

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДНК-МАРКЕРОВ В СЕЛЕКЦИИ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПАТОГЕНАМ (*SPHAEROTHECA MACULARIS*, *COLLETOTRICHUM ACUTATUM*, *PHYTOPHTHORA FRAGARIAE* VAR. *FRAGARIAE*)

А.С. Лыжин , И.В. Лукьянчук

ФГБНУ «Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина», 393774, ул. Мичурина, 30, г. Мичуринск, Тамбовская обл., Россия, info@fnc-mich.ru

Аннотация

В статье приведены результаты использования диагностических ДНК-маркеров для идентификации локусов устойчивости к *Sphaerotheca macularis*, *Colletotrichum acutatum* и *Phytophthora fragariae* var. *fragariae* у 29 генотипов рода *Fragaria* L. Маркер IB535110 (локус *O8 To-f* устойчивости к мучнистой росе) выявлен у дикорастущих видов *F. orientalis*, *F. moschata*, сортов и отборных формы земляники садовой (*F. × ananassa*) Былинная, Сударушка, Troubadour, Red Gauntlet, Korona, Polka, 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-71 (Привлекательная × Былинная). Маркер STS-Rca2_240 (ген *Rca2* устойчивости к антракнозу) выявлен у сортов земляники садовой Сударушка, Elianny, Troubadour и отборной формы межвидового происхождения 933-4 (*F. virginiana* subsp. *platypetala* × Рубиновый кулон). Маркер SCAR-R1A (ген *Rpf1* устойчивости к фитофторозу) присутствует у дикорастущего вида *F. virginiana* subsp. *platypetala*, сортов и отборных формы земляники садовой Былинная, 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-24, 72-71 (Привлекательная × Былинная). Сорта Сударушка и Troubadour характеризуются сочетанием локусов *O8 To-f* и *Rca2*, сорт Былинная и отборные формы 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-71 (Привлекательная × Былинная) – локусов *O8 To-f* и *Rpf1*. Указанные генотипы являются перспективными исходными формами в селекции земляники на устойчивость к грибным патогенам.

Ключевые слова: земляника, генотип, молекулярные маркеры, мучнистая роса, антракноз, фитофтороз

THE USE OF DNA MARKERS IN STRAWBERRY BREEDING FOR PATHOGEN RESISTANCE

A.S. Lyzhin , I.V. Lukyanchuk

I.V. Michurin Federal Scientific Center, 393774, Michurina st., 30, Michurinsk, Tambov region, Russia, info@fnc-mich.ru

Abstract

The article presents the results of using diagnostic DNA markers to identify resistance loci to *Sphaerotheca macularis*, *Colletotrichum acutatum* and *Phytophthora fragariae* var. *fragariae* in 29 genotypes of the genus *Fragaria* L. Marker IB535110 (*O8 To-f* powdery mildew resistance locus) was found in wild species *F. orientalis*, *F. moschata*, cultivars and selected forms of strawberry (*F. × ananassa*): Bylinnaya, Studencheskaya, Sudarushka, Troubadour, Red Gauntlet, Korona, Polka, 69-29 (Feyerverk × Bylinnaya) and 72-71 (Privlekatelnaya × Bylinnaya). Marker STS-Rca2_240 (*Rca2* anthracnose resistance gene) was found in strawberry cultivars Sudarushka, Elianny and Troubadour, and selected form of interspecific origin 933-4 (*F. virginiana* subsp. *platypetala* × Rubinovyy kulon). Marker SCAR-R1A (red stele root rot resistance gene *Rpf1*) is present in the wild species *F. virginiana* subsp. *platypetala* and cultivars and selected forms of strawberry Bylinnaya, 69-29 (Feyerverk × Bylinnaya), 72-24 and 72-71

(Privlekatelnaya × Bylinnaya). Strawberry cultivars Sudarushka and Troubadour are characterized by a combination of *08 To-f* and *Rca2* loci, Bylinnaya, 69-29 (Feyyerverk × Bylinnaya) and 72-71 (Privlekatelnaya × Bylinnaya) are characterized by the combination of *08 To-f* and *Rpf1* loci. The indicated genotypes are promising initial forms in strawberry breeding for resistance to fungal pathogens.

Key words: strawberry, genotype, molecular markers, powdery mildew, anthracnose, red stele root rot

Введение

Устойчивость к патогенам – одна из важнейших характеристик любого сорта растений. Земляника садовая (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) восприимчива ко многим заболеваниям грибного, бактериального и вирусного происхождения. К числу важнейших грибных заболеваний земляники относятся мучнистая роса, серая гниль, белая и бурая пятнистости, антракноз, фитофторозное и вертицеллёзное увядание, массовое развитие которых способно привести не только к значительным потерям урожая, но и к гибели растений (Ahmed, El-Fiki, 2017; Алейников, 2018). В связи с этим одной из приоритетных задач селекции земляники является создание сортов с генетической устойчивостью к наиболее вредоносным заболеваниям (Whitaker, 2011). Одним из актуальных направлений интенсификации процесса создания новых форм является сочетание методов классической селекции с технологиями селекции на основе ДНК-маркеров, которые сцеплены с целевыми генами и на молекулярном уровне обеспечивают выявление наследственных основ формирования признаков (Dirlewanger et al., 2004; Kalia et al., 2011). Использование молекулярных маркеров в селекции земляники для идентификации целевых аллелей локусов агробиологических признаков позволит повысить эффективность селекционного процесса, сократить время выявления донорских качеств генотипов и подбора исходных родительских форм для гибридизации.

В «Федеральном научном центре имени И.В. Мичурина» ведётся активная работа по молекулярно-генетическому анализу исходных форм и маркер-опосредованной селекции земляники, которая начата в 2017 году. За этот период проведена апробация методов выделения геномной ДНК земляники и разработан модифицированный протокол экстракции (Luk'yanchuk et al., 2018). Создана коллекция, включающая дикорастущие виды рода *Fragaria*, сорта отечественной и зарубежной селекции, а также перспективные отборные и элитные формы межвидового и межсортового происхождения.

В настоящее время работа по маркерной селекции земляники на устойчивость к патогенам в «ФНЦ им. И.В. Мичурина» включает в себя следующие направления: устойчивость к мучнистой росе (*Sphaerotheca macularis* Mag.), устойчивость к антракнозной чёрной гнили (*Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds), устойчивость к фитофторозной корневой гнили (*Phytophthora fragariae* var. *fragariae* Hickman).

Возбудителем мучнистой росы земляники является облигатный биотрофный гриб *Sphaerotheca macularis* Mag. (син. *Podosphaera aphanis* Wallr.). Потери урожая от поражения растений земляники мучнистой росой могут превышать 60% (Nelson et al., 1995; Lifshitz et al., 2007; Холод, Семенова, 2014). Устойчивость форм земляники к мучнистой росе контролируется полигенно. Одним из крупнейших локусов устойчивости является локус *08 To-f* (Koishihara et al., 2020). Для его идентификации используется маркер IB535110. Целевой ампликон данного маркера (500 п.н.) синтезируется только у генотипов земляники, характеризующихся устойчивостью к мучнистой росе по локусу *08 To-f* (Koishihara et al., 2020).

Возбудителем антракнозной черной гнили является видовой комплекс *Colletotrichum acutatum* J.H. Simmonds. Потери урожая земляники от поражения ягод антракнозом могут достигать 80% (Головин, 2014; Дудченко и др., 2015). Устойчивость к антракнозной черной гнили у земляники контролируется полигенно и моногенно. Полигенный контроль выявлен к изолятам *C. acutatum* 1-й группы патогенности (Denoyes-Rothan et al., 2004), моногенный (доминантный ген *Rca2*) – к изолятам *C. acutatum* 2-й группы патогенности (Lerceteau-Kohler et al., 2002). Для идентификации аллеля резистентности *Rca2* разработан маркер STS-Rca2_240. Целевым продуктом является ампликон размером 240 п.н., который синтезируется только при наличии в геноме аллеля *Rca2* (Lerceteau-Kohler et al., 2005).

Возбудителем фитофторозной корневой гнили (фитофторозного увядания) является *Phytophthora fragariae* var. *fragariae* Hickman. В Российской Федерации *P. fragariae* var. *fragariae* является карантинным патогеном (Александров и др., 2007). Устойчивость земляники к фитофторозной корневой гнили контролируется генами семейства *Rpf*, из которых наибольшее значение имеет ген *Rpf1* (Whitaker, 2011). Для выявления аллеля резистентности *Rpf1* используется маркер SCAR-R1A (целевой ампликон – 285 п.н.) (Haymes et al., 2000).

В представленном исследовании приведены результаты молекулярного скрининга сортов и форм земляники (*Fragaria* L.) по ДНК-маркерам, сцепленным с локусами устойчивости к грибным патогенам (*S. macularis*, *C. acutatum*, *P. fragariae* var. *fragariae*).

Материалы и методика исследований

Исследования проведены в 2020...2023 гг. Биологическими объектами являлись генотипы земляники генетической коллекции «ФНЦ им. И.В. Мичурина»:

- дикорастущие виды *F. orientalis*, *F. moschata*, *F. virginiana* subsp. *platypetala*, *F. ovalis*;
- сорта Берегиня, Былинная, Избранница, Купчиха, Сударушка, Торпеда, Царица, Barlidaun, Elianny, Korona, Limalexia, Polka, Red Gauntlet, Symphony, Troubadour, Vima Zanta;
- перспективные гибридные сеянцы 933-4 (*F. virginiana* subsp. *platypetala* × Рубиновый кулон), 35-16 (922-67 × Maryshka), 26-5 (Рубиновый кулон × 298-19-9-43), 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-24, 72-71 (Привлекательная × Былинная), 928-12 (298-19-9-43 × Привлекательная), 932-29 (*F. virginiana* subsp. *platypetala* × Фейерверк), 56-5 (Gigantella Maxim × Привлекательная).

Для выявления устойчивых к патогенам генотипов земляники использовали ДНК-маркеры: IB535110 – устойчивость к мучнистой росе (Koishihara et al., 2020), SCAR-R1A – устойчивость к фитофторозу (Haymes et al., 2000), STS-Rca2_240 – устойчивость к антракнозу (Lerceteau-Kohler et al., 2005) (таблица 1).

Таблица 1 – ДНК-маркеры, используемые для молекулярно-генетического анализа

Признак	Локус	Маркер	Последовательность 5'-3'	Продукт, п.н.
Устойчивость к мучнистой росе	<i>08 To-f</i>	IB535110	For acacatatatgaatcggagccca Rev gctcaagatgctcaatcgaa	500
Устойчивость к антракнозу	<i>Rca2</i>	STS-Rca2_240	For gccacgtcactagtcaaattcaa Rev tcatggacagtggtctcagc	240
Устойчивость к фитофторозу	<i>Rpf1</i>	SCAR-R1A	For tgcatcattaatgtagaagctttt Rev tgatgccacatacaaaaatttag	285

Полимеразную цепную реакцию проводили в реакционной смеси общим объёмом 15 мкл, содержащей 1,5 мМ Таq-буфера, 2,0 мМ смеси дезоксинуклеозидтрифосфатов, 2,5 мМ хлорида магния, 0,2 U Таq-полимеразы, 0,2 мкМ каждого праймера и 20 нг геномной ДНК.

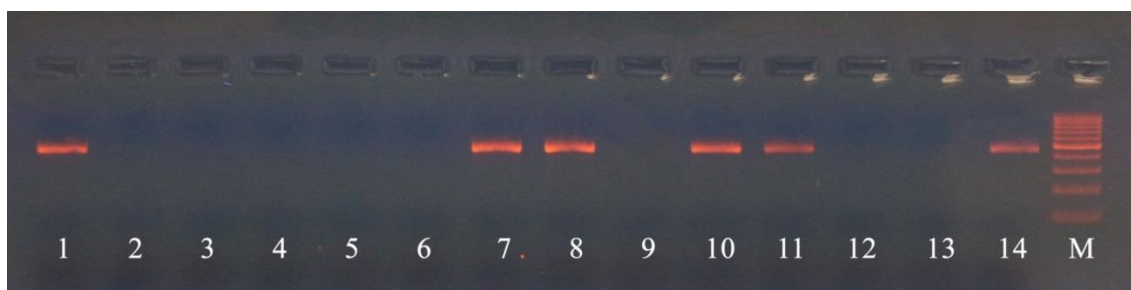
Амплификацию проводили в термоциклере T100 (Bio-Rad, США) по описанным ранее для маркеров STS-Rca2_240 и SCAR-R1A программам (Лыжин, Лукьянчук, 2020, 2022).

Для маркера IB535110 использовалась следующая программа: начальная денатурация: 94°C – 1 мин, 35 циклов: 94°C – 30 с, 60°C – 45 с, 72°C – 1 мин; финальная элонгация: 72°C – 5 мин.

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

Результаты и их обсуждение

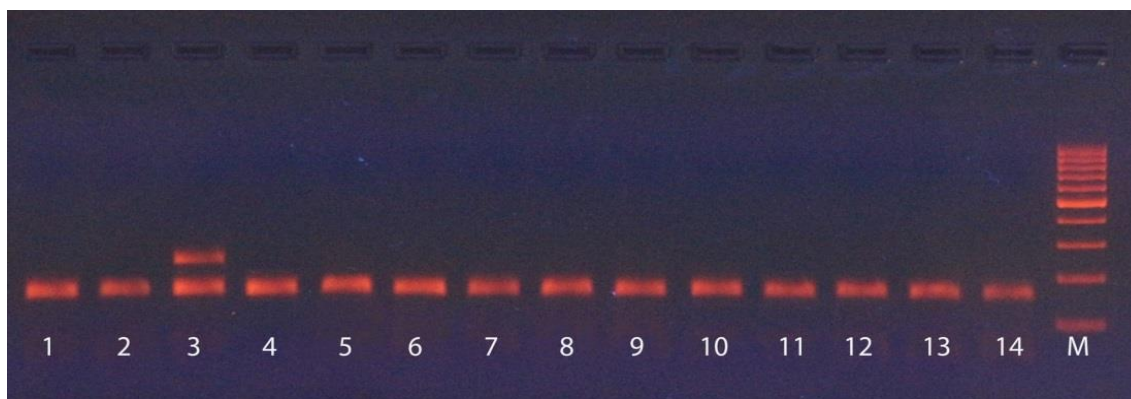
В анализируемой коллекции сортов и форм земляники маркер IB535110 выявлен у земляники восточной (*F. orientalis*), земляники мускатной (*F. moschata*), сортов земляники садовой Былинная, Сударушка, Troubadour, Red Gauntlet, Korona, Polka, а также перспективных отборных форм 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-71 (Привлекательная × Былинная) (рисунок 1, таблица 2).



1 – Red Gauntlet, 2 – Symphony, 3 – Берегиня, 4 – Избранница, 5 – Limalexia, 6 – Vima Zanta, 7 – Былинная, 8 – Korona, 9 – Barlidaun, 10 – Сударушка, 11 – Polka, 12 – *F. ovalis*, 13 – *F. virginiana* subsp. *platypetala*, 14 – *F. moschata*, M – маркер молекулярного веса

Рисунок 1 – Электрофоретический профиль маркера IB535110 анализируемых генотипов земляники

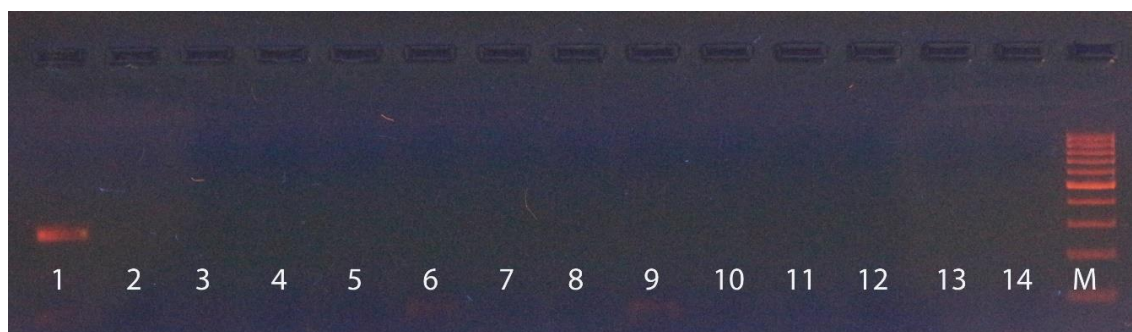
Маркер STS-Rca2_240 выявлен у сорта земляники Сударушка отечественной селекции, сортов Elianny и Troubadour зарубежной селекции, а также отборного сеянца 933-4 (*F. virginiana* subsp. *platypetala* × Рубиновый кулон) (рисунок 2, таблица 2).



1 – Red Gauntlet, 2 – Symphony, 3 – Сударушка, 4 – Избранница, 5 – Купчиха, 6 – Vima Zanta, 7 – Торпеда, 8 – Царица, 9 – Barlidaun, 10 – Берегиня, 11 – Polka, 12 – *F. ovalis*, 13 – *F. virginiana* subsp. *platypetala*, 14 – *F. moschata*, M – маркер молекулярного веса

Рисунок 2 – Электрофоретический профиль маркера STS-Rca2_240 анализируемых генотипов земляники

Маркер SCAR-R1A присутствует у дикорастущего вида *F. virginiana* subsp. *platypetala*, сорта земляники садовой Былинная, отборных форм 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-24, 72-71 (Привлекательная × Былинная) (рисунок 3, таблица 2).



1 – *F. virginiana* subsp. *platypetala*, 2 – *Symphony*, 3 – *Сударушка*, 4 – *Elianny*, 5 – *Купчиха*, 6 – *Vima Zanta*, 7 – *Торпеда*, 8 – *Царица*, 9 – *Red Gauntlet*, 10 – *Берегиня*, 11 – *Polka*, 12 – *F. ovalis*, 13 – *Избранница*, 14 – *F. moschata*, М – маркер молекулярного веса

Рисунок 3 – Электрофоретический профиль маркера SCAR-R1A анализируемых генотипов земляники

Таблица 2 – Аллельное разнообразие генов устойчивости к мучнистой росе, антракнозу и фитофторозу у генотипов земляники

№	Генотип	Локусы устойчивости к патогенам и диагностические маркеры, используемые для их идентификации			Литературный источник
		QTL 08 <i>To-f</i>	Ген <i>Rpf1</i>	Ген <i>Rca2</i>	
		Маркер IB535110	Маркер SCAR-R1A	Маркер STS-Rca2_240	
1	<i>F. orientalis</i> Los.	1	0	0	Luk'yanchuk et al., 2018 (маркеры SCAR-R1A и STS-Rca2_240);
2	<i>F. moschata</i> Duch.	1	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
3	<i>F. virginiana</i> Duch. subsp. <i>platypetala</i>	0	1	0	Не опубликовано
4	<i>F. ovalis</i> Rydb.	0	0	0	Не опубликовано
5	Берегиня	0	0	0	Не опубликовано
6	Былинная	1	1	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
7	Избранница	0	0	0	Не опубликовано
8	Купчиха	0	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2019 (маркер STS-Rca2_240)
9	Сударушка	1	0	1	Luk'yanchuk et al., 2018 (маркеры SCAR-R1A и STS-Rca2_240);
10	Торпеда	0	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
11	Царица	0	0	0	Не опубликовано
12	Barlidaun	0	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
13	Elianny	0	0	1	Не опубликовано
14	Korona	1	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
15	Limalexia	0	0	0	Не опубликовано
16	Polka	1	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
17	Red Gauntlet	1	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
18	Symphony	0	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
19	Troubadour	1	0	1	Лыжин, Лукьянчук, 2020 (маркер SCAR-R1A)
20	Vima Zanta	0	0	0	Luk'yanchuk et al., 2018 (маркеры SCAR-R1A и STS-Rca2_240)

продолжение таблицы 2

№	Генотип	Локусы устойчивости к патогенам и диагностические маркеры, используемые для их идентификации			Литературный источник
		QTL 08 <i>To-f</i>	Ген <i>Rpf1</i>	Ген <i>Rca2</i>	
		Маркер IB535110	Маркер SCAR-R1A	Маркер STS-Rca2_240	
21	933-4 (<i>F. virginiana</i> subsp. <i>platypetala</i> × Рубиновый кулон)	0	0	1	
22	35-16 (922-67 × Maryshka)	0	0	0	
23	26-5 (Рубиновый кулон × 298-19-9-43)	0	0	0	Не опубликовано
24	69-29 (Фейерверк × Былинная)	1	1	0	
25	72-24 (Привлекательная × Былинная)	0	1	0	
26	72-71 (Привлекательная × Былинная)	1	1	0	
27	928-12 (298-19-9-43 × Привлекательная)	0	0	0	Лыжин, Лукьянчук, 2022 (маркер STS-Rca2_240)
28	932-29 (<i>F. virginiana</i> subsp. <i>platypetala</i> × Фейерверк)	0	0	0	
29	56-5 (<i>Gigantella Maxim</i> × Привлекательная)	0	0	0	Не опубликовано

Примечания: 1 – целевой аллель присутствует, 0 – целевой аллель отсутствует

Маркер IB535110 выявлен у 34,5%, маркер SCAR-R1A – у 17,2%, маркер STS-Rca2_240 – у 13,8% изучаемых форм. Два маркера из трёх присутствуют у 17,2% форм. Необходимо отметить, что сеянцы с идентифицированными локусами *08 To-f* и *Rpf1* (69-29, 72-24, 72-71) выделены в комбинациях скрещивания с участием сорта Былинная, который согласно данным молекулярно-генетического анализа является источником целевых аллелей резистентности.

ДНК-маркеры сцепленные с генами *Rca2* и *Rpf1*, активно применяются как для анализа генетических коллекций сортов земляники, так и гибридных сеянцев для идентификации устойчивых к *S. acutatum* и *P. fragariae* var. *fragariae* форм. С использованием маркера STS-Rca2_240 ген *Rca2* выявлен у сортов Benton, Capitola, Chandler, Dover, Oso Grande, Seascape, Selva (Lerceteau-Kohler et al., 2005; Sturzeanu et al., 2016), а также 17 гибридных форм в комбинации скрещивания Benton × Cambridge Favourite (Sturzeanu et al., 2021) и 136 гибридов в комбинациях Alba × Росинка и Росинка × Darselect (Keldibekova et al., 2024). Ген *Rpf1* идентифицирован у сортов Allstar, Annapolis, Benton, Cornwallis, Darrow, Guardian, Hood, Idea, Mira, Redchief, Tristar (Haymes et al., 2000; Sturzeanu et al., 2016), а также отборных форм CPRO 77191 (Guardian × Sivetta), CPRO 88218 (Bogota × Scot), CPRO 88239 (Bogota × Yalova-4), CPRO 90025 (Allstar × Korona), 11(12), 11(47), 11(48) 11(57) (Панная плотная × Говоровская) (Haymes et al., 2000; Keldibekova et al., 2024).

Фенотипическую оценку устойчивости земляники к антракнозной корневой гнили и фитофторозной корневой гнили не проводили вследствие отсутствия на экспериментальных участках насаждений очагов инфекции. Однако валидация диагностических маркеров STS-Rca2_240 и SCAR-R1A с использованием геноплазмы отечественных сортов земляники проводилась другими авторами (Njuguna, 2010; Пикунова, 2011; Храбров и др., 2021).

Поражение изучаемых генотипов мучнистой росой за годы исследования варьировало от 0 до 3 баллов. Сопоставление результатов молекулярно-генетического анализа и фенотипической оценки устойчивости к мучнистой росе показало, что все генотипы земляники с идентифицированным маркером IB535110 (*F. orientalis*, *F. moschata*, Былинная, Сударушка, Korona, Polka, Red Gauntlet, Troubadour, 69-29, 72-71) в условиях г. Мичуринска Тамбовской области характеризуются полевой устойчивостью к *S. macularis* (признаки поражения патогеном за годы исследования отсутствуют). Также необходимо отметить, что

ряд изучаемых генотипов земляники (*F. ovalis*, *F. virginiana* subsp. *platypetala*, *Limalexia*), у которых QTL *08 To-f* отсутствует, не поразились за годы исследований мучнистой росой. Полученные результаты свидетельствуют о наличии у данных форм дополнительных генетических детерминант устойчивости к *S. macularis*.

Генотипов, совмещающих три локуса устойчивости к патогенам (*08 To-f*, *Rca2*, *Rpf1*), среди проанализированных сортов и форм земляники выявлено не было. Однако сорта Сударушка и Troubadour характеризуется наличием локусов *08 To-f* и *Rca2*, сорт Былинная и отборные формы 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-71 (Привлекательная × Былинная) – локусов *08 To-f* и *Rpf1*, являясь, таким образом, комплексными источниками аллелей резистентности.

Заключение

Таким образом, согласно результатам молекулярно-генетического анализа источниками локусов устойчивости земляники к патогенам являются:

- дикорастущие виды *F. orientalis*, *F. moschata*, сорта и отборные формы земляники садовой Былинная, Сударушка, Troubadour, Red Gauntlet, Korona, Polka, 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-71 (Привлекательная × Былинная) – QTL *08 To-f* устойчивости к *S. macularis* (мучнистая роса);

- дикорастущий вид *F. virginiana* subsp. *platypetala*, сорта и отборные формы земляники садовой Былинная, 69-29 (Фейерверк × Былинная), 72-24, 72-71 (Привлекательная × Былинная) – ген *Rpf1* устойчивости к *P. fragariae* var. *fragariae* (фитофторозная корневая гниль);

- сорта земляники садовой Сударушка, Elianny, Troubadour и отборная форма межвидового происхождения 933-4 (*F. virginiana* subsp. *platypetala* × Рубиновый кулон) – ген *Rca2* устойчивости к *C. acutatum* 2-й группы патогенности (антракнозная чёрная гниль).

Указанные генотипы являются перспективными исходными формами в селекции земляники на устойчивость к грибным патогенам.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Алейников А.Ф. Метод неинвазивного определения грибных болезней земляники садовой // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2018. Т. 48, № 3. С. 71-83. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-3-10>. EDN: XTLARF
2. Александров И.Н., Скрипка О.В., Дудченко И.П., Сурина Т.А., Никифоров С.В. Фитофтороз земляники // Защита и карантин растений. 2007. № 5. С. 32-34. EDN: LETVBN
3. Головин С.Е. Новые болезни земляники в средней полосе России // Плодоводство и ягодоводство России. 2014. Т. 38, № 1. С. 88-95. EDN: RQRCNJ
4. Дудченко И.П., Скрипка О.В., Копина М.Б. Вспышка антракноза земляники в Воронежской области // Современная микология в России: Материалы III Международного микологического форума. Т. 5. М.: Нац. акад. микол., 2015. С. 28-29.
5. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Анализ сортов и форм земляники по гену устойчивости к антракнозу (*Rca2*) с использованием молекулярных маркеров // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2019. № 55. С. 1-11. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2019-1-55-1-11>. EDN: YTVOHZ
6. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Анализ полиморфизма генотипов земляники (*Fragaria* L.) по гену устойчивости к фитофторозной корневой гнили *Rpf1* для идентификации перспективных для селекции и садоводства форм // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер.

- аграр. наук. 2020. Т. 58, № 3. С. 311-320. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-311-320>. EDN: ULZPPA
7. Лыжин А.С., Лукьянчук И.В. Молекулярный скрининг перспективных отборных форм земляники по устойчивости к антракнозу (ген *Rca2*) // Таврический вестник аграрной науки. 2022. № 2. С. 66-73. EDN: KIDKRQ
 8. Пикунцова А.В. Оценка генетического разнообразия исходного и селекционного материала ягодных культур с помощью молекулярных маркеров. дисс. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2011. 153 с. EDN: QFZMLP
 9. Холод Н.А., Семенова Л.Г. Восприимчивость сортов земляники садовой к мучнистой росе // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2014. № 25. С. 111-115. EDN: RTCZBZ
 10. 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. Т. 4, № 4. С. 15-24. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-4-03>. EDN: LVGPMW
 11. 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(3). P. 482-492.
 12. Denoyes-Rothan B., Lerceteau-Kohler E., Guérin G., Bosseur S., Bariac J., Martin E., Roudeillac P. QTL analysis for resistance to *Colletotrichum acutatum* and *Phytophthora cactorum* in octoploid strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) // Acta Hort. 2004. Vol. 663. P. 147-151. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.663.19>
 13. Dirlwanger E., Graziano E., Joobeur T., Garriga-Caldere F., Cosson P., Howad W., Arus P. Comparative mapping and marker-assisted selection in *Rosaceae* fruit crops // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2004. Vol. 101(26). P. 9891-9896. <https://doi.org/10.1073/pnas.0307937101>
 14. Haymes K.M., Van de Weg W.E., Arens P., Maas J.L., Vosman B., Den Nijs A.P.M. Development of SCAR Markers Linked to a *Phytophthora fragariae* Resistance Gene and Their Assessment in European and North American Strawberry Genotypes // J. Amer. Soc. Hort. Sci. 2000. Vol. 125(3). P. 330-339. <https://doi.org/10.21273/JASHS.125.3.330>
 15. Kalia R.K., Rai M.K., Kalia S., Singh, R., Dhawan, A.K. Microsatellite markers: an overview of the recent progress in plants // Euphytica. 2011. Vol. 177(3). P. 309-334. <https://doi.org/10.1007/s10681-010-0286-9>
 16. Keldibekova M., Bezlepikina 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(2). P. 29. [https://doi.org/10.30848/PJB2024-2\(29\)](https://doi.org/10.30848/PJB2024-2(29))
 17. Koishihara H., Enoki H., Muramatsu M., Nishimura S., Susumu Y.U.I., Honjo M. Marker associated with powdery mildew resistance in plant of genus *Fragaria* and use thereof. U.S. Patent No. 10,724,093. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 2020.
 18. Lerceteau-Kohler E., Roudeillac P., Markocic M., Guerin G., Praud K., Denoyes-Rothan B. The use of molecular markers for durable resistance breeding in the cultivated strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) // Acta Hort. 2002. Vol. 567(2). P. 615-618. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.132>
 19. Lerceteau-Kohler E., Guerin G., Denoyes-Rothan B. Identification of SCAR markers linked to *Rca2* anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germplasm // Theor. Appl. Genet. 2005. Vol. 111. P. 862-870. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-0008-1>
 20. Lifshitz C., David N., Shalit N., Slotzky S., Tanami Z., Elad Y., Dai N. Inheritance of powdery mildew resistance in strawberry lines from the Israeli germplasm collection // NASS/NASGA Proceedings. 2007. P. 74-76.

21. 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 // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018. Vol. 22, No. 7. P. 795-799. <https://doi.org/10.18699/VJ18.423>. EDN: YMZLJJ
22. Nelson M.D., Gubler W.D., Shaw D.V. Inheritance of powdery mildew resistance in greenhouse-grown versus field-grown California strawberry progenies // Phytopathology. 1995. Vol. 85(4). P. 421-424.
23. Njuguna W. Development and use of molecular tools in *Fragaria*: PhD thesis. Oregon State University, 2010.
24. 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. Vol. 1139. P. 107-112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1139.19>
25. 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. Vol. 1309. P. 93-100. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.15>
26. Whitaker V.M. Applications of molecular markers in strawberry // Journal of Berry Research. 2011. Vol. 1. P. 115-127. <https://doi.org/10.3233/BR-2011-013>

References

1. Aleinikov, A.F. (2018). Method of non-invasive determination of fungal diseases of common garden strawberry. *Siberian herald of agricultural science*, 48(3), 71-83. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2018-3-10>. EDN: XTLARF. (In Russian, English abstract).
2. Aleksandrov, I.N., Skripka, O.V., Dudchenko, I.P., Surina, T.A., & Nikiforov, S.V. (2007). Red stele root rot in strawberry. *Plant Protection and Quarantine*, 5, 32-34. EDN: LETVBN. (in Russian).
3. Golovin, S.E. (2014). New diseases of strawberries in the central Russia. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*, 38(1), 88-95. EDN: RQRCNJ. (In Russian, English abstract).
4. Dudchenko, I.P., Skripka, O.V., & Kopina, M.B. (2015). Outbreak of strawberry anthracnose in the Voronezh region. In *Current Mycology in Russia: Materials of the III International Mycological Forum* (Vol. 5, pp. 28-29). Moscow. (In Russian).
5. Lyzhin, A.S., & Luk'yanchuk, I.V. (2019). Analysis of strawberry varieties and forms for the *Rca2* anthracnose resistance gene with molecular markers. *Fruit growing and viticulture of South Russia*, 55, 1-11. <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2019-1-55-1-11>. EDN: YTVOHZ. (In Russian, English abstract).
6. Lyzhin, A.S., & Luk'yanchuk, I.V. (2020). Analysis of polymorphism of strawberry genotypes (*Fragaria L.*) according to the strawberry red root spot resistance gene *Rpf1* for identification of strawberry forms promising for breeding and horticulture. *Proceedings of the National academy of sciences of Belarus. Agrarian series*, 58(3), 311-320. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-3-311-320>. EDN: ULZPPA. (In Russian, English abstract).
7. Lyzhin, A.S., & Luk'yanchuk, I.V. (2022). Molecular screening of promising strawberry selected forms by anthracnose resistance (*Rca2* gene). *Taurida herald of the agrarian sciences*, 2, 66-73. EDN: KIDKRQ. (In Russian, English abstract).
8. Pikunova, A.V. (2011). *Assessment of genetic diversity of source and breeding material of berry crops using molecular markers* (Boil. Sci. Cand. Thesis), VIR, Saint Petersburg, Russia. EDN: QFZMLP (In Russian).
9. Holod, N., & Semenova, L. (2014). Susceptibility of strawberry varieties to powdery mildew. *Fruit growing and viticulture of South Russia*, 25, 111-115. EDN: RTCZBZ. (In Russian).

10. Khrabrov, I.E., Antonova, O.Yu., Shapovalov, M.I., & Semenova, L.G. (2021). 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*, 4(4), 15-24. <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-4-03>. EDN: LVGPMW. (In Russian, English abstract).
11. Ahmed, M.F.A., & El-Fiki, I.A.I. (2017). Effect of biological control of root rot diseases of strawberry using *Trichoderma* spp. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 7(3), 482-492.
12. Denoyes-Rothan, B., Lerceteau-Kohler, E., Guerin, G., Bosseur, S., Bariac, J., Martin, E., & Roudeillac, P. (2004). QTL analysis for resistance to *Colletotrichum acutatum* and *Phytophthora cactorum* in octoploid strawberry (*Fragaria* × *ananassa*). *Acta Hort.*, 663, 147-151. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.663.19>
13. Dirlwanger, E., Graziano, E., Joobeur, T., Garriga-Caldere, F., Cosson, P., Howad, W., & Arus, P. (2004). Comparative mapping and marker-assisted selection in *Rosaceae* fruit crops. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(26), 9891-9896. <https://doi.org/10.1073/pnas.0307937101>
14. Haymes, K.M., Van de Weg, W.E., Arens, P., Maas, J.L., Vosman, B., & Den Nijs, A.P.M. (2000). Development of SCAR Markers Linked to a *Phytophthora fragariae* Resistance Gene and Their Assessment in European and North American Strawberry Genotypes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 125(3), 330-339. <https://doi.org/10.21273/JASHS.125.3.330>
15. Kalia, R.K., Rai, M.K., Kalia, S., Singh, R., & Dhawan, A.K. (2011). Microsatellite markers: an overview of the recent progress in plants. *Euphytica*, 177(3), 309-334. <https://doi.org/10.1007/s10681-010-0286-9>
16. Keldibekova, M., Bezlepkina, E., Zubkova, M., & Dolzhikova, M. (2024). DNA-screening of strawberry cultivars and hybrids (*Fragaria ananassa* Duch.) for resistance to fungal diseases. *Pakistan Journal of Botany*, 56(2), 29. [https://doi.org/10.30848/PJB2024-2\(29\)](https://doi.org/10.30848/PJB2024-2(29))
17. Koishihara, H., Enoki, H., Muramatsu, M., Nishimura, S., Susumu, Y.U.I., & Honjo, M. (2020). Marker associated with powdery mildew resistance in plant of genus *Fragaria* and use thereof. U.S. Patent No. 10,724,093. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
18. Lerceteau-Kohler, E., Roudeillac, P., Markocic, M., Guerin, G., Praud, K., & Denoyes-Rothan, B. (2002). The use of molecular markers for durable resistance breeding in the cultivated strawberry (*Fragaria* × *ananassa*). *Acta Hort.*, 567(2), 615-618. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.132>
19. Lerceteau-Kohler, E., Guerin, G., & Denoyes-Rothan, B. (2005). Identification of SCAR markers linked to *Rca2* anthracnose resistance gene and their assessment in strawberry germplasm. *Theor. Appl. Genet.*, 111, 862-870. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-0008-1>
20. Lifshitz, C., David, N., Shalit, N., Slotzky, S., Tanami, Z., Elad, Y., & Dai, N. (2007). Inheritance of powdery mildew resistance in strawberry lines from the Israeli germplasm collection. In *NASS/NASGA Proceedings 2007* (pp. 74-76).
21. Luk'yanchuk, I.V., Lyzhin, A.S., & Kozlova, I.I. (2018). Analysis of strawberry genetic collection (*Fragaria* L.) for *Rca2* and *Rpf1* genes with molecular markers. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 22(7), 795-799. <https://doi.org/10.18699/VJ18.423>. EDN: YMZLJJ
22. Nelson, M.D., Gubler, W.D., & Shaw, D.V. (1995). Inheritance of powdery mildew resistance in greenhouse-grown versus field-grown California strawberry progenies. *Phytopathology*, 85(4), 421-424.
23. Njuguna, W. (2010). *Development and use of molecular tools in Fragaria* (PhD Thesis). Oregon State University.
24. Sturzeanu, M., Coman, M., Ciuca, M., Ancu, I., Cristina, D., & Turcu, A.G. (2016). Molecular characterization of allelic status of the *Rpf1* and *Rca2* genes in six cultivars of strawberries. *Acta Horticulturae*, 1139, 107-112. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1139.19>

25. Sturzeanu, M., Ciuca, M., Cristina, D., & Turcu, A.G. (2021). 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*, 1309, 93-100. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1309.15>
26. Whitaker, V.M. (2011). Applications of molecular markers in strawberry. *Journal of Berry Research*, 1, 115-127. <https://doi.org/10.3233/BR-2011-013>

Авторы:

Александр Сергеевич Лыжин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии устойчивости и геномных технологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина», Ranenburzhetc@yandex.ru

Ирина Васильевна Лукьянчук, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории частной генетики и селекции, ФГБНУ «Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина», irina.lk2011@yandex.ru

Authors details:

Aleksandr Lyzhin, PhD in Agriculture, leading researcher at the Laboratory of physiology of resistance and genomic technologies of "I.V. Michurin Federal Scientific Center", Ranenburzhetc@yandex.ru

Irina Luk'yanchuk, PhD in Agriculture, leading researcher at the laboratory of private genetics and breeding of "I.V. Michurin Federal Scientific Center", irina.lk2011@yandex.ru