной от 11,25 мм ('Подарок') до 22,05 мм ('Берегиня') и шириной от 2,35 мм до 2,95 мм. Наиболее мелкие по размеру и массе склероции сформировали сорта 'Подарок', 'Симфония', 'Вятка 2', 'Фалёнская 4' и 'Вавиловская'. Мелкие склероции, имеющие меньшую массу по сравнению с зернами ржи, выделяются воздушным потоком, а оставшиеся – проходят через решетку с продолговатыми отверстиями размером 1,8 × 2,0 мм (Sysuev et al., 2015).

В результате исследований изученные сорта озимой ржи по характеру взаимоотношений *Secale cereale* L. – *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. можно дифференцировать следующим образом: сорта, на которых формируются крупные

У склероциев, собранных с 20 сортов ржи, изучен состав и содержание ЭА (табл. 3). В склероциях, сформированных на 9 сортах селекции ФАНЦ Северо-Востока, ЭА не выявлены, на остальных сортах процентное содержание ЭА в склероциях варьировало в значительных пределах: от 0,04% ('Триумф') до 0,36% ('Рушник 2').

Следует отметить, что ранее проведенные исследования выявили более высокое суммарное содержание ЭА, которое достигало 0,90% (Sheshegova et al., 2019), что может быть индуцировано экстремальными климатическими факторами в период формирования склероциев. Тесную зависимость токсичности от состояния среды отмечали и другие исследователи (Pazoutova et al., 2000; Zvonkova et al., 2005). Что касается состава ЭА, то во всех образцах склероциев обнаружены одинаковые пептидные ЭА: эрготамин и его стереоизомер эрготаминин, а также эргокристин, что отличается от состава ЭА в склероциях, изученных в Германии, Австрии и Польше (Kodisch et al., 2020a). В географически отдаленных образцах склероциев были обнаружены эргокорнин, эргокристинин и α-эргокриптин.

В результате корреляционного анализа выявлена значимая ($P \geq 0,05$) зависимость между поражением посевов спорыньей и биометрическими показателями склероциев: $r = 0,60$ (длина), $r = 0,52$ (ширина), $r = 0,50$ (мас-

Таблица 2. Биометрия склероциев, сформировавшихся на сортах озимой ржи (г. Киров, 2016–2021 гг.)**Table 2. Biometrics of sclerotia in different gene pool material of winter rye (Kirov, 2016–2021)**

Сорт / Cultivar	Масса склероциев, г/м ² / Weight of sclerotia, g/m ²	Параметры склероциев / Sclerotia parameters	
		Длина, мм / Length, mm	Ширина, мм / Width, mm
Сорта селекции ФАНЦ Северо-Востока / Cultivars bred at the FANC North-East			
Фалёнская 4	16,36 ± 9,31	16,23 ± 2,52	2,90 ± 0,41
Вятка 2	22,50 ± 6,80	16,05 ± 0,05	2,55 ± 0,05
Триумф	20,54 ± 8,58	19,23 ± 1,09	3,23 ± 0,27
Грация	21,23 ± 9,94	19,90 ± 1,90	4,40 ± 1,40
Графит	13,37 ± 6,01	19,30 ± 1,95	3,33 ± 0,37
Перепел	17,27 ± 7,72	21,85 ± 2,89	3,60 ± 0,18
Ниоба	15,83 ± 3,90	23,33 ± 1,31	4,10 ± 0,36
Садко	14,68 ± 7,17	20,03 ± 1,81	3,80 ± 0,31
Роса	10,43 ± 6,60	19,33 ± 1,45	3,40 ± 0,23
Сара	13,86 ± 5,96	18,70 ± 3,50	3,20 ± 0,20
Лица	5,76 ± 2,40	19,23 ± 1,23	3,13 ± 0,17
Гармония	5,50 ± 2,29	18,03 ± 1,39	3,40 ± 0,31
Симфония	5,11 ± 2,20	15,93 ± 0,75	2,73 ± 0,03
Батист	11,17 ± 7,19	18,47 ± 2,92	3,63 ± 0,20
Среднее по сортименту	13,83	18,97	3,39
Сорта коллекции ВИР / Cultivars from the VIR collection			
Амило 2	3,45 ± 0,04	18,30 ± 0,10	2,75 ± 0,05
Янтарная	5,35 ± 0,04	18,50 ± 0,10	2,55 ± 0,05
Подарок	0,75 ± 0,04	11,25 ± 0,05	2,35 ± 0,05
Вавиловская	13,45 ± 0,59	15,20 ± 0,92	2,95 ± 0,35
Рушник 2	3,25 ± 0,12	19,05 ± 0,05	2,55 ± 0,05
Берегиня	7,15 ± 0,04	22,05 ± 0,05	2,95 ± 0,05
Среднее по сортименту	5,57	17,39	2,68

Таблица 3. Содержание эргоалкалоидов и их состав в склероциях *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul., сформировавшихся на разных по восприимчивости к спорынье сортах озимой ржи (искусственная инокуляция, г. Киров, 2017–2021 гг.)

Table 3. Ergot alkaloid content and composition in *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. sclerotia on winter rye cultivars differing in susceptibility to ergot (artificial inoculation, Kirov, 2017–2021)

Сорт / Cultivar	Эргоалкалоиды / Ergot alkaloids		
	склероциев, мг/г / sclerotia, mg/g	от массы склероциев, % / from the weight of sclerotia, %	состав / composition
Сорта ФАНЦ Северо-Востока / Cultivars of the FANC North-East			
Вятка 2	2,2	0,22 ± 0,009	ЭТ, ЭМ, ЭК
Триумф	0,4	0,04 ± 0,002	ЭТ, ЭМ, ЭК
Грация	1,0	0,10 ± 0,004	ЭТ, ЭМ, ЭК
Графит	0	0	–
Перепел	0	0	–
Ниоба	0	0	–
Садко	0	0	–
Роса	0	0	–
Сара	0	0	–
Лица	0	0	–
Гармония	0	0	–
Симфония	0	0	–
Батист	1,7	0,17 ± 0,008	ЭТ, ЭМ, ЭК
Фалёнская 4	1,4	0,14 ± 0,007	ЭТ, ЭМ, ЭК
Сорта коллекции ВИР / Cultivars from the VIR collection			
Амило 2	1,4	0,14 ± 0,006	ЭТ, ЭМ, ЭК
Янтарная	0,7	0,07 ± 0,009	ЭТ, ЭМ, ЭК
Подарок	2,0	0,20 ± 0,010	ЭТ, ЭМ, ЭК
Вавиловская	0,6	0,06 ± 0,002	ЭТ, ЭМ, ЭК
Рушник 2	3,6	0,36 ± 0,015	ЭТ, ЭМ, ЭК
Берегиня	0,6	0,06 ± 0,002	ЭТ, ЭМ, ЭК

Примечание: ЭТ – эрготамин, ЭМ – эрготаминин, ЭК – эргокрестин; «0» и «–» – ЭА не обнаружены

Note: ЭТ – ergotamine, ЭМ – ergotaminine, ЭК – ergocristine; “0” and “–” – EA were not detected

са); между засоренностью зерна склероциями и биометрическими показателями: $r = 0,63$ (длина), $r = 0,78$ (ширина) и $r = 0,69$ (масса).

Обнаружена слабая отрицательная связь между массой одного склероция и накоплением в склероциях ЭА ($r = -0,46$). Учитывая, что мелкие склероции невозможно полностью отделить из зернового вороха путем механической сортировки, в силу чего часть их попадает в семенные и продовольственные партии зерна (Sysuev et al., 2019), биологическая опасность этой фракции представляется наиболее серьезной. В свою очередь, на степень засоренности зерна склероциями существенное ($P \geq 0,95$) влияние оказывают степень поражения посевов ($r = 0,70$) и масса склероциев ($r = 0,69$).

В наших исследованиях значимая связь между поражением посевов спорыньей и содержанием ЭА в склероциях (то есть между токсичностью и патогенностью *C. purpurea*) не выявлена ($r = 0,22$). В других исследованиях (Kodisch et al., 2020a) эта зависимость была очевидна ($r = 0,53$). Относительно невысокая связь между этими признаками обуславливает необходимость использования в иммунологических исследованиях разных штаммов *C. purpurea*. С другой стороны, для оценки биологической опасности склероциев в конкретной партии зерна необходима информация об уровне ЭА в склероциях, сформировавшихся на том или ином сорте. В случае нетоксичности склероции представляют собой неопасную биологическую примесь.

Заключение

При искусственной инокуляции *C. purpurea* впервые выделено 14 наименее поражаемых спорыньей сортов озимой ржи ('Флора', 'Кипрез', 'Графиня', 'Ли́ка', 'Батист', 'Симфония', 'Гармония', 'Садко', 'Паром', 'Ви́раж', 'Саратовская 7', 'Волхова', 'Новая Эра', 'Подарок'), которые могут быть использованы в селекции на иммунитет. В склероциях Кировской популяции *C. purpurea* идентифицированы три ЭА: эргокрестин, эрготамин и его стереоизомер эргокрестинин. Содержание ЭА составляло 0,04–0,36% от массы склероциев. В склероциях, формировавшихся на растениях 9 перспективных популяций ('Графит', 'Перепел', 'Ли́ка', 'Гармония', 'Симфония', 'Нюба', 'Садко', 'Роса' и 'Сара'), ЭА не накапливались. Особую ценность для селекции представляют слабо поражаемые спорыньей сорта 'Ли́ка', 'Симфония' и 'Гармония'; сформировавшиеся на этих сортах склероции не накапливали ЭА. Установлена достоверная зависимость между степенью поражения растений паразитом и биометрическими показателями склероциев *C. purpurea*: $r = 0,60$ (длина), $r = 0,52$ (ширина), $r = 0,50$ (масса); между засоренностью зерна склероциями и биометрическими показателями: $r = 0,63$ (длина), $r = 0,78$ (ширина) и $r = 0,69$ (масса). Выявлена слабая положительная связь ($r = 0,22$) между токсичностью и патогенностью *C. purpurea*.

References / Литература

- Gagkaeva T.Yu., Dmitriev A.P., Pavlyushin V.A. Grain microbiota – index of its quality and safety. *Journal of Plant Protection and Quarantine*. 2012;(9):14-18. [in Russian] (Гагкаева Т.Ю., Дмитриев А.П., Павлюшин В.А. Микробиота зерна – показатель его качества и безопасности. *Защита и карантин растений*. 2012;(9):14-18).
- Goncharenko A.A. The current state of production, methods and promising areas of winter rye breeding in the Russian Federation (Sovremennoye sostoyaniye proizvodstva, metody i perspektivnyye napravleniya selektsii ozimoy rzhii v RF). In: *Winter Rye: Breeding, Seed Production, Technology and Processing (Ozimaya rozh: selektsiya, semenovodstvo, tekhnologii i pererabotka)*. Ufa; 2009. p.40-76. [in Russian] (Гончаренко А.А. Современное состояние производства, методы и перспективные направления селекции озимой ржи в РФ. В кн.: *Озимая рожь: селекция, семеноводство, технологии и переработка*. Уфа; 2009. С.40-76).
- Grusie T.J., Cowan V., Singh J., McKinnon J., Blakley B. Proportions of predominant Ergot alkaloids (*Claviceps purpurea*) detected in Western Canadian grains from 2014 to 2016. *World Mycotoxin Journal*. 2018;11(2):259-264. DOI: 10.3920/WMJ2017.2241
- Kobylyansky V.D., Solodukhina O.V. Ergot development on low-pentosan diploid winter rye. *Grain Economy of Russia*. 2021;4(76):73-78. [in Russian] (Кобылянский В.Д., Солодухина О.В. Развитие спорыньи на низкопентозановой диплоидной озимой ржи. *Зерновое хозяйство России*. 2021;4(76):73-78). DOI: 10.31367/2079-8725-2021-76-4-73-78
- Kodisch A., Oberforster M., Raditschnig A., Rodemann B., Tratwal A., Danielewicz J. et al. Covariation of ergot severity and alkaloid content measured by HPLC and one ELISA method in inoculated winter rye across three isolates and three European countries. *Toxins*. 2020a;12(11):676. DOI: 103390/toxins12110676
- Kodisch A., Wilde P., Schmiedchen B., Fromme F.-J., Rode-mann B., Tratwal A. et al. Ergot infection in winter rye hybrids shows differential contribution of male and female genotypes and environment. *Euphytica*. 2020b;216(4):65. DOI: 10.1007/s10681-020-02600-2
- Mainka S., Dänicke S., Böhme H., Ueberschär K.H., Liebert F. On the composition of ergot and the effects of feeding different ergot sources on piglets. *Animal Feed Science and Technology*. 2007; 139(1-2):52-68. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2006.12.001
- Miedaner T., Geiger H.H. Biology, genetics and management of ergot (*Claviceps* spp.) in rye, sorghum, and pearl millet. *Toxins*. 2015;7(3):659-778. DOI: 10.3390/toxins7030659
- Miedaner T., Kodisch A., Raditschnig A., Eifler J. Ergot alkaloid contents in hybrid rye are reduced by breeding. *Agriculture*. 2021;11(6):526. DOI: 10.3390/agriculture11060526
- Miedaner T., Mirdita V., Geiger H.H. Strategies in breeding for ergot (*Claviceps purpurea*) resistance. In: *Book of Abstracts: EUCARPIA International Symposium on Rye Breeding and Genetics; Belarus*. Zhodino; 2010. p.83.
- Pazoutova S., Olsovska J., Linka M., Kolinska R., Flieger M. Chemoraces, and habitat specialization of *Claviceps purpurea* populations. *Applied and Environmental Microbiology*. 2000;66(12):5419-5425. DOI: 10.1128/AEM.66.12.5419-5425.2000
- Ponomareva M.L., Ponomarev S.N. Ergot of winter rye and measures to combat it (Sporynya ozimoy rzhii i меры борьбы с ней). *Niva Tatarstana = Grain Fields of Tatarstan*. 2001;(5):8-9. [in Russian] (Пономарева М.Л., Понамарев С.Н. Спорынья озимой ржи и меры борьбы с ней. *Нива Татарстана*. 2001;(5):8-9).
- Safonova I.V., Anis'kov N.I., Kobylyansky V.D. The database of genetic resources in the VIR winter rye collection as a means of classification of genetic diversity, analysis of the collection history and effective study and preservation. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):780-786. [in Russian] (Сафонова И.В., Аниськов Н.И., Кобылянский В.Д. База данных генетических ресурсов коллекции озимой ржи ВИР как средство классификации генетического разнообразия, анализа истории коллекции и эффективного изучения и сохранения. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(6):780-786). DOI: 10.18699/VJ19.552
- Scott P.M., Lombaert G.A., Pellaers P., Bacler S., Lappi J. Ergot alkaloids in grain foods sold in Canada. *Journal of AOAC International*. 1992;75(5):773-779.
- Shchekleina L.M. Influence of weather factors on separate periods of fungus *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. development and level of ergot harmfulness in Kirov region. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019;20(2):134-143. [in Russian] (Щеклеина Л.М. Влияние погодных факторов на отдельные периоды развития гриба *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. и уровень вредоносности спорыньи в Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019;20(2):134-143). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143
- Shchekleina L.M. Monitoring of winter rye diseases in Kirov region and possible trends of breeding for immunity. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(2):124-132. [in Russian] (Щеклеина Л.М. Мониторинг болезней озимой ржи в Кировской области и возможные направления селекции на иммунитет. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020;21(2):124-132). DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.2.124-132
- Shchekleina L.M., Sheshegova T.K. The diseases *Secale cereal L.* in Kirov region and genetic sources of sustain-

- ability for winter rye selection. *The Bulletin of KrasGAU*. 2020;6(159):86-92. [in Russian] (Щеклеина Л.М., Шешегова Т.К. Болезни *Secale cereale* L. в Кировской области и генетические источники устойчивости для селекции. *Вестник КрасГАУ*. 2020;6(159):86-92). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-6-86-92
- Sheshegova T.K., Shchekleina L.M., Antipova T.V., Zhelifonova V.P., Kozlovsky A.G. Search for rye and wheat genotypes which are resistant to *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. and hamper accumulation of ergoalkaloids in sclerotia. *Agricultural Biology*. 2021;56(3):549-558. [in Russian] (Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Антипова Т.В., Желифонова В.П., Козловский А.Г. Поиск генотипов ржи и пшеницы, устойчивых к *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. и не накапливающих эргоалкалоиды в склероциях гриба. *Сельскохозяйственная биология*. 2021;56(3):549-558). DOI: 10.15389/agrobiology.2021.3.549rus
- Sheshegova T.K., Shchekleina L.M., Kedrova L.I., Utkina E.I. Winter rye breeding for resistance to ergot: Guidelines (Seleksiya ozimoy rzhi na ustoychivost k sporynye: Metodicheskoye posobiye). Kirov: Vyatka State Agricultural Academy; 2018. [in Russian] (Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Кедрова Л.И., Уткина Е.И. Селекция озимой ржи на устойчивость к спорынье: Методическое пособие. Киров: Вятская ГСХА; 2018).
- Sheshegova T.K., Shchekleina L.M., Zhelifonova V.P., Antipova T.V., Baskunov B.P., Kozlovsky A.G. A resistance of rye varieties to ergot and ergot alkaloid content *Claviceps purpurea* sclerotia on the Kirov region environments. *Mycology and Phytopathology*. 2019;53(3):177-182. [in Russian] (Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Желифонова В.П., Антипова Т.В., Баскунов Б.П., Козловский А.Г. Устойчивость сортов ржи к спорынье и содержание эргоалкалоидов в склероциях *Claviceps purpurea* в условиях Кировской области. *Микология и фитопатология*. 2019;53(3):177-182). DOI: 10.1134/S0026364819030127
- Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Investigation of grain movement parameters in the liquid of the device for removing ergot. *Engineering Technologies and Systems*. 2019;29(2):248-264. [in Russian] (Сысуев В.А., Сaitов В.Е., Фарафонов В.Г., Сaitов А.В. Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи. *Инженерные технологии и системы*. 2019;29(2):248-264). DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.248-264
- Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Suvorov A.N., Saitov A.V. Theoretical background of calculation of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017;43(3):273-276. DOI: 10.3103/S1068367417030156
- Sysuev V.A., Saitov V.E., Savinykh P.A., Saitov A.V. Cleaning the seeds of rye ergot. *Modern High Technologies*. 2015;(6):46-49. [in Russian] (Сысуев В.А., Сaitов В.Е., Савиных П.А., Сaitов А.В. Очистка семян ржи от спорыньи. *Современные наукоемкие технологии*. 2015;(6):46-49).
- Wolff J., Ocker H.D., Zwingelberg H. Bestimmung von Mutterkornalkaloiden im Getreide und Mehlprodukten durch HPLC. *Getreide, Mehl und Brot*. 1983;37:331-335. [in German]
- Zvonkova E.N., Shain S.S., Saibel E.S. Ways to obtain neurohormonal preparations of the ergopeptide series (Puti polucheniya neyrogormonalnykh preparatov ergopeptidnogo ryada). *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal = Russian Chemical Journal*. 2005;49(1):125-134. [in Russian] (Звонкова Е.Н., Шаин С.С., Сайбель Е.С. Пути получения нейрогормональных препаратов эргопептидного ряда. *Российский химический журнал*. 2005;49(1):125-134).

Информация об авторах

Люция Муллаахметовна Щеклеина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, immunitet@fanc-sv.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3589-5524>

Татьяна Кузьмовна Шешегова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, sheshegova.tatyana@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-2371-4949

Information about the authors

Lucia M. Shchekleina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, immunitet@fanc-sv.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3589-5524>

Tatiana K. Sheshegova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of a Laboratory, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, sheshegova.tatyana@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-2371-4949

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.03.2022; одобрена после рецензирования 07.06.2022; принята к публикации 01.12.2022. The article was submitted on 13.03.2022; approved after reviewing on 07.06.2022; accepted for publication on 01.12.2022.