

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 634.75:577.2:632.4
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-4-150-158



Анализ полиморфизма локуса *FaRca1* для выявления устойчивых к *Colletotrichum acutatum* генотипов земляники

А. С. Лыжин, И. В. Лукьянчук

Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Мичуринск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Лыжин, Ranenburzhetc@yandex.ru

Актуальность. Антракнозная гниль плодов (*Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds) – опасное заболевание земляники садовой. Возделывание сортов с генетически детерминированной устойчивостью позволит минимизировать использование химических средств защиты и повысит качество получаемой продукции. Цель исследования – анализ аллельного полиморфизма локуса *FaRca1* у сортов земляники садовой для идентификации перспективных генетических источников устойчивости к антракнозной гнили плодов, вызываемой *C. acutatum*.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись 57 сортов земляники садовой (*Fragaria × ananassa* Duch.) генетической коллекции Федерального научного центра (ФНЦ) имени И.В. Мичурина. Идентификацию аллельного состояния локуса *FaRca1* проводили методом анализа кривых плавления с высоким разрешением (high-resolution melting) с использованием праймеров ID3F и ID1R.

Результаты и выводы. У изучаемых сортов земляники locus резистентности *FaRca1* представлен двумя вариантами комбинации аллелей: гомозиготный восприимчивый генотип (AA) и гетерозиготный устойчивый генотип (AB). Аллель резистентности *FaRca1* (генотип AB) выявлен у 50,9% сортов земляники. Гомозиготным восприимчивым генотипом (AA) характеризуется 49,1% изучаемых сортов. Сорт с гомозиготным устойчивым генотипом (BB) не выявлено. Среди сортов российской селекции доля генотипов с локусом *FaRca1* составила 44,4%, среди зарубежных сортов – 53,8%. Среди генотипов земляники селекции ФНЦ им. И.В. Мичурина аллель *FaRca1* идентифицирован у сортов 'Урожайная ЦГЛ', 'Флора' и 'Яркая'. Перспективными генетическими источниками для использования в программах маркер-опосредованной селекции являются сорта, совмещающие в геноме несколько факторов устойчивости: 'Боровицкая', 'Aргica' (локусы устойчивости к антракнозу *FaRca1* и *Rca2*), 'Korona', 'Ostara' (локусы устойчивости к антракнозу *FaRca1* и мучнистой росе *O8 To-f*), 'Былинная' (локусы устойчивости к антракнозу *FaRca1*, мучнистой росе *O8 To-f* и фитофторозной корневой гнили *Rpf1*).

Ключевые слова: *Fragaria × ananassa*, молекулярные маркеры, маркер-опосредованная селекция, сорт, устойчивость, антракноз

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ФНЦ им. И.В. Мичурина по проекту FGSU-2022-0001 «Провести скрининг генетических ресурсов культурных растений, диких видов и их производных с целью формирования исследовательско-селекционных коллекций садовых культур. Выявить вариабельность экономически важных и селекционно значимых признаков, выделить перспективные для дальнейшего использования генотипы».

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

Для цитирования: Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Анализ полиморфизма локуса *FaRca1* для выявления устойчивых к *Colletotrichum acutatum* генотипов земляники. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(4):150-158. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-4-150-158

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-4-150-158

Analysis of polymorphism at the *FaRca1* locus to identify strawberry genotypes resistant to *Colletotrichum acutatum*

Alexander S. Lyzhin, Irina V. Luk'yanchuk

I.V. Michurin Federal Science Center, Michurinsk, Russia

Corresponding author: Alexander S. Lyzhin, Ranenburzhetc@yandex.ru

Background. Anthracnose fruit rot (AFR), caused by *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds, is a dangerous disease of strawberry. The employment of cultivars with genetically determined resistance will minimize the use of chemical means of plant protection and increase the produce quality. The objective of the study was to analyze allelic polymorphism at the *FaRca1* locus in strawberry cultivars to identify promising genetic sources of resistance to anthracnose fruit rot caused by *C. acutatum*.

Materials and methods. The materials of this study were 57 strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cultivars. The allelic state of the *FaRca1* locus was identified by high-resolution melting analysis (HRM) using the ID3F and ID1R primers.

Results and conclusion. In the studied strawberry cultivars, the *FaRca1* resistance locus was represented by two allelic combinations: homozygous susceptible genotype (AA) and heterozygous resistant genotype (AB). The resistance allele *FaRca1* (genotype AB) was detected in 50.9% of strawberry cultivars. The homozygous susceptible genotype (AA) was characteristic of 49.1% studied strawberry cultivars. There were no strawberry cultivars with a homozygous resistant genotype (BB). Among the Russian strawberry cultivars, the *FaRca1* locus was identified in 44.4% of forms, while among the foreign ones, it was identified in 53.8%. Among the strawberry genotypes developed at the I.V. Michurin Federal Science Center, the *FaRca1* allele was identified in cvs. 'Urozhaynaya CGL', 'Flora' and 'Yarkaya'. Promising genetic sources for marker-assisted breeding are strawberry cultivars combining several resistance factors in the genome: 'Borovitskaya' and 'Aprica' (*FaRca1* and *Rca2* anthracnose resistance loci), 'Korona' and 'Ostara' (*FaRca1* anthracnose resistance locus, and *08 To-f* powdery mildew resistance locus), and 'Bylinnaya' (*FaRca1* anthracnose resistance locus, *08 To-f* powdery mildew resistance locus, and *Rpf1* red stele root rot resistance locus).

Keywords: *Fragaria × ananassa*, molecular markers, marker-assisted breeding, cultivar, resistance, anthracnose

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of the I.V. Michurin Federal Science Center, Project No. FGSU-2022-0001 "To conduct screening among genetic resources of cultivated plants, wild species, and their derivatives in order to form collections of horticultural crops for research and breeding. To identify the variability of traits of economic importance and breeding value, and to identify genotypes promising for further utilization".

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

For citation: Lyzhin A.S., Luk'yanchuk I.V. Analysis of polymorphism at the *FaRca1* locus to identify strawberry genotypes resistant to *Colletotrichum acutatum*. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(4):150-158. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-4-150-158

Введение

Современные сорта земляники наряду с высокой урожайностью и товарно-потребительскими качествами плодов (размер, плотность, вкус, аромат плодов) должны характеризоваться высоким уровнем устойчивости к наиболее распространенным заболеваниям (Whitaker et al., 2020; Marchenko, 2021). Генетически детерминированная устойчивость к патогенам позволит минимизировать использование химических средств защиты при возделывании, снизит затраты и повысит качество получаемой продукции (Gorgitano, Pirilli, 2016). Поэтому устойчивость к болезням – одно из приоритетных направлений селекции сельскохозяйственных культур, в том числе и земляники садовой (Khan et al., 2020; Marchenko, 2021).

Антракноз – одно из наиболее распространенных и опасных заболеваний земляники. Его возбудителями являются три фитопатогенных гриба из рода *Colletotrichum* Corda: *C. acutatum* J.H. Simmonds, *C. fragariae* A.N. Brooks. и *C. gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc. (Miller-Butler et al., 2018; Zhang et al., 2020). *C. acutatum* поражает плоды (антракнозная гниль плодов) и корневую систему растений (антракнозный некроз корней) (Wang et al., 2018). *C. gloeosporioides* и *C. fragariae* способны поражать все надземные части растения (Smith, 2008). Потери урожая от поражения растений земляники антракнозом могут достигать 80% (Chen et al., 2020). С 2017 г. видовой комплекс *C. acutatum* (31 вид) внесен в единый перечень карантинных объектов Евразийского экономического союза и на территории России относится к числу ограниченно распространенных патогенов (Kuznetsova et al., 2019).

Сорта земляники отличаются по устойчивости к антракнозу (Smith, 2006; Jacobs et al., 2020), и для идентификации перспективных исходных форм необходим анализ существующего сортимента как с использованием метода искусственного заражения, так и путем прямого анализа генетических факторов, участвующих в формировании устойчивости, с использованием молекулярных маркеров.

Устойчивость земляники к антракнозу детерминирована полигенно (Smith, 2008) с преобладающим влиянием аддитивных генных эффектов (Jacobs et al., 2019), однако к настоящему времени выявлено несколько локусов, вносящих наиболее существенный вклад в формирование устойчивости. Так, устойчивость к *C. acutatum* определяется локусами *FaRca1* (изоляты 1-й группы патогенности) (Salinas et al., 2019) и *Rca2* (изоляты 2-й группы патогенности) (Lerceteau-Köhler et al., 2005), а устойчивость к *C. gloeosporioides* – локусом *FaRCg1* (Anciro et al., 2018). Кроме того, для отдельных сортов и комбинаций скрещивания выявлены и другие QTL, характеризующиеся меньшим вкладом в формирование устойчивости (Denoyes-Rothan et al., 2004).

Для использования указанных факторов резистентности в программах маркер-опосредованной селекции были разработаны локус-специфичные ДНК-маркеры: STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417 – ген *Rca2* (Lerceteau-Köhler et al., 2005), ID3F/ID1R – локус *FaRca1* (Salinas et al., 2020), TIFY1A и RLK1A – локус *FaRCg1* (Chandra et al., 2021). И если маркеры гена *Rca2* достаточно активно используются для скрининга генетических коллекций и селекционного материала в России (Khrabrov et al., 2021; Lyzhin, Luk'yanchuk, 2023; Keldibekova et al., 2024; Tarasova et al., 2024) и за рубежом (Sturzeanu et al., 2017, 2021; Miller-But-

ler et al., 2018), то по локусам *FaRca1* и *FaRCg1* мировая коллекция генетических ресурсов рода *Fragaria* L. практически не изучена, что затрудняет направленный подбор исходных форм и снижает эффективность селекционного процесса.

Целью исследования являлся анализ аллельного полиморфизма локуса *FaRca1* у сортов земляники садовой для идентификации перспективных генетических источников устойчивости к антракнозной гнили плодов, вызываемой *C. acutatum*.

Материалы и методы

Исследования проведены в 2023–2024 гг. Биологическими объектами являлись 57 сортов земляники садовой (*Fragaria × ananassa* Duch.) генетической коллекции Федерального научного центра (ФНЦ) имени И.В. Мичурина, интродуцированных из различных эколого-географических регионов России и мира (табл. 1), в том числе 6 сортов собственной селекции института (ФНЦ им. И.В. Мичурина), 12 сортов других НИИ России, 30 сортов европейской селекции, 5 американских сортов, 3 сорта из Японии и 1 украинский сорт.

Контролем являлись сорта земляники 'Monterey' (гомозиготный восприимчивый генотип) и 'Florida Elyana' (гетерозиготный устойчивый генотип) (Salinas et al., 2020).

Идентификацию аллельного состояния локуса *FaRca1* проводили методом анализа кривых плавления с высоким разрешением (High-Resolution Melting, HRM). Данный метод позволяет обнаруживать полиморфизм в двухцепочечной ДНК путем сравнения профилей кривых плавления амплифицированных фрагментов. Так как анализ проводится с использованием Real-time-амплификатора, то детекцию результатов осуществляют сразу после окончания ПЦР, исключая тем самым необходимость электрофоретического разделения ампликонов, что позволяет существенно сократить время проведения анализа. Были использованы аллель-специфичные праймеры ID3F (5'-TGTTCTGCGAGCCCTCT-3') и ID1R (5'-GTCTGGGTCTCTAAAAGGAGAGT-3') (Salinas et al., 2020).

Реакционная смесь общим объемом 25 мкл содержала 20 нг геномной ДНК, 2,0 мМ dNTPs, 2,5 мМ MgCl₂, 0,2 мМ каждого праймера, 0,2 U HS Taq-полимеразы, 1,5 мМ 10x Taq-буфера (+ (NH₄)₂SO₄, –MgCl₂). В качестве красителя для ПЦР использовался Eva488 (Lumiprobe, Россия) в концентрации 0,3 мМ.

Полимеразную цепную реакцию проводили согласно оптимизированной для используемого оборудования и реактивов программе: начальная денатурация: 95°C – 1 мин; далее 55 циклов: 95°C – 15 с, 63°C – 15 с, 72°C – 15 с; далее 95°C – 1 мин; 40°C – 1 мин. Анализ кривых плавления: при температуре от 65°C до 95°C (шаг 0,5°C).

HRM-анализ проводили с использованием системы амплификации в реальном времени CFX96 Real-Time System (Bio-Rad, США). Графический анализ кривых плавления продуктов амплификации выполняли в программе CFX Manager TM (Bio-Rad, США).

Результаты и обсуждение

Локус *FaRca1* устойчивости к антракнозной гнили плодов у земляники садовой картирован на хромосоме Fvb 6-3 эталонного генома сорта 'Camarosa' и представлен двумя аллельными вариантами: аллель А (восприим-

Таблица 1. Анализируемые сорта земляники садовой
Table 1. The analyzed strawberry cultivars

Сорт / Cultivar	Комбинация скрещивания / Crossing combination	Оригинатор / Originator
‘Альфа’	‘Фестивальная Ромашка’ × ‘Сюрприз Олимпиаде’	Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, Россия
‘Берегиня’	‘Соловушка’ × ‘Induka’	
‘Боровицкая’	‘Надежда’ × ‘Red Gauntlet’	
‘Зенит’	‘Senga Sengana’ × ‘Redcoat’	
‘Кокинская Заря’	‘Славутич’ × 157-7	
‘Кубата’	‘Кубенская’ × ‘Holiday’	
‘Незнакомка’	Сеянец неизвестного происхождения	
‘Сударушка’	‘Фестивальная’ × ‘Roxana’	
‘Троицкая’	Нет доступной информации	
‘Царица’	‘Venta’ × ‘Red Gauntlet’	
‘Ласточка’	922-67 × ‘Привлекательная’	Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Россия
‘Привлекательная’	‘Рубиновый кулон’ × ‘Allbritton’	
‘Урожайная ЦГЛ’	‘Senga Sengana’ × ‘Redcoat’	
‘Фейерверк’		
‘Флора’		
‘Яркая’		
‘Былинная’	‘Персиковая’ × Сеянец ВИР-228613	Крымская опытно-селекционная станция – филиал Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Россия
‘Царскосельская’	‘Павловчанка’ × ‘Holiday’	Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, Россия
‘Brilla’	Нет доступной информации	CRA-Unità di Ricerca per la Frutticoltura, Италия
‘Amy’	Нет доступной информации	Mazzoni Group, Италия
‘Antea’	FB6L-3 × ‘Onebor’	CIV, Италия
‘Aprica’	Нет доступной информации	
‘Arosa’	‘Marmolada’ × ‘Chandler’	
‘Clery’	‘Sweet Charlie’ × ‘Onebor’	
‘Murano’	R6R1-26 × A030-12	
‘Quicky’	Нет доступной информации	
‘Rubino CIV’	Нет доступной информации	
‘Asia’	Нет доступной информации	
‘Verona’	Нет доступной информации	Fragolà, Италия

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Сорт / Cultivar	Комбинация скрещивания / Crossing combination	Оригинатор / Originator
'Korona'	'Tamella' × 'Induka'	PRI, Нидерланды
'Ostara'	'Red Gauntlet' × 'Masherahs Daurernte'	
'Sonata'	'Elsanta' × 'Polka'	
'Vima Tarda'	'Vima Zanta' × 'Vicoda'	Vissers International BV, Нидерланды
'Vima Zanta'	'Elsanta' × 'Korona'	
'Cory'	Нет доступной информации	VISSERS AMERICA BV, Нидерланды
'Vicoda'	Нет доступной информации	Vissers Aardbeiplanten B.V., Нидерланды
'Kimberly'	'Gorella' × 'Chandler'	GEBR.VISSERS, Нидерланды
'Rumba'	Нет доступной информации	Fresh Forward B.V., Нидерланды
'Salsa'		
'Cabrillo'	Cal 3.149-8 × Cal 5.206-5	University of California, Davis, США
'Portola'	Cal 97.93-7 × Cal 97.209-1	
'Selva'	Cal 70.3-117 × Cal 71.98-605	
'Florence'	['Tioga' × ('Red Gauntlet' × ('Wiltguard' × 'Gorella'))] × ('Providence' × self)	MEIOSIS LTD, Великобритания
'Driscoll Jubilee'	50C130 × 19A331	Driscoll's, Великобритания
'Symphony'	'Rhapsody' × 'Holiday'	Mylnefield Research Services Ltd, Великобритания
'Flamenco'	'Evita' × EMR77	East Malling Research Station, Великобритания
'Malwina'	'Sophie' × clone 'Schimmelpfeng, Weihenstefan'	Peter Stoppel, Германия
'Лебёдушка'	Нет доступной информации	Украина
'Troubadour'	61AM68 × US2650	Великобритания
'Red Gauntlet'	('New Jersey 1051' × 'Climax') × ('Climax' × 'New Jersey 1051')	Шотландия
'Karmen'	'Georg Soltwedel' × 'Sparkle'	Чехия
'Maryshka'	Нет доступной информации	
'Marshall'	<i>F.</i> × <i>ananassa</i> Duch. × св. опыление	США
'Samson'	Нет доступной информации	
'Chamora Turusi'	Нет доступной информации	Япония
'Tokado'	Нет доступной информации	Япония
'Tsunaki'		

чивый) и аллель В (устойчивый) (Salinas et al., 2020). Вклад локуса в фенотипическую дисперсию признака варьировал от 50,7% до 94,3% (Salinas et al., 2019). Различия между аллелями обусловлено наличием InDel, размером 9 пн, расположенного на расстоянии 1478 пн от SNP зонда AX-89838986. В геноме земляники садовой локус *FaRca1* может иметь три варианта комбинации аллелей: AA (гомозиготный восприимчивый), AB (гетерозиготный устойчивый), BB (гомозиготный устойчивый) (Salinas et al., 2020).

В анализируемой выборке сортов земляники выявлены две комбинации аллелей локуса *FaRca1* – AA и AB. Формы с гомозиготным состоянием аллеля резистентности (BB) отсутствуют. Пример идентификации приведен на рисунке, результаты – в таблице 2.

Аллель резистентности *FaRca1* (генотип AB) выявлен у 50,9% изучаемых сортов земляники. При этом из 6 сортов селекции ФНЦ им. И.В. Мичурина он присутствует у 3 генотипов (50,0%), среди сортов других НИИ РФ – у 41,7% (всего среди российских сортов доля генотипов с локусом *FaRca1* составила 44,4%). У изучаемых европейских сортов аллель *FaRca1* идентифицирован у 50,0% генотипов (15 из 30), у сортов американской селекции – у 40,0% (2 из 5). Также аллель резистентности присутствует у всех изучаемых сортов из Японии и Украины. Общее количество зарубежных сортов с идентифици-

рованным аллелем *FaRca1* составило 53,8%. Различия в распространении аллеля резистентности *FaRca1* в выборках отечественных и зарубежных сортов статистически недостоверны (при уровне значимости $p \leq 0,05$ $t_{\text{факт}} = 1,7 \leq t_{\text{ст}} = 4,3$). Полученные результаты свидетельствуют о присутствии аллеля *FaRca1* в географически отдаленных группах сортов земляники, которые, предположительно, унаследовали его от независимых генетических источников.

Необходимо отметить, что генотипы с идентифицированным локусом *FaRca1* наряду с устойчивостью к антракнозной гнили плодов характеризуются устойчивостью к антракнозному некрозу корней (Salinas et al., 2020).

Распространение аллеля резистентности *FaRca1* у сортов и форм земляники изучено недостаточно. Проведенный ранее анализ генетической коллекции рода *Fragaria* из американской национальной коллекции зародышевой плазмы (National Clonal Germplasm Repository, NCGR) показал присутствие аллеля резистентности *FaRca1* у 46,9% образцов (Zurn et al., 2022), что согласуется с полученными нами данными. Среди географических групп образцов земляники коллекции NCGR локус *FaRca1* выявлен у 47,8% американских сортов и форм, 49,1% европейских и 36,7% азиатских генотипов земляники (Zurn et al., 2022). Необходимо отметить, что в данном ис-

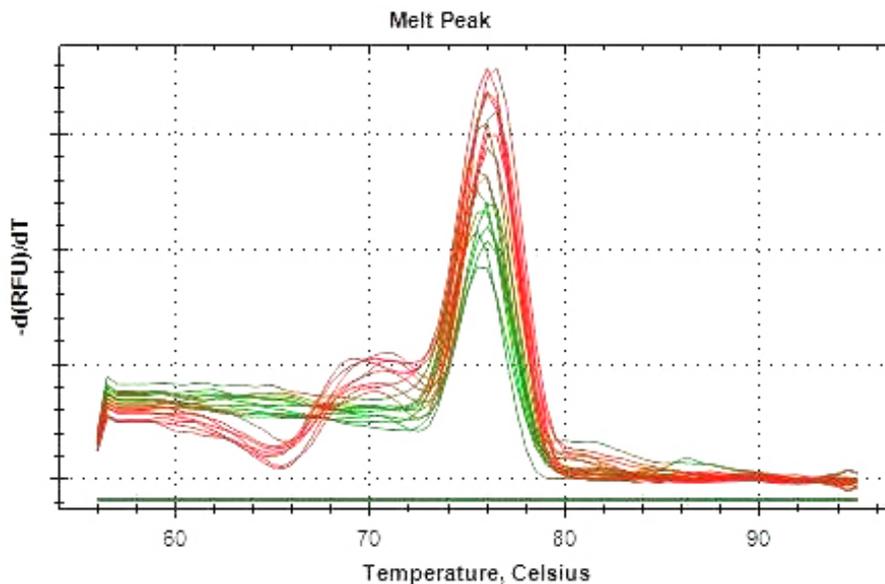


Рисунок. Кривые плавления HRM-маркера ID3F/ID1R (локус *FaRca1*) изучаемых сортов земляники (зеленый – гомозиготный восприимчивый генотип; красный – гетерозиготный устойчивый генотип)

Figure. Melt curves of the HRM marker ID3F/ID1R (*FaRca1* locus) in the studied strawberry cultivars (green color denotes the homozygous susceptible genotype; red color denotes the heterozygous resistant genotype)

Таблица 2. Аллельное состояние локуса *FaRca1* у изучаемых сортов земляники садовой

Table 2. Allelic state of the *FaRca1* locus in the studied strawberry cultivars

Гомозиготное (восприимчивый генотип) / Homozygous susceptible genotype	Гетерозиготное (устойчивый генотип) / Heterozygous resistant genotype
'Альфа', 'Берегиня', 'Былинная', 'Кубата', 'Ласточка', 'Привлекательная', 'Сударушка', 'Фейерверк', 'Царица', 'Царскосельская', 'Amy', 'Antea', 'Brilla', 'Cabrillo', 'Cory', 'Flamenco', 'Florence', 'Malwina', 'Portola', 'Quicky', 'Red Gauntlet', 'Rubino CIV', 'Selva', 'Sonata', 'Symphony', 'Troubadour', 'Vima Tarda', 'Vima Zanta'	'Боровицкая', 'Зенит', 'Кокинская заря', 'Лебёдушка', 'Незнакомка', 'Троицкая', 'Урожайная ЦГЛ', 'Флора', 'Яркая', 'Aprica', 'Arosa', 'Asia', 'Chamora Turusi', 'Clery', 'Driscoll Jubilee', 'Karmen', 'Kimberly', 'Korona', 'Marshall', 'Maryshka', 'Murano', 'Ostara', 'Rumba', 'Salsa', 'Samson', 'Tokado', 'Tsunaki', 'Verona', 'Vicoda'

следования практически отсутствовали формы, полученные в России и СССР (было изучено 9 генотипов, созданных до 60-х гг. прошлого века), а также современные интенсивные европейские сорта, в связи с чем наше исследование является важным этапом генетической характеристики геноплазмы современных сортов и подбора исходных форм для маркер-опосредованной селекции.

Наличие аллеля *FaRca1* у сортов 'Korona' и 'Marshall' подтверждается также литературными данными (Zurn et al., 2022). Кроме того, сорта 'Зенит', 'Урожайная ЦГЛ', 'Флора', 'Яркая', 'Clergy', 'Korona' получены с использованием идентифицированных (Salinas et al., 2020; Zurn et al., 2022) носителей аллеля резистентности – сортов 'Senga Sengana', 'Sweet Charlie', 'Induka' (см. табл. 1).

Также необходимо отметить, что сорта 'Берегиня', 'Кубата', 'Царскосельская', 'Sonata', 'Symphony', 'Vima Zanta', также созданные с использованием исходных форм с аллелем *FaRca1*, согласно полученным нами данным HRM-анализа имеют восприимчивый гомозиготный генотип (AA).

Так как устойчивость к антракнозу, вызываемому *C. acutatum*, контролируется полигенно, для достижения стабильной долговременной устойчивости желательное объединение в одном генотипе нескольких генетических детерминант. Помимо локуса *FaRca1*, устойчивость к антракнозу у сортов земляники также контролируется геном *Rca2* (Lerceteau-Köhler et al., 2005). Локус *FaRca1* расположен на LG 6B (Salinas et al., 2019), *Rca2* – на LG 7B (Lerceteau-Köhler et al., 2005; Edger et al., 2018), поэтому их наследование в гибридном потомстве происходит независимо и возможна их комбинация в одном генотипе. Согласно проведенным нами ранее исследованиям, а также литературным данным, в изучаемой коллекции генотипов земляники ген *Rca2* идентифицирован у сортов 'Selva' (Lerceteau-Köhler et al., 2005), 'Боровицкая', 'Сударушка', 'Troubadour' (Lyzhin, Luk'yanchuk, 2021b), 'Aprica' (Lyzhin, Luk'yanchuk, 2021a), 'Malwina' (Keldibekova et al., 2024). Из них 'Selva', 'Сударушка', 'Troubadour' и 'Malwina' имеют гомозиготный восприимчивый генотип по локусу *FaRca1*, а 'Боровицкая' и 'Aprica' – гетерозиготное сочетание аллелей *FaRca1*. Следовательно, сорта 'Боровицкая' и 'Aprica' совмещают в геноме аллели резистентности *FaRca1* и *Rca2* и являются ценными генетическими источниками устойчивости к антракнозу.

Перспективными для селекции генотипами являются также формы, совмещающие в генотипе аллели резистентности к нескольким патогенам. К их числу относятся сорта 'Korona', 'Ostara', которые сочетают аллель резистентности *FaRca1* с локусом устойчивости к мучнистой росе *08 To-f* (Lyzhin, Luk'yanchuk, 2024), а также сорт 'Былинная', характеризующийся наличием трех локусов устойчивости к патогенам – *FaRca1*, *Rpf1* (Lyzhin, Luk'yanchuk, 2022) и *08 To-f* (Lyzhin, Luk'yanchuk, 2024).

Заключение

Таким образом, в результате проведенного HRM-анализа определено аллельное состояние локуса *FaRca1* устойчивости к *C. acutatum*. Гомозиготным восприимчивым генотипом (AA) характеризуется 49,1% изучаемых сортов, гетерозиготным устойчивым генотипом (AB) – 50,9%. Сорта с гомозиготным устойчивым генотипом (BB) не выявлено. Установлено, что аллель резистентности *FaRca1* (генотип AB) присутствует во всех географических группах сортов. Среди генотипов земляники с е-

лекции ФНЦ им. И.В. Мичурина аллель *FaRca1* идентифицирован у сортов 'Урожайная ЦГЛ', 'Флора' и 'Яркая'. Перспективными генетическими источниками для использования в программах маркер-опосредованной селекции являются сорта, совмещающие в геноме несколько факторов устойчивости: 'Боровицкая', 'Aprica' (локусы устойчивости к антракнозу *FaRca1* и *Rca2*), 'Korona', 'Ostara' (локусы устойчивости к антракнозу *FaRca1* и мучнистой росе *08 To-f*), 'Былинная' (локусы устойчивости к антракнозу *FaRca1*, мучнистой росе *08 To-f* и фитофторозной корневой гнили *Rpf1*).

References / Литература

- Anciro A., Mangandi J., Verma S., Peres N.A., Whitaker V.M., Lee S. *FaRCg1*: a quantitative trait locus conferring resistance to *Colletotrichum crown rot* caused by *Colletotrichum gloeosporioides* in octoploid strawberry. *Theoretical and Applied Genetics*. 2018;131(2):2167-2177. DOI: 10.1007/s00122-018-3145-z
- Chandra S., Oh Y., Han H., Salinas N., Anciro A., Whitaker V.M. et al. Comparative transcriptome analysis to identify candidate genes for *FaRCg1* conferring resistance against *Colletotrichum gloeosporioides* in cultivated strawberry (*Fragaria × ananassa*). *Frontiers in Genetics*. 2021;12:730444. DOI: 10.3389/fgene.2021.730444
- Chen X.Y., Dai D.J., Zhao S.F., Shen Y., Wang H.D., Zhang C.Q. Genetic diversity of *Colletotrichum* spp. causing strawberry anthracnose in Zhejiang, China. *Plant Disease*. 2020;104(5):1351-1357. DOI: 10.1094/PDIS-09-19-2026-RE
- Denoyes-Rothan B., Lerceteau-Köhler E., Guérin G., Bousseur S., Bariac J., Martin E. et al. QTL analysis for resistance to *Colletotrichum acutatum* and *Phytophthora cactorum* in octoploid strawberry (*Fragaria × ananassa*). *Acta Horticulturae*. 2004;663:147-152. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.663.19
- Edger P.P., Van Buren R., Colle M., Poorten T.J., Wai C.M., Niederhuth C.E. et al. Single-molecule sequencing and optical mapping yields an improved genome of woodland strawberry (*Fragaria vesca*) with chromosome-scale contiguity. *GigaScience*. 2018;7(2):gix124. DOI: 10.1093/gigascience/gix124
- Gorgitano M.T., Pirilli M. Life cycle economic and environmental assessment for a greening agriculture. *Quality – Access to Success*. 2016;17 Suppl 1:181-185.
- Jacobs R.L., Adhikari T.B., Pattison J., Yencho G.C., Fernandez G.E., Louws F.J. Assessing rate-reducing foliar resistance to anthracnose crown rot and fruit rot in strawberry. *Plant Disease*. 2020;104(2):398-407. DOI: 10.1094/PDIS-04-19-0687-RE
- Jacobs R.L., Adhikari T.B., Pattison J., Yencho G.C., Fernandez G.E., Louws F.J. Inheritance of resistance to *Colletotrichum gloeosporioides* and *C. acutatum* in strawberry. *Phytopathology*. 2019;109(3):428-435. DOI: 10.1094/PHYTO-08-18-0283-R
- 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;56(2):29. DOI: 10.30848/PJB2024-2(29)
- Keldibekova M.A., Zubkova M.I. Analysis of *Fragaria ananassa* Duch. cultivars by *Rca2* and *Rpf1* genes using DNA markers. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2023;3(35):103-109. [in Russian] [Келдибекова М.А., Зубкова М.И. Анализ сортов земляники садовой (*Fragaria ananassa* Duch.) по генам *Rca2* и *Rpf1* с применением ДНК-маркеров.

- Таверический вестник аграрной науки*. 2023;3(35):103-109. DOI: 10.5281/zenodo.10135427
- Khan A.H., Hassan M., Khan M.N. Conventional plant breeding program for disease resistance. In: I. Ul Haq, S. Ijaz (eds). *Sustainability in Plant and Crop Protection. Vol. 13. Plant Disease Management Strategies for Sustainable Agriculture through Traditional and Modern Approaches*. Cham: Springer; 2020. p.27-51. DOI: 10.1007/978-3-030-35955-3_3
- Khrabrov I.E., Antonova O.Yu., Shapovalov M.I., Semenova L.G. Molecular screening of the VIR strawberry varieties collection for the presence of a marker for the anthracnose black rot resistance gene *Rca2*. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(4):15-24. [in Russian] (Храбров И.Э., Антонова О.Ю., Шаповалов М.И., Семенова Л.Г. Молекулярный скрининг сортовой коллекции земляники ВИР на наличие маркера гена устойчивости к антракнозной черной гнили *Rca2*. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(4):15-24). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-4-03
- Kuznetsova A.A., Kopina M.B., Golovin S.E. Intraspecific difference of the *Colletotrichum acutatum* Simmonds complex on fruit and small fruit crops. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2019;56:142-147. [in Russian] (Кузнецова А.А., Копина М.Б., Головин С.Е. Внутривидовое различие комплекса *Colletotrichum acutatum* Simmonds на плодовых и ягодных культурах. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2019;56:142-147). DOI: 10.31676/2073-4948-2019-56-142-147
- Lerceteau-Köhler E., Guérin G., Denoyes-Rothan B. Identification of SCAR markers linked to *Rca2* anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germ plasm. *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;111(5):862-870. DOI: 10.1007/s00122-005-0008-1
- Lyzhin A., Luk'yanchuk I. Assessment of strawberry varieties by anthracnose resistance gene. *BIO Web of Conferences*. 2021a;34:02007. DOI: 10.1051/bioconf/20213402007
- Lyzhin A., Luk'yanchuk I. Marker-assisted screening of promising forms in the strawberry breeding. *E3S Web of Conferences*. 2021b;254:03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202125403002
- Lyzhin A.S., Luk'yanchuk I.V. Analysis of the inheritance of the marker SCAR-R1A, linked to the *Rpfl* red stele root rot resistance gene, in strawberry hybrid progeny. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(1):208-213. [in Russian] (Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Анализ наследования маркера SCAR-R1A, сцепленного с геном *Rpfl* устойчивости к фитофторозной корневой гнили, в гибридном потомстве земляники. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(1):208-213). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-1-208-213
- Lyzhin A.S., Luk'yanchuk I.V. Inheritance of anthracnose resistance determined by the dominant *Rca2* gene in strawberry hybrid progeny. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2023;3(35):137-144. [in Russian] (Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Наследование устойчивости к антракнозу, детерминируемой доминантным геном *Rca2*, в гибридном потомстве земляники садовой. *Таверический вестник аграрной науки*. 2023;3(35):137-144). DOI: 10.5281/zenodo.10141405
- Lyzhin A.S., Luk'yanchuk I.V. Study of a genetic collection of strawberry (*Fragaria L.*) for resistance to powdery mildew. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(2):166-174. DOI: 10.18699/vjgb-24-19
- Marchenko L.A. Research methods and ways in strawberry breeding problems solution (analytical review). *The Bulletin of KrasGAU*. 2021;9(174):59-68. [in Russian] (Марченко Л.А. Методы и способы исследований для решения задач селекции земляники садовой (аналитический обзор). *Вестник КрасГАУ*. 2021;9(174):59-68). DOI: 10.36718/1819-4036-2021-9-59-68
- Miller-Butler M.A., Smith B.J., Babiker E.M., Kreiser B.R., Blythe E.K. Comparison of whole plant and detached leaf screening techniques for identifying anthracnose resistance in strawberry plants. *Plant Disease*. 2018;102(11):2112-2119. DOI: 10.1094/PDIS-08-17-1138-RE
- 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;55(5):693-698. DOI: 10.21273/HORTSCI14807-20
- Salinas N., Verma S., Peres N., Whitaker V.M. *FarCa1*: a major subgenome-specific locus conferring resistance to *Colletotrichum acutatum* in strawberry. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019;132(4):1109-1120. DOI: 10.1007/s00122-018-3263-7
- Smith B.J. Epidemiology and pathology of strawberry anthracnose: a North American perspective. *HortScience*. 2008;43(1):69-73. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.1.69
- Smith B.J. USDA-ARS strawberry anthracnose resistance breeding program. *Acta Horticulturae*. 2006;708:463-470. DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.708.82
- Sturzeanu M., Calinescu M., Fralova L., Klakotskaya N., Ancu I., Sumedrea M. et al. Assessing some strawberry genotypes used in breeding programme for increasing resistance to diseases. *Fruit Growing Research*. 2017;33:29-34.
- 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 *Rpfl* and fruit rot resistance genes *Rca2* in the hybrid progenies. *Acta Horticulturae*. 2021;1309:93-100. DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1309.15
- Tarasova E.V., Kapitova I.A., Andronova N.V. Identification of the allelic state of the *Rca2* gene for resistance to anthracnose and determination of genetic relatedness in garden strawberry genotypes. *Horticulture and Viticulture*. 2024;(1):5-11. [in Russian] (Тарасова Е.В., Капитова И.А., Андропова Н.В. Идентификация аллельного состояния гена *Rca2* устойчивости к антракнозу и определение генетического сходства у генотипов земляники садовой. *Садоводство и виноградарство*. 2024;(1):5-11). DOI: 10.31676/0235-2591-2024-1-5-11
- Wang N.Y., Forcelini B.B., Peres N.A. Anthracnose fruit and root necrosis of strawberry are caused by a dominant species within the *Colletotrichum acutatum* species complex in the United States. *Phytopathology*. 2019;109(7):1293-1301. DOI: 10.1094/PHYTO-12-18-0454-R
- Whitaker V.M., Knapp S.J., Hardigan M.A., Edger P.P., Slovin J.P., Bassil N.V. et al. A roadmap for research in octoploid strawberry. *Horticulture Research*. 2020;7:33. DOI: 10.1038/s41438-020-0252-1
- Zhang L., Song L., Xu X., Zou X., Duan K., Gao Q. Characterization and fungicide sensitivity of *Colletotrichum* species causing strawberry anthracnose in Eastern China. *Plant Disease*. 2020;104(7):1960-1968. DOI: 10.1094/PDIS-10-19-2241-RE
- Zurn J.D., Hummer K.E., Bassil N.V. Exploring the diversity and genetic structure of the US National Cultivated Strawberry Collection. *Horticulture Research*. 2022;9:uhac125. DOI: 10.1093/hr/uhac125

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

Alexander S. Lyzhin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, I.V. Michurin Federal Science Center, 30 Michurina St., Michurinsk, Tambov Province 393774, Russia, Ranenburzhetc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9770-8731>

Irina V. Luk'yanchuk, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, I.V. Michurin Federal Science Center, 30 Michurina St., Michurinsk, Tambov Province 393774, Russia, irina.lk2011@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1626-840X>

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 30.05.2024; одобрена после рецензирования 23.09.2024; принята к публикации 03.12.2024.
The article was submitted on 30.05.2024; approved after reviewing on 23.09.2024; accepted for publication on 03.12.2024.