

ISSN 1817-7204 (Print)

ISSN 1817-7239 (Online)

УДК 634.75:631.524.86:632.488:577.21

<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-1-35-44>

Поступила в редакцию 05.01.2024

Received 05.01.2024

А. С. Лыжин, И. В. Лукьянчук

Федеральный научный центр имени И. В. Мичурина, Мичуринск, Российская Федерация

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ СКРИНИНГ АЛЛЕЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ К АНТРАКНОЗУ *RCA2* У СОРТОВ И СЕЛЕКЦИОННЫХ ФОРМ ЗЕМЛЯНИКИ

Аннотация. Антракноз (*Colletotrichum acutatum*) – опасное заболевание земляники. На территории Евразийского экономического союза *C. acutatum* является карантинным патогеном. Поэтому важной задачей является идентификация и создание новых форм земляники с генетически детерминированной устойчивостью. Применение диагностических ДНК-маркеров аллелей резистентности целевых генов повысит надежность идентификации и эффективность селекционного процесса. Целью исследования являлся молекулярный скрининг аллеля резистентности к антракнозу *Rca2* у сортов и отборных сеянцев земляники для выявления форм с генетически детерминированной устойчивостью к *C. acutatum*. Объектами исследования являлись 1-й сорт земклуники (*F. × anashata* Kantor.) и 53 генотипа земляники садовой (*F. × ananassa* Duch.): 38 сортов и 16 отборных форм. Молекулярный скрининг аллеля резистентности *Rca2* проводили с использованием ДНК-маркера STS-*Rca2*_240. Для контроля протекания ПЦР маркер STS-*Rca2*_240 мультиплексировали с маркером EMFv020. В результате проведенного анализа маркерный фрагмент гена *Rca2* идентифицирован у 14 (25,9 %) из 54 проанализированных образцов. Среди сортов он присутствует у 8 форм (21,1 %), а среди отборных форм – у 6 (37,5 %). У остальных проанализированных образцов ген *Rca2* представлен аллелем *rca2* в гомозиготном состоянии. Из сортов российской селекции ген *Rca2* присутствует у земклуники Дар (гетерозиготное сочетание аллелей). Среди форм зарубежной селекции ген *Rca2* выявлен у сортов Aprica, Florence, Laetitia, Malwina, Monterey, Portola и Selva (гомозиготное (аллель *Rca2*) или гетерозиготное сочетание аллелей). Среди проанализированных отборных форм земляники ген *Rca2* в гетерозиготной форме идентифицирован у гибридов 2/1-24 (Quicky × Olympia), 3/9-28 (Florence × Faith), 4/7-10, 4/7-19 (Asia × Aprica), 5/2-26, 5/2-32 (San Andreas × Monterey). Указанные генотипы являются генетическими источниками устойчивости к антракнозной черной гнили и могут использоваться в программах маркер-опосредованной селекции.

Ключевые слова: земляника, устойчивость, селекция, молекулярные маркеры, антракноз, ген *Rca2*

Для цитирования: Лыжин, А. С. Молекулярный скрининг аллеля устойчивости к антракнозу *Rca2* у сортов и селекционных форм земляники / А. С. Лыжин, И. В. Лукьянчук // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2025. – Т. 63, № 1. – С. 35–44. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-1-35-44>

Alexander S. Lyzhin, Irina V. Luk'yanchuk

I. V. Michurin Federal Science Center, Michurinsk, Russian Federation

MOLECULAR SCREENING OF ANTHRACNOSE RESISTANCE ALLELE *RCA2* IN STRAWBERRY VARIETIES AND SELECTED FORMS

Abstract. Anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) is a dangerous strawberry disease. In the Eurasian Economic Union, *C. acutatum* is a quarantine pathogen. Therefore, an important aim is identification and creation of new strawberry forms with genetically determined resistance. Use of diagnostic DNA markers of target genes' resistance alleles will increase reliability of identification and effectiveness of breeding process. The purpose of this study was molecular screening of anthracnose resistance allele *Rca2* in strawberry varieties and selected seedlings to identify forms with genetically determined resistance to *C. acutatum*. The objects of the study were 1st variety of strawberry hybrids (*F. × anashata* Kantor.) and 53 genotypes of garden strawberry (*F. × ananassa* Duch.): 38 varieties and 16 selected forms. Molecular screening of *Rca2* resistance allele was carried out using the DNA marker STS-*Rca2*_240. To control the PCR progress, the marker STS-*Rca2*_240 was multiplexed with the marker EMFv020. As a result of the analysis, the marker fragment of the *Rca2* gene was identified in 14 (25.9 %) of the 54 analyzed strawberry samples. Among the strawberry varieties, the marker is present in 8 forms (21.1 %), and among the selected forms – in 6 samples (37.5 %). In the remaining analyzed strawberry samples, *Rca2* gene is represented by the *rca2* allele in homozygous state. Among the Russian strawberry varieties, the *Rca2* gene is present in the variety of Dar (heterozygous combination of alleles). Among the foreign strawberry forms, *Rca2* gene was identified in the varieties of Aprica, Florence, Laetitia, Malwina, Monterey, Portola and Selva (homozygous (*Rca2* allele) or heterozygous combination of alleles). Among the analyzed strawberry selected forms, *Rca2* gene in heterozygous form was identified in hybrids 2/1-24 (Quicky × Olympia), 3/9-28 (Florence × Faith), 4/7-10, 4/7-19 (Asia × Aprica), and 5/2-26, 5/2-32 (San Andreas × Monterey). These genotypes are genetic sources of resistance to anthracnose and can be used in marker-assisted breeding.

Keywords: strawberry, resistance, breeding, molecular markers, anthracnose, *Rca2* gene

For citation: Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V. Molecular screening of anthracnose resistance allele *Rca2* in strawberry varieties and selected forms. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2025, vol. 63, no. 1, pp. 35–44 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2025-63-1-35-44>

Введение. Земляника садовая (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) – одна из наиболее распространенных и экономически значимых ягодных культур. Являясь экологически пластичной культурой, в то же время она весьма чувствительна к условиям произрастания и степени инфекционной нагрузки. Эпифитотии грибных болезней при отсутствии защитных мероприятий способны уничтожить до 100 % урожая [1]. К числу заболеваний, широко распространенных во всех регионах возделывания земляники, относятся антракноз, фитофтороз, мучнистая роса, серая гниль, пятнистости листьев, вертициллез [2–5].

Возбудителями антракноза земляники являются фитопатогенные грибы рода *Colletotrichum* [6]. В умеренном климатическом поясе наиболее опасен видовой комплекс *Colletotrichum acutatum* J. H. Simmonds [7, 8], который в странах Евразийского экономического союза (Республика Армения, Республика Беларусь, Республика Казахстан, Кыргызская Республика, Российская Федерация) с 2017 г. внесен в перечень карантинных патогенов [9].

C. acutatum способен поражать все органы растения: корни, листья, стебли плоды и т. д. Сильное инфицирование приводит к гибели растений [10, 11]. По различным оценкам, потери товарного урожая от поражения плодов антракнозом могут превышать 50 % [12, 13]. Распространение *C. acutatum* в насаждениях земляники может осуществляться через бессимптомный зараженный посадочный материал, орудия труда, транспорт, насекомых и др., что осложняет своевременную диагностику и проведение защитных мероприятий [14].

Для контроля распространения и борьбы с *C. acutatum* в промышленных насаждениях земляники используются синтетические фунгициды, в первую очередь – на основе стробилурина (Abound, Cabrio, Switch и др.). Однако с 2013 г. начала проявляться неэффективность химических методов защиты вследствие появления высокорезистентных к фунгицидам стробилуринового ряда популяций *C. acutatum* [11, 15]. Кроме того, широкое применение в сельскохозяйственном производстве химических средств защиты растений неблагоприятно сказывается на состоянии окружающей среды, может оказывать негативное влияние на здоровье человека, а также требует значительных финансовых затрат [16, 17]. В связи с этим важным фактором эффективного сельскохозяйственного производства является использование сортов растений с генетически детерминированной устойчивостью к патогенам [11, 18].

Для земляники описаны полигенные и моногенные факторы устойчивости к антракнозу. К числу моногенных детерминант устойчивости земляники относятся локусы *Rca2* [19] и *FarCal* [11]. К настоящему времени для указанных генов разработаны информативные ДНК-маркеры [11, 19], что позволяет проводить оценку устойчивости генотипов не по фенотипическому проявлению признака, а непосредственно по наличию генетических детерминант, а также направленно подбирать исходные формы для гибридизации и прогнозировать наследование целевых аллелей в гибридном потомстве.

ДНК-маркеры, сцепленные с геном *Rca2*, активно используются для оценки устойчивости генотипов земляники как при изучении генетических коллекций, так и в программах маркеропосредованной селекции. С использованием маркера STS-*Rca2*_240 аллель резистентности *Rca2* идентифицирован у сортов Capitola, Chandler, Dover, Oso Grande, Seascape, Selva [20], Benton, Real [21]. Также носители гена *Rca2* выявлены в гибридных комбинациях: Benton × Cambridge Favourite – 17 отборных форм [22], Alba × Росинка, Росинка × Darselect – 136 гибридов [23], Florence × Faith, Malwina × Tea, Quicky × Olympia, Roxana × Kimberly – 52 семян [24]. Однако для многих современных сортов земляники, как российской, так и зарубежной селекции, генетические основы детерминации устойчивости к *C. acutatum* изучены недостаточно, что затрудняет направленный подбор исходных форм и снижает эффективность селекционного процесса.

Цель исследования – молекулярный скрининг аллеля резистентности к антракнозу *Rca2* у сортов и отборных сеянцев земляники для выявления форм генетически детерминированной устойчивостью к *C. acutatum*.

Материалы и методы исследования. Биологическими объектами исследования являлись 54 генотипа земляники (*Fragaria* L.) генетической коллекции Федерального научного центра имени И. В. Мичурина: 1-й сорт земклуники (*F. × anashata* Kantor.) и 53 генотипа земляники садовой (*F. × ananassa* Duch.): 38 сортов и 16 отборных форм (табл. 1).

Таблица 1. Анализируемые сорта и отборные формы земляники

Table 1. Analyzed strawberry varieties and selected forms

Генотип	Происхождение	Оригинатор
Айдарина	Sunrise × Darselect	Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, Крым
Саника	Sunrise × Заря	
Ласточка	922-67 × Привлекательная	Федеральный научный центр им. И. В. Мичурина, Россия
Рубиновый каскад		
Памяти Зубова	[Фейерверк × (Belrubi × <i>F. ovalis</i> Rydb.)] × Holiday	
Фейерверк	Zenga Zengana × Redcoat	
Яркая		
1/6-41	Vima Zanta × Polka	
2/1-24	Quicky × Olympia	
2/2-8-16	Привлекательная × Polka	
3/2-3	Vima Zanta × Привлекательная	
3/2-62		
3/9-28	Florence × Faith	
4/7-10	Asia × Aprica	
4/7-19		
5/1-105	Polka × Vima Zanta	
5/2-26	San Andreas × Monterey	
5/2-32		
6/3-6	Kimberly × 9/2-2	
7/2-16	Asia × Maya	
9/2-7	Kimberly × Honeoye	
9/2-41		
56-19	Gigantella Maxim × Привлекательная	
Дар	<i>F. × ananassa</i> × <i>F. moschata</i>	Россия
Лебедушка	Нет доступной информации	Украина
Antea	FB6L-3 × Onebor	CIV, Италия
Aprica	Нет доступной информации	
Arosa	Marmolada × Chandler	
Clery	Sweet Charlie × Onebor	
Laetitia	Нет доступной информации	
Murano	R6R1-26 × A030-12	
Quicky	CIVN251	
Rubino CIV	Нет доступной информации	
Asia	NF421	NEW FRUITS, Италия
Brilla	FC 04.256.32	CRA-Unità di Ricerca per la Frutticoltura, Италия
Verona	Нет доступной информации	Fragolà, Италия
Cory	P241102	VISSERS AMERICA BV, Нидерланды
Kimberly	Gorella × Chandler	GEBR.VISSERS, Нидерланды
Korona	Tamella × Induka	PRI, Нидерланды
Ostara	Red Gauntlet × Masherahs Daurernte	
Rumba	Нет доступной информации	Fresh Forward B. V., Нидерланды
Salsa	Нет доступной информации	
Vicoda	Нет доступной информации	Visser's Aardbeiplanten B. V., Нидерланды

Окончание табл. 1

Генотип	Происхождение	Оригинатор
Cabrillo	Cal 3.149-8 × Cal 5.206-5.	University of California Davis, США
Monterey	Cal. 27-85.06 × Albion	
Portola	Cal 97.93-7 × Cal 97.209-1	
San Andreas	Albion × Cal 97.86-1	
Selva	Cal 70.3-117 × Cal 71.98-605	
Driscoll Jubilee	50C130 × 19A331	Driscoll's, Великобритания
Flamenco	Evita × EMR77	East Malling Research Station, Великобритания
Florence	[Tioga × (Red Gauntlet × (Wiltguard × Gorella))] × (Providence × self)	MEIOSIS LTD, Великобритания
Malwina	Sophie × clone Schimmelpfeng, Weißenstefan	Peter Stoppel, Германия
Chamora Turusi	Нет доступной информации	Япония
Tsunaki	Нет доступной информации	

Геномную ДНК выделяли из молодых листьев, экстракция проводилась СТАВ-методом, модифицированным для культуры земляники [25].

Для идентификации гена *Rca2* использовали маркер STS-*Rca2*_240 (целевой продукт – ампликон размером 240 п. н., сцепленный с аллелем резистентности). SCAR маркер STS-*Rca2*_240 разработан на основании анализа полиморфизма AFLP последовательностей сортов Capitola (гетерозиготный генотип – *Rca2rca2*), Pajaro (рецессивный гомозиготный генотип – *rca2rca2*) и 179 гибридных семян комбинации скрещивания Capitola × Pajaro [20]. Для контроля протекания ПЦР и исключения ложноотрицательных результатов применяли маркер EMFv020. Целевой продукт маркера EMFv020 амплифицируется у всех генотипов земляники в независимости от аллельного состояния гена *Rca2* [26]. Маркеры STS-*Rca2*_240 и EMFv020 применялись в мультиплексной реакции [20]. В качестве положительного контроля – носителя аллеля *Rca2* использовался сорт Elianny [27].

Полимеразную цепную реакцию проводили в термоциклере T100 (Bio-Rad, США) с использованием описанных ранее набора реактивов и программы амплификации [25, 27].

Разделение продуктов амплификации осуществляли методом электрофореза в 2%-м агарозном геле с использованием трис-боратного буфера (ТБЕ). Определение размера амплифицированных продуктов проводили с использованием ДНК-маркера Step100 (Биолабмикс, Россия). Визуализацию результатов проводили с использованием системы гель-документации ChemiDoc XRS+ (Bio-Rad, США).

Результаты и их обсуждение. В результате проведенного молекулярно-генетического анализа маркер STS-*Rca2*_240, сцепленный с аллелем резистентности к антракнозной черной гнили *Rca2*, выявлен у 14 (25,9 %) из 54 проанализированных образцов. Среди сортов он присутствует у 8 форм (21,1 %), а среди отборных форм – у 6 (37,5 %). У остальных изучаемых образцов маркерный

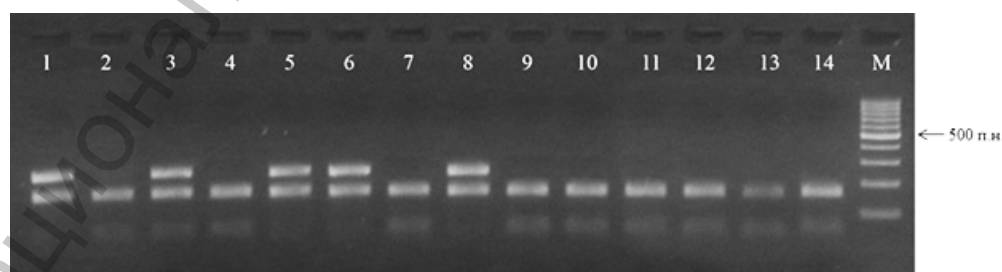


Рис. 1. Электрофоретический спектр маркерных фрагментов гена *Rca2* у сортов земляники: 1 – Elianny (контроль); 2 – San Andreas; 3 – Дар; 4 – Clery; 5 – Selva; 6 – Portola; 7 – Antea; 8 – Monterey; 9 – Vicoda; 10 – Rubino CIV; 11 – Cory; 12 – Brilla; 13 – Rumba; 14 – Tsunaki; M – маркер молекулярного веса ДНК Step100

Fig. 1. Electrophoretic profile of the *Rca2* gene marker fragments in strawberry varieties: 1 – Elianny (control); 2 – San Andreas; 3 – Dar; 4 – Clery; 5 – Selva; 6 – Portola; 7 – Antea; 8 – Monterey; 9 – Vicoda; 10 – Rubino CIV; 11 – Cory; 12 – Brilla; 13 – Rumba; 14 – Tsunaki; M – DNA molecular weight marker Step100

фрагмент отсутствует, что свидетельствует о гомозиготном состоянии аллеля *rca2* (не связан с детерминацией устойчивости к *C. acutatum*). Пример полученных электрофоретических спектров маркера STS-Rca2_240 показан на рис. 1 (сорта земляники) и 2 (отборные формы), результаты идентификации представлены в табл. 2.

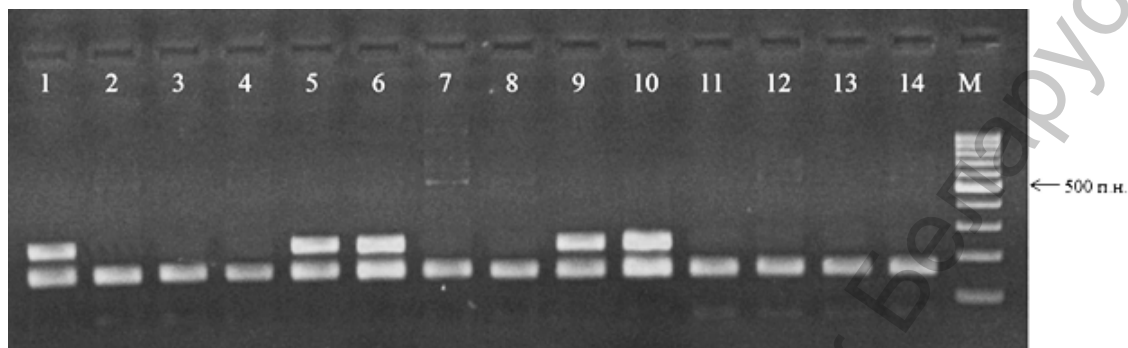


Рис. 2. Электрофоретический спектр маркерных фрагментов гена *Rca2* у отборных форм земляники: 1 – Elianny (контроль); 2 – 7/2-16; 3 – 5/6-19; 4 – 6/3-6; 5 – 3/9-28; 6 – 2/1-24; 7 – 9/2-7; 8 – 1/6-41; 9 – 4/7-10; 10 – 4/7-19; 11 – 9/2-41; 12 – 3/2-62; 13 – 5/1-105; 14 – 2/2-8-16; M – маркер молекулярного веса ДНК Step100

Fig. 2. Electrophoretic profile of the *Rca2* gene marker fragments in strawberry selected forms: 1 – Elianny (control); 2 – 7/2-16; 3 – 5/6-19; 4 – 6/3-6; 5 – 3/9-28; 6 – 2/1-24; 7 – 9/2-7; 8 – 1/6-41; 9 – 4/7-10; 10 – 4/7-19; 11 – 9/2-41; 12 – 3/2-62; 13 – 5/1-105; 14 – 2/2-8-16; M – DNA molecular weight marker Step100

Таблица 2. Аллельный полиморфизм локуса устойчивости к антракнозной черной гнили *Rca2* у сортов и форм земляники садовой

Table 2. Allelic polymorphism of *Rca2* anthracnose resistance locus in garden strawberry varieties and selected forms

Сорт	Маркер STS-Rca2_240	Сочетание аллелей гена <i>Rca2</i>
Айдарина	–	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Дар	+	Гетерозиготное
Ласточка	–	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Лебедушка	–	
Памяти Зубова	–	
Рубиновый каскад	–	
Саника	–	
Фейерверк	–	
Яркая	–	
Antea	–	
Aprica	+	Гомозиготное (аллель <i>Rca2</i>) или гетерозиготное
Arosa	–	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Asia	–	
Brilla	–	
Cabrillo	–	
Chamora Turusi	–	
Clery	–	
Cory	–	
Driscoll Jubilee	–	
Flamenco	–	Гомозиготное (аллель <i>Rca2</i>) или гетерозиготное
Florence	+	
Kimberly	–	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Korona	–	
Laetitia	+	Гомозиготное (аллель <i>Rca2</i>) или гетерозиготное
Malwina	+	
Monterey	+	

Окончание табл. 2

Сорт	Маркер STS-Rca2_240	Сочетание аллелей гена <i>Rca2</i>
Murano	—	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Ostara	—	
Portola	+	Гомозиготное (аллель <i>Rca2</i>) или гетерозиготное
Quicky	—	
Rubino CIV	—	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Rumba	—	
Salsa	—	
San Andreas	—	
Selva	+	Гомозиготное (аллель <i>Rca2</i>) или гетерозиготное
Tsunaki	—	
Verona	—	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
Vicoda	—	
1/6-41	—	Гетерозиготное
2/1-24	+	
2/2-8-16	—	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
3/2-3	—	
3/2-62	—	Гетерозиготное
3/9-28	+	
4/7-10	+	
4/7-19	+	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
5/1-105	—	
5/2-26	+	Гетерозиготное
5/2-32	+	
6/3-6	—	Гомозиготное (аллель <i>rca2</i>)
7/2-16	—	
9/2-7	—	
9/2-41	—	
56-19	—	

Примечание. Символы «+» и «—» показывают присутствие или отсутствие маркерного фрагмента гена *Rca2*.
 Note. Symbols “+” and “—” indicate presence or absence of the marker fragment of *Rca2* gene.

Необходимо отметить, что у проанализированных сортов отечественной селекции (8 генотипов) маркер STS-Rca2_240 выявлен у сорта земклуники Дар (12,5 %). Редкая встречаемость гена *Rca2* в геноплазме отечественных сортов земляники подтверждается исследованиями, проведенными нами ранее [27, 28], а также литературными данными [23].

Среди сортов зарубежной селекции (30 генотипов) ген *Rca2* выявлен у 7 форм (Aprica, Florence, Laetitia, Malwina, Monterey, Portola, Selva), что составляет 23,3 %. В проведенных ранее исследованиях сортов земляники садовой зарубежной селекции по гену *Rca2* маркер STS-Rca2_240 выявлен у 21 генотипа (48,8 %) из 43 [20], 1 сорта (16,7 %) из 6 [29] и 22 образцов (70,9 %) из 31 [30]. Значительный разброс в количестве идентифицированных носителей аллеля резистентности *Rca2*, предположительно, обусловлен различиями в формировании анализируемых выборок. Результаты оценки аллельного состояния *Rca2* у сортов Asia, Clery, Kimberly, Malwina, Portola, Rubino CIV, Rumba и Selva подтверждаются также данными молекулярного скрининга из литературных источников [20, 23, 30, 31]. Кроме того, устойчивость к антракнозу сортов земляники садовой Selva и Florence подтверждается данными искусственного заражения [32, 33].

Так как маркер STS-Rca2_240 является доминантным, то для выявления аллельных комбинаций гена *Rca2* у форм с идентифицированным маркерным фрагментом был проведен анализ их происхождения.

Сорт земклуники Дар получен интрогрессией геноплазмы дикорастущего вида земляника мускатная (*F. moschata* Duch.) в геном земляники садовой. Так как для *F. moschata* характерно гомозиготное состояние аллеля *rca2* [25], то аллель резистентности *Rca2* данный сорт, предположительно, наследовал от используемых в гибридизации форм земляники садовой и, следовательно, характеризуется гетерозиготным сочетанием аллелей гена *Rca2*.

Сорт земляники Portola выделен в гибридной комбинации Cal 97.93-7 × Cal 97.209-1, сорт Monterey – в комбинации Cal. 27–85.06 × Albion, Selva – в комбинации Cal 70.3-117 × Cal 71.98-605, Malwina – в комбинации Sophie × clone Schimmelpfeng, Weihenstefan, Florence – в комбинации [Tioga × (Red Gauntlet × (Wiltguard × Gorella))] × (Providence × self), для которых сведения об аллельном состоянии гена *Rca2* в исходных родительских формах отсутствуют. Для сортов Aprica и Laetitia использованные родительские генотипы неизвестны. В связи с этим для уточнения аллельного состояния гена *Rca2* у указанных сортов необходимо проведение дополнительных исследований.

Среди проанализированных отборных форм земляники маркерный фрагмент гена *Rca2* идентифицирован у гибридов 2/1-24 (Quickly × Olympia), 3/9-28 (Florence × Faith), 4/7-10, 4/7-19 (Asia × Aprica), 5/2-26, 5/2-32 (San Andreas × Monterey).

В комбинации скрещивания Quickly × Olympia источником аллеля *Rca2*, предположительно, является сорт Olympia (сорт Quickly характеризуется гомозиготным состоянием аллеля *rca2*), в комбинации Florence × Faith – сорт Florence (сорт Faith характеризуется гомозиготным состоянием аллеля *rca2* [28]), в комбинации Asia × Aprica – сорт Aprica, в комбинации San Andreas × Monterey – сорт Monterey (сорты Asia и San Andreas характеризуются гомозиготным состоянием аллеля *rca2* (см. табл. 2)). Поэтому отборные формы 2/1-24 (Quickly × Olympia), 3/9-28 (Florence × Faith), 4/7-10, 4/7-19 (Asia × Aprica), 5/2-26, 5/2-32 (San Andreas × Monterey) характеризуются гетерозиготным сочетанием аллелей гена *Rca2*.

Заключение. Согласно результатам молекулярно-генетического анализа устойчивостью к антракнозной черной гнили, детерминированной геном *Rca2*, характеризуются сорт земляники Дар (гетерозиготное сочетание аллелей), сорта земляники садовой Aprica, Florence, Laetitia, Malwina, Monterey, Portola, Selva (гомозиготное (аллель *Rca2*) или гетерозиготное сочетание аллелей) и перспективные отборные формы 2/1-24 (Quickly × Olympia), 3/9-28 (Florence × Faith), 4/7-10, 4/7-19 (Asia × Aprica), 5/2-26, 5/2-32 (San Andreas × Monterey) (гетерозиготное сочетание аллелей). Отмеченные формы являются генетическими источниками и донорами аллеля резистентности *Rca2* и перспективны для использования в программах маркер-опосредованной селекции земляники. У остальных проанализированных образцов ген *Rca2* представлен аллелем *rca2* в гомозиготном состоянии.

Список использованных источников

1. Folta, K. M. Strawberry genes and genomics / K. M. Folta, T. M. Davis // Critical Reviews in Plant Sciences. – 2006. – Vol. 25, № 5. – P. 399–415. <https://doi.org/10.1080/07352680600824831>
2. Лукьянчук, И. В. Комплексная устойчивость земляники к белой и бурой пятнистостям / И. В. Лукьянчук // Плодоводство и ягодоводство России. – 2013. – Т. 36, № 1. – С. 366–369.
3. Холод, Н. А. Болезни земляники на Юге России / Н. А. Холод // Защита и карантин растений. – 2013. – № 10. – С. 28–30.
4. Ahmed, M. F. A. Effect of biological control of root rot diseases of strawberry using *Trichoderma* spp. / M. F. A. Ahmed, I. A. I. El-Fiki // Middle East Journal of Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, № 3. – P. 482–492.
5. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea* / S. Petrasch, S. J. Knapp, J. A. L. van Kan, B. Blanco-Ulate // Molecular Plant Pathology. – 2019. – Vol. 20, № 6. – P. 877–892. <https://doi.org/10.1111/mpp.12794>
6. Smith, B. J. Epidemiology and pathology of strawberry anthracnose: a North American perspective / B. J. Smith // HortScience. – 2008. – Vol. 43, № 1. – P. 69–73.
7. The *Colletotrichum acutatum* species complex / U. Damm, P. F. Cannon, J. H. C. Woudenberg, P. W. Crous // Studies in Mycology. – 2012. – Vol. 73, № 1. – P. 37–113. <https://doi.org/10.3114/sim0010>
8. Karimi, K. Weeds as potential inoculum reservoir for *Colletotrichum nymphaeae* causing strawberry anthracnose in Iran and Rep-PCR fingerprinting as useful marker to differentiate *C. acutatum* complex on strawberry / K. Karimi, M. Arzanlou, I. Pertot // Frontiers in Microbiology. – 2019. – Vol. 10. – Art. 129. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00129>
9. Кузнецова, А. А. Антракноз земляники, классические и современные методы диагностики / А. А. Кузнецова, И. П. Дудченко, М. Б. Копина // Современные подходы и методы в защите растений: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Екатеринбург, 12–14 нояб. 2018 г. / Урал. федер. ун-т; редкол.: Т. В. Глухарева, Ю. И. Нейн. – Екатеринбург, 2018. – С. 78–81.
10. Chung, P.-C. Diversity and pathogenicity of *Colletotrichum* species causing strawberry anthracnose in Taiwan and description of a new species, *Colletotrichum miaoliense* sp. nov. / P.-C. Chung, H.-Y. Wu, Y.-W. Wang [et al.] // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, № 1. – Art. 14664. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70878-2>

11. *FaRCa1* confers moderate resistance to the root necrosis form of strawberry anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum* / N. Salinas, Z. Fan, N. Peres [et al.] // HortScience. – 2020. – Vol. 55, № 5. – P. 693–698. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14807-20>
12. Оценка устойчивости сортов земляники садовой к антракнозной черной гнили в южном регионе / Н. А. Холод, Ю. П. Кащиц, Е. А. Добренков, Л. Г. Семенова // Плодоводство и виноградарство Юга России. – 2018. – № 51 (3). – С. 137–145. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2018-3-51-137-145>
13. A novel strain of endophytic *Streptomyces* for the biocontrol of strawberry anthracnose caused by *Glomerella cingulate* / M. Marian, T. Ohno, H. Suzuki [et al.] // Microbiological Research. – 2020. – Vol. 234. – Art. 126428. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126428>
14. Validation of a Florida strawberry anthracnose fruit rot (AFR) warning system in Iowa / X. Zhang, J. C. Batzer, X. Li [et al.] // Plant Disease. – 2019. – Vol. 103, № 1. – P. 28–33. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-17-1762-RE>
15. Fitness, competitive ability, and mutation stability of isolates of *Colletotrichum acutatum* from strawberry resistant to QoI fungicides / B. B. Forcelini, C. S. Rebello, N.-Y. Wang, N. A. Peres // Phytopathology. – 2018. – Vol. 108, № 4. – P. 462–468. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-17-0296-R>
16. Biocontrol potential of *Bacillus amyloliquefaciens* Bc2 and *Trichoderma harzianum* TR against strawberry anthracnose under laboratory and field conditions / R. Es-Soufi, H. Tahiri, L. Azaroual [et al.] // Agricultural Sciences. – 2020. – Vol. 11, № 3. – P. 260–277. <https://doi.org/10.4236/as.2020.113017>
17. Preharvest and postharvest application of garlic and rosemary essential oils for controlling anthracnose and quality assessment of strawberry fruit during cold storage / S. Hosseini, J. Amini, M. K. Saba [et al.] // Frontiers in Microbiology. – 2020. – Vol. 11. – Art. 1855. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01855>
18. Жученко, А. А. Биологизация и экологизация интенсификационных процессов в сельском хозяйстве / А. А. Жученко // Вестник ОрелГАУ. – 2009. – № 3 (18). – С. 8–12.
19. The use of molecular markers for durable resistance breeding in the cultivated strawberry (*Fragaria × ananassa*) / E. Lerceteau-Köhler, P. Roudeillac, M. Markocic [et al.] // Acta Horticulturae. – 2002. – № 567. – P. 615–618. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.132>
20. Lerceteau-Köhler, E. Identification of SCAR markers linked to *Rca2* anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germplasm / E. Lerceteau-Köhler, G. Guérin, B. Denoyes-Rothan // Theoretical and Applied Genetics. – 2005. – Vol. 111, № 5. – P. 862–870. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-0008-1>
21. Assessing some strawberry genotypes used in breeding programme for increasing resistance to diseases / M. Sturzeanu, M. Calinescu, L. Fralova [et al.] // Fruit Growing Research. – 2017. – Vol. 33. – P. 29–34.
22. Use of RAPD and SCAR markers for identification of strawberry genotypes with red stele resistance genes *Rpf1* and fruit rot resistance genes *Rca2* in the hybrid progenies / M. Sturzeanu, M. Ciuca, D. Cristina A. G. Turcu // Acta Horticulturae. – 2021. – № 1309. – P. 93–100. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.15>
23. DNA-screening of strawberry cultivars and hybrids (*Fragaria ananassa* Duch.) for resistance to fungal diseases / M. Keldibekova, E. Bezlepina, M. Zubkova, M. Dolzhikova // Pakistan Journal of Botany. – 2024. – Vol. 56, № 2. – P. 751–757. [https://doi.org/10.30848/PJB2024-2\(29\)](https://doi.org/10.30848/PJB2024-2(29))
24. Лыжин, А. С. Наследование устойчивости к антракнозу, детерминированной доминантным геном *Rca2*, в гибридном потомстве земляники садовой / А. С. Лыжин, И. В. Лукьянчук // Таврический вестник аграрной науки. – 2023. – № 3 (35). – С. 137–144. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141405>
25. Лукьянчук, И. В. Анализ генетической коллекции земляники (*Fragaria* L.) по генам *Rca2* и *Rpf1* с использованием молекулярных маркеров / И. В. Лукьянчук, А. С. Лыжин, И. И. Козлова // Вавиловский журнал генетики и селекции. – 2018. – Т. 22, № 7. – С. 795–799. <https://doi.org/10.18699/VJ18.423>
26. Development of microsatellite markers in *Fragaria*, their use in genetic diversity analysis, and their potential for genetic linkage mapping / A. M. Hadonou, D. J. Sargent, F. Wilson [et al.] // Genome. – 2004. – Vol. 47, № 3. – P. 429–438. <https://doi.org/10.1139/g03-142>
27. Лыжин, А. С. Полиморфизм сортов земляники (*Fragaria × ananassa*) по гену устойчивости к антракнозу *Rca2* / А. С. Лыжин, И. В. Лукьянчук, Е. В. Жбанова // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – 2019. – Т. 180, № 1. – С. 73–77. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-73-77>
28. Лыжин, А. С. Анализ сортов земляники садовой по устойчивости к антракнозу с использованием диагностических ДНК-маркеров / А. С. Лыжин, И. В. Лукьянчук // Аграрная Россия. – 2022. – № 9. – С. 16–20. <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-9-16-20>
29. Molecular characterization of allelic status of the *Rpf1* and *Rca2* genes in six cultivars of strawberries / M. Sturzeanu, M. Coman, M. Ciuca [et al.] // Acta Horticulturae. – 2016. – № 1139. – P. 107–112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1139.19>
30. Comparison of anthracnose resistance with the presence of two SCAR markers associated with the *Rca2* gene in strawberry / M. A. Miller-Butler, B. J. Smith, B. R. Kreiser, E. K. Blythe // HortScience. – 2019. – Vol. 54, № 5. – P. 793–798. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13805-18>
31. Njuguna, W. Development and use of molecular tools in *Fragaria*: Ph. D. Thesis / Njuguna Wambui; Oregon State Univ. – Corvallis, 2010. – 370 p.
32. Inheritance of resistance to *Colletotrichum acutatum* in *Fragaria × ananassa* / B. Denoyes-Rothan, G. Guérin, E. Lerceteau-Köhler, G. Risser // Phytopathology. – 2005. – Vol. 95, № 4. – P. 405–412. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0405>
33. Wagner, A. Susceptibility of strawberry cultivars to *Colletotrichum acutatum* J. H. Simmonds / A. Wagner, B. Hetman // Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus. – 2016. – Vol. 15, № 6. – P. 209–219.

References

1. Folta K. M., Davis T. M. Strawberry genes and genomics. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, vol. 25, no. 5, pp. 399–415. <https://doi.org/10.1080/07352680600824831>
2. Luk'yanchuk I. V. Complex resistance of strawberries to white and brown spots. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*, 2013, vol. 36, no. 1, pp. 366–369 (in Russian).
3. Kholod N. A. Strawberry diseases in the South of Russia. *Zashchita i karantin rastenii* = *Plant Protection and Quarantine*, 2013, no. 10, pp. 28–30 (in Russian).
4. Ahmed M. F. A., El-Fiki I. A. I. Effect of biological control of root rot diseases of strawberry using *Trichoderma* spp. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 482–492.
5. Petrasch S., Knapp S. J., van Kan J. A. L., Blanco-Ulate B. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea*. *Molecular Plant Pathology*, 2019, vol. 20, no. 6, pp. 877–892. <https://doi.org/10.1111/mpp.12794>
6. Smith B. J. Epidemiology and pathology of strawberry anthracnose: a North American perspective. *HortScience*, 2008, vol. 43, no. 1, pp. 69–73.
7. Damm U., Cannon P. F., Woudenberg J. H. C., Crous P. W. The *Colletotrichum acutatum* species complex. *Studies in Mycology*, 2012, vol. 73, no. 1, pp. 37–113. <https://doi.org/10.3114/sim0010>
8. Karimi K., Arzanlou M., Pertot I. Weeds as potential inoculum reservoir for *Colletotrichum nymphaeae* causing strawberry anthracnose in Iran and Rep-PCR fingerprinting as useful marker to differentiate *C. acutatum* complex on strawberry. *Frontiers in Microbiology*, 2019, vol. 10, art. 129. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00129>
9. Kuznetsova A. A., Dudchenko I. P., Kopina M. B. Strawberry anthracnose, classical and modern diagnostic methods. *Sovremennye podkhody i metody v zashchite rastenii: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Ekaterinburg, 12–14 noyabrya 2018 g.* [Modern approaches and methods in plant protection: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, Ekaterinburg, November 12–14, 2018]. Ekaterinburg, 2018, pp. 70–73 (in Russian).
10. Chung P.-C., Wu H.-Y., Wang Y.-W., Ariyawansa H. A., Hu H.-P., Hung T.-H., Tzean S.-S., Chung C.-L. Diversity and pathogenicity of *Colletotrichum* species causing strawberry anthracnose in Taiwan and description of a new species, *Colletotrichum miaoliense* sp. nov. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, art. 14664. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70878-2>
11. Salinas N., Fan Z., Peres N., Lee S., Whitaker V. M. *FaRCa1* confers moderate resistance to the root necrosis form of strawberry anthracnose caused by *Colletotrichum acutatum*. *HortScience*, 2020, vol. 55, no. 5, pp. 693–698. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14807-20>
12. Holod N. A., Kashchits Yu. P., Dobrenkov E. A., Semenova L. G. Evaluation of stability of strawberry varieties to anthracnose black rot in the southern region. *Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii* = *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*, 2018, no. 51 (3), pp. 140–148 (in Russian). <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2018-3-51-140-148>
13. Marian M., Ohno T., Suzuki H., Kitamura H., Kuroda K., Shimizu M. A novel strain of endophytic *Streptomyces* for the biocontrol of strawberry anthracnose caused by *Glomerella cingulate*. *Microbiological Research*, 2020, vol. 234, art. 126428. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126428>
14. Zhang X., Batzer J. C., Li X., Peres N. A., Gleason M. L. Validation of a Florida strawberry anthracnose fruit rot (AFR) warning system in Iowa. *Plant Disease*, 2019, vol. 103, no. 1, pp. 28–33. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-17-1762-RE>
15. Forcelini B. B., Rebello C. S., Wang N.-Y., Peres N. A. Fitness, competitive ability, and mutation stability of isolates of *Colletotrichum acutatum* from strawberry resistant to QoI fungicides. *Phytopathology*, 2018, vol. 108, no. 4, pp. 462–468. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-17-0296-R>
16. Es-Soufi R., Tahiri H., Azaroual L., El Oualkadi A., Martin P., Badoc A., Lamarti A. Biocontrol potential of *Bacillus amyloliquefaciens* Bc2 and *Trichoderma harzianum* TR against strawberry anthracnose under laboratory and field conditions. *Agricultural Sciences*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 260–277. <https://doi.org/10.4236/as.2020.113017>
17. Hosseini S., Amini J., Saba M. K., Karimi K., Pertot I. Preharvest and postharvest application of garlic and rosemary essential oils for controlling anthracnose and quality assessment of strawberry fruit during cold storage. *Frontiers in Microbiology*, 2020, vol. 11, art. 1855. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01855>
18. Zhuchenko A. A. Biologization and ecologization of intensification processes in agriculture. *Vestnik OrelGAU*, 2009, no. 3 (18), pp. 8–12 (in Russian).
19. Lerceteau-Kohler E., Roudeillac P., Markocic M., Guérin G., Praud K., Denoyes-Rothan B. The use of molecular markers for durable resistance breeding in the cultivated strawberry (*Fragaria × ananassa*). *Acta Horticulturae*, 2002, no. 567, pp. 615–618. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.132>
20. Lerceteau-Kohler E., Guérin G., Denoyes-Rothan B. Identification of SCAR markers linked to *Rca2* anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germplasm. *Theoretical and Applied Genetics*, 2005, vol. 111, no. 5, pp. 862–870. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-0008-1>
21. Sturzeanu M., Calinescu M., Fralova L., Klakotskaya N., Ancu I., Sumedrea M., Marin F. C. Assessing some strawberry genotypes used in breeding programme for increasing resistance to diseases. *Fruit Growing Research*, 2017, vol. 33, pp. 29–34.
22. Sturzeanu M., Ciuca M., Cristina D., Turcu A. G. Use of RAPD and SCAR markers for identification of strawberry genotypes with red stele resistance genes *Rpf1* and fruit rot resistance genes *Rca2* in the hybrid progenies. *Acta Horticulturae*, 2021, no. 1309, pp. 93–100. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.15>

23. Keldibekova M., Bezlepkina E., Zubkova M., Dolzhikova M. DNA-screening of strawberry cultivars and hybrids (*Fragaria ananassa* Duch.) for resistance to fungal diseases. *Pakistan Journal of Botany*, 2024, vol. 56, no. 2, p. 751–757. [https://doi.org/10.30848/PJB2024-2\(29\)](https://doi.org/10.30848/PJB2024-2(29))
24. Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V. Inheritance of anthracnose resistance determined by the dominant *Rca2* gene in strawberry hybrid progeny. *Tavrisheskii vestnik agrarnoi nauki* = *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*, 2023, no. 3 (35), pp. 137–144 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141405>
25. Luk'yanchuk I. V., Lyzhin A. S., Kozlova I. I. Analysis of strawberry genetic collection (*Fragaria* L.) for *Rca2* and *Rpf1* genes with molecular markers. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 795–799 (in Russian). <https://doi.org/10.18699/VJ18.423>
26. Hadonou A. M., Sargent D. J., Wilson F., James C. M., Simpson D. W. Development of microsatellite markers in *Fragaria*, their use in genetic diversity analysis, and their potential for genetic linkage mapping. *Genome*, 2004, vol. 47, no. 3, pp. 429–438. <https://doi.org/10.1139/g03-142>
27. Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V., Zhanova E. V. Polymorphism of the *Rca2* anthracnose resistance gene in strawberry cultivars (*Fragaria* × *ananassa*). *Trudy po prikladnoi botanike, genetike i selektsii* = *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, 2019, vol. 180, no. 1, pp. 73–77 (in Russian). <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-73-77>
28. Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V. Analysis of *Fragaria* × *ananassa* Duch. varieties for anthracnose resistance using diagnostic DNA markers. *Agrarnaya Rossiya* = *Agrarian Russia*, 2022, no. 9, pp. 16–20 (in Russian). <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-9-16-20>
29. Sturzeanu M., Coman M., Ciuca M., Ancu I., Cristina D., Turcu A. G. Molecular characterization of allelic status of the *Rpf1* and *Rca2* genes in six cultivars of strawberries. *Acta Horticulturae*, 2016, no. 1139, pp. 107–112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1139.19>
30. Miller-Butler M. A., Smith B. J., Kreiser B. R., Blythe E. K. Comparison of anthracnose resistance with the presence of two SCAR markers associated with the *Rca2* gene in strawberry. *HortScience*, 2019, vol. 54, no. 5, pp. 793–798. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13805-18>
31. Njuguna W. *Development and use of molecular tools in Fragaria*. Corvallis, 2010. 370 p.
32. Denoyes-Rothan B., Guérin G., Lerceteau-Köhler E., Risser G. Inheritance of resistance to *Colletotrichum acutatum* in *Fragaria* × *ananassa*. *Phytopathology*, 2005, vol. 95, no. 4, pp. 405–412. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-95-0405>
33. Wagner A., Hetman B. Susceptibility of strawberry cultivars to *Colletotrichum acutatum* J. H. Simmonds. *Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus*, 2016, vol. 15, no. 6, pp. 209–219.

Информация об авторах

Лыжин Александр Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И. В. Мичурина (ул. Мичурина, 30, 393774, Мичуринск, Тамбовская область, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0001-9770-8731>. E-mail: Ranenburzhetc@yandex.ru

Лукьянчук Ирина Васильевна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И. В. Мичурина (ул. Мичурина, 30, 393774, Мичуринск, Тамбовская область, Мичуринск, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0003-1626-840X>. E-mail: irina.lk2011@yandex.ru

Information about the authors

Alexander S. Lyzhin – Ph. D. (Agriculture), Leading Researcher, I. V. Michurin Federal Science Center (30, Michurin Str., 393774, Michurinsk, Tambov Region, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-9770-8731>. E-mail: Ranenburzhetc@yandex.ru

Irina V. Luk'yanchuk – Ph. D. (Agriculture), Leading Researcher, I. V. Michurin Federal Science Center (30, Michurin Str., 393774, Michurinsk, Tambov Region, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-1626-840X>. E-mail: irina.lk2011@yandex.ru