

DOI 10.5281/zenodo.10141405

EDN WAINBA

УДК 634.75:577.2:632.4

Лыжин А. С., Лукьянчук И. В.

**НАСЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К АНТРАКНОЗУ,
ДЕТЕРМИНИРУЕМОЙ ДОМИНАНТНЫМ ГЕНОМ Rca2, В ГИБРИДНОМ
ПОТОМСТВЕ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ**

ФГБНУ «Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина»

Реферат. Одним из важнейших показателей селекционной ценности сортов является их способность передавать агробиологические признаки определённому количеству потомков. Использование в селекционных программах идентифицированных доноров позволяет осуществлять направленное конструирование генотипов с заданными признаками. У земляники садовой (*Fragaria × ananassa Duch.*) большинство признаков контролируется полигенно, что затрудняет идентификацию доноров и направленную селекцию. Одним из признаков с моногенной детерминацией, что позволяет вести направленный отбор с помощью ДНК-маркеров, является устойчивость к антракнозу (*Colletotrichum acutatum*). Цель работы – маркер-опосредованный анализ сеянцев земляники садовой селекции ФНЦ им. И.В. Мичурина для выявления закономерностей наследования гена *Rca2* устойчивости к антракнозу в гибридном потомстве и определения донорских качеств исходных форм. Исследования проведены в 2022–2023 гг. Биологическими объектами исследований являлись гибридные сеянцы земляники садовой межсортовых комбинаций скрещивания: *Florence × Faith* (40 шт.), *Malwina × Tea* (32 шт.), *Quicky × Olympra* (22 шт.), *Roxana × Kimberly* (24 шт.). Для выявления в геноплазме земляники аллеля резистентности *Rca2* использовали доминантный маркер *STS-Rca2_240*. В результате проведённых исследований установлено, что в комбинации скрещивания *Florence × Faith* количество сеянцев с аллелем *Rca2* составило 37,5 %, в комбинации *Malwina × Tea* – 34,4 %, в комбинации *Quicky × Olympra* – 45,4 %, в комбинации *Roxana × Kimberly* – 66,7 %. Среднее количество сеянцев с геном *Rca2* по изучаемым комбинациям скрещивания составило 46,0 %. Фактическое расщепление по наличию и отсутствию у гибридных генотипов аллеля *Rca2* соответствует теоретически ожидаемому 1:1 при уровне значимости 0,05 (критерий χ^2 по комбинациям скрещивания составил 0,182-3,125 при критическом значении 3,84). На основании полученных данных установлена генотипическая структура исходных форм: сорта *Florence*, *Malwina*, *Olympra* и *Roxana* имеют гетерозиготный генотип и способны передавать аллель резистентности *Rca2* до 50 % гибридных сеянцев. Гибридные формы с идентифицированным маркером *STS-Rca2_240* также имеют гетерозиготный генотип (*Rca2rca2*).

Ключевые слова: *Fragaria × ananassa Duch.*, комбинации скрещивания, молекулярные маркеры, генотип.

Для цитирования: Лыжин А. С., Лукьянчук И. В. Наследование устойчивости к антракнозу, детерминируемой доминантным геном *Rca2*, в гибридном потомстве земляники садовой // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 3 (35). С. 137–144. EDN: WAINBA. DOI: 10.5281/zenodo.10141405.

For citation: 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. No. 3(35). P. 137–144. EDN: WAINBA. DOI: 10.5281/zenodo.10141405.

Введение

Земляника садовая (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) – одна из наиболее популярных ягодных культур. В мире насчитывается свыше 3000 сортов земляники, в России в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, на 2023 г. включено 130 сортов. При этом, несмотря на преобладание в Госреестре сортов отечественной селекции, промышленные насаждения в основном представлены интенсивными сортами иностранного происхождения – Polka, Elsanta, Kimberly, Florence, Marmolada и др. [1]. Поэтому важной задачей в рамках реализации стратегии импортозамещения является создание и внедрение в производство новых отечественных высококонкурентоспособных сортов, не уступающих зарубежным аналогам.

Успешное решение задачи совершенствования сортимента земляники неразрывно связано с углублением генетических исследований, привлечением и созданием качественно нового исходного материала, совершенствованием методов подбора родительских пар. Используемые для скрещивания генотипы должны характеризоваться не только высоким уровнем проявления агробиологических признаков, но и способностью передавать их потомству, что позволяет проводить направленное конструирование новых перспективных сортов с заданными параметрами признаков. При этом направленная селекция земляники садовой затруднена полигенной детерминацией большинства селекционируемых признаков вследствие высокого уровня пloidности (8x) из-за объединения четырех субгеномов, причём в литературе описаны три основные модели генома *F.* × *ananassa*: AAAABVCC, AAA'A'BBBB, AAA'A'BBV'B' [2], из которых наиболее широко используется модель AAA'A'BBV'B', предложенная R. S. Bringham в 1990 г. [3].

Вместе с тем в последнее время для некоторых агробиологических признаков земляники садовой выявлены главные генетические детерминанты (доминантные гены или крупные QTL), а также идентифицированы сцепленные с ними ДНК-маркеры, что позволяет проводить ускоренный отбор перспективных генотипов на ранних этапах развития. К числу таких признаков в первую очередь относится устойчивость к ряду патогенов: *Colletotrichum acutatum* [4], *Phytophthora fragariae* var. *fragariae* [5], *Sphaerotheca macularis* [6], *Xanthomonas fragariae* [7]. Кроме того, описаны локусы, вовлечённые в контроль таких признаков как аромат плодов [8, 9] и фотонейтральный тип плодоношения [10].

Устойчивость к антракнозной черной гнили (возбудитель – видовой комплекс *S. acutatum*) – важный агробиологический признак сортов земляники, контролируемый главными локусами *FaRCa1* [11] и *Rca2* [12]. Для идентификации аллельного состояния локуса *FaRCa1* используется маркер HRM [11], гена *Rca2* – маркеры STS-Rca2_240 и STS-Rca2_417 [4]. Указанные маркеры широко используют для анализа генетических коллекций сортов земляники садовой [13-15], однако сведений об их применении для анализа селекционного материала в рамках маркер-опосредованной селекции и наследовании целевых аллелей в гибридном потомстве недостаточно.

Цель исследований – маркер-опосредованный анализ сеянцев земляники садовой селекции ФНЦ им. И.В. Мичурина для выявления закономерностей наследования гена *Rca2* устойчивости к антракнозу в гибридном потомстве и определения донорских качеств исходных форм.

Материалы и методы исследований

Исследования проведены в 2022–2023 гг. Биологическими объектами исследований являлись гибридные сеянцы земляники садовой межсортных комбинаций скрещивания: Florence × Faith, Malwina × Tea, Quicky × Olympia, Roxana × Kimberly общим количеством 118 генотипов.

Геномную ДНК земляники выделяли из молодых листьев, экстракция проводилась СТАВ методом, модифицированном для культуры земляники [16].

Для идентификации аллеля резистентности *Rca2* использовали маркер STS-*Rca2*_240 (целевой продукт – ампликон размером 240 п.н.), для контроля протекания ПЦР и исключения ложноотрицательных результатов – маркер EMFv020, которые применяли в мультиплексной реакции [4]. В качестве положительного контроля – носителя аллеля *Rca2* использовали сорт Elianny [13].

Полимеразную цепную реакцию проводили в термоциклере T100 (Bio-Rad, США) с использованием описанных ранее набора реактивов и программы амплификации [17].

Разделение продуктов амплификации осуществляли методом электрофореза в 2 % 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).

Оценку наследования аллелей гена *Rca2* в гибридном потомстве земляники и определение соответствия фактического расщепления теоретически ожидаемому проводили с использованием критерия согласия Пирсона (критерий χ^2).

Результаты и их обсуждение

В комбинациях скрещивания Malwina × Tea и Roxana × Kimberly источником аллеля устойчивости к антракнозу *Rca2* для гибридных семян являлись материнские формы Malwina и Roxana, наличие у них гена *Rca2* подтверждается проведёнными ранее исследованиями [18, 19], а также литературными данными [15]. В комбинациях скрещивания Quicky × Olympia и Florence × Faith сорта Quicky и Faith имеют гомозиготный генотип по аллелю *rca2* [18, 20], следовательно, источником аллеля *Rca2* для гибридных семян предположительно являются сорта Florence и Olympia, характеризующиеся устойчивостью к наиболее распространённым заболеваниям (опубликованные данные по аллельному состоянию гена *Rca2* у данных сортов отсутствуют).

Количество семян с идентифицированным ДНК-маркером гена *Rca2* в изучаемых гибридных комбинациях варьировало в диапазоне от 34,4% (Malwina × Tea) до 66,7% (Roxana × Kimberly) при среднем значении по комбинациям – 46,0 %. Отклонение от среднего в меньшую сторону составляет 25,2 %, в большую – 45,0 %. Пример идентификации представлен на рисунке 1, результаты – в таблице 1.

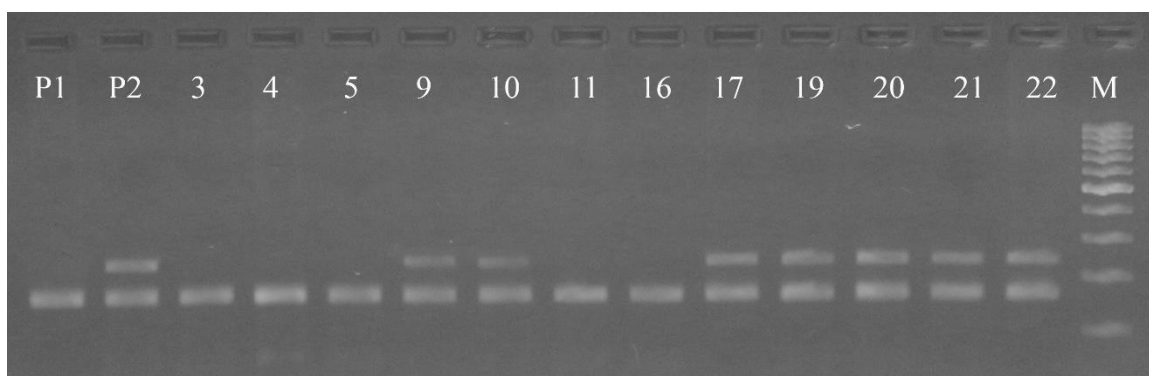


Рисунок 1 – Электрофоретический профиль маркерных фрагментов гена *Rca2* у гибридных семян земляники (комбинация скрещивания Quicky × Olympia)

Примечание. P1 – Quicky, P2 – Olympia, 3–22 – гибридные семена, M – маркер молекулярного веса ДНК

Анализ полученных результатов с использованием критерия согласия Пирсона показал, что фактическое расщепление по наличию и отсутствию у гибридных генотипов аллеля *Rca2* соответствует теоретически ожидаемому 1:1 при уровне значимости 0,05 (критерий χ^2 по комбинациям скрещивания составил 0,182–3,125 при критическом значении 3,84), что подтверждает моногенный характер детерминации признака. Таким образом, исходные формы земляники – сорта Florence, Malwina, Olympia и Roxana являются донорами аллеля резистентности *Rca2* и способны передавать его до 50 % гибридных семян.

Таблица 1 – Результаты наследования аллеля резистентности *Rca2* в гибридном потомстве земляники по данным молекулярно-генетического анализа

Комбинация скрещивания	Количество семян					χ^2 1:1
	Всего	Предполагаемый генотип <i>Rca2rca2</i>		Предполагаемый генотип <i>rca2rca2</i>		
		шт.	шт.	%	шт.	
Florence (<i>Rca2</i>) × Faith (<i>rca2rca2</i>)	40	15	37,5	25	62,5	2,500
Malwina (<i>Rca2</i>) × Tea (<i>rca2rca2</i>)	32	11	34,4	21	65,6	3,125
Quicky (<i>rca2rca2</i>) × Olympia (<i>Rca2</i>)	22	10	45,4	12	54,6	0,182
Roxana (<i>Rca2</i>) × Kimberly (<i>rca2rca2</i>)	24	16	66,7	8	33,3	2,667

Выявленное в наших исследованиях количество семян с аллелем резистентности *Rca2* соотносится с литературными данными. В частности, в комбинации скрещивания Capitola (*Rca2rca2*) × Pajaro (*rca2rca2*) количество гибридов с геном *Rca2* составило 56,3 % [4], в гибридной комбинации Benton (*Rca2rca2*) × Cambridge Favourite (*rca2rca2*) – 40,5 % [21].

Зависимости от использования источника аллеля *Rca2* в качестве материнской или отцовской формы не выявлено. В комбинациях скрещивания Florence × Faith, Malwina × Tea и Roxana × Kimberly (источник аллеля *Rca2* – материнская форма) среднее количество семян с геном *Rca2* составило 46,2%, в комбинации Quicky × Olympia (источник аллеля *Rca2* – отцовская форма) – 45,4%.

Так как фактическое расщепление соответствует теоретическому 1:1, то исходные родительские формы – источники аллеля *Rca2* (сорта Florence, Malwina, Olympia, Roxana), а также все гибридные семена с идентифицированным маркером STS-*Rca2*_240 предположительно должны характеризоваться гетерозиготным сочетанием аллелей (*Rca2rca2*). При этом актуальным направлением исследований в области генетики и селекции плодовых и ягодных культур является гомозиготизация целевых аллелей, позволяющая добиться передачи селективируемого признака 100% потомства [22]. Для реализации этой цели в дальнейшем планируется проведение гибридизации между гетерозиготными по гену *Rca2* генотипами земляники.

Выводы

С использованием диагностического ДНК-маркера STS-*Rca2*_240 проанализировано наследование гена *Rca2* устойчивости к антракнозу в гибридном потомстве земляники садовой. Количество семян с идентифицированным аллелем *Rca2* составило 34,4–66,7% (среднее количество по комбинациям – 46,0%). Наименьшее число семян с аллелем *Rca2* выявлено в комбинации скрещивания Malwina × Tea, наибольшее – в гибридной комбинации Roxana × Kimberly. Фактическое расщепление соответствует теоретически ожидаемому 1:1 ($\chi^2 = 0,182–3,125$ при критическом значении 3,84), что свидетельствует о моногенном наследовании и перспективности метода подбора исходных форм и направленной гибридизации для получения форм с аллелем резистентности *Rca2*. На основании полученных данных установлена генотипическая структура исходных форм: сорта Florence, Malwina, Olympia, Roxana –

гетерозиготный генотип; сорта Faith, Tea, Quicky, Kimberly – гомозиготный по аллелю *rca2*. Гибридные сеянцы, характеризующиеся наличием аллеля *Rca2*, также имеют гетерозиготный генотип (*Rca2rca2*).

Литература

1. Марченко Л. А. Земляника садовая: оценка отечественного сортимента и направления селекции // Аграрный вестник Урала. 2020. № 12(203). С. 50–60. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-203-12-50-60.
2. Davis T. M., Shields M. E., Zhang Q., Poulsen E. G., Folta K. M., Bennetzen J. L., San Miguel P. The strawberry genome is coming into view // ISHS Acta Horticulturae: VI International Strawberry Symposium. 2008. Vol. 842. P. 533–536. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.842.111.
3. Sargent D. J., Passey T., Šurbanovski N., Lopez Girona E., Kuchta P., Davik J., Harrison R., Passey A., Whitehouse A. B., Simpson D. W. A microsatellite linkage map for the cultivated strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) suggests extensive regions of homozygosity in the genome that may have resulted from breeding and selection // Theoretical and Applied Genetics. 2012. Vol. 124. P. 1229–1240. DOI: 10.1007/s00122-011-1782-6.
4. 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. DOI: 10.1007/s00122-005-0008-1.
5. 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. No 125(3). P. 330–339. DOI: 10.21273/JASHS.125.3.330.
6. U.S. Patent No. 10,724,093. Marker associated with powdery mildew resistance in plant of genus *Fragaria* and use thereof // Authors: Koishihara H., Enoki H., Muramatsu M., Nishimura S., Susumu Y. U. I., Honjo M. Washington, DC. U.S. Patent and Trademark Office. 2020.
7. Oh Y., Chandra S., Lee S. Development of subgenome-specific markers for *FaRXf1* conferring resistance to bacterial angular leaf spot in allo-octoploid strawberry // International Journal of Fruit Science. 2020. Vol. 20 (sup2). P. S198–S210. DOI: 10.1080/15538362.2019.1709116.
8. Zorrilla-Fontanesi Y., Rambla J. L., Cabeza A., Medina J. J., Sánchez-Sevilla J. F., Valpuesta V., Botella M. A., Granell A., Amaya I. Genetic analysis of strawberry fruit aroma and identification of *O-methyltransferase FaOMT* as the locus controlling natural variation in mesifurane content // Plant Physiology. 2012. No. 159(2). P. 851–870. DOI: 10.1104/pp.111.188318.
9. Chambers A. H., Pillet J., Plotto A., Bai J., Whitaker V. M., Folta K. M. Identification of a strawberry flavor gene candidate using an integrated genetic-genomic-analytical chemistry approach // BMC Genomics. 2014. No. 15(1). P. 217. DOI: 10.1186/1471-2164-15-217.
10. Honjo M., Koishihara H., Tsukazaki H., Nishimura S., Yui S. DNA marker linked to everbearing flowering gene in cultivated strawberry, with high applicability to various breeding populations // The Horticulture Journal. 2020. No 89(2). P. 161–166. DOI: 10.2503/hortj.UTD-034.
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. No 55(5). P. 693–698. DOI: 10.21273/HORTSCI14807-20.
12. 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 Hort. 2002. No. 567(2). P. 615–618. DOI: 10.17660/ActaHortic.2002.567.132.
13. Лыжин А. С., Лукьянчук И. В., Жбанова Е. В. Полиморфизм сортов земляники (*Fragaria* × *ananassa*) по гену устойчивости к антракнозу *Rca2* // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019. Т. 180. № 1. С. 73–77. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-73-77.
14. 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. No. 54(5). P. 793–798. DOI: 10.21273/HORTSCI13805-18.
15. 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). С. 15–24. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-4-03.
16. Luk'yanchuk I. V., Lyzhin A. S., Kozlova I. I. Analysis of strawberry genetic collection (*Fragaria* L.) for *Rca2* and *Rpfl* genes with molecular markers // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018. Vol. 22. No. 7. P. 795–799. DOI: 10.18699/VJ18.423.
17. Лыжин А. С., Лукьянчук И. В. Молекулярный скрининг перспективных отборных форм земляники по устойчивости к антракнозу (ген *Rca2*) // Таврический вестник аграрной науки. 2022. №2(30). С. 66–73.

18. Лыжин А. С., Лукьянчук И. В. Анализ сортов земляники садовой по устойчивости к антракнозу с использованием диагностических ДНК-маркеров // Аграрная Россия. 2022. №9. С. 16–20. DOI: 10.30906/1999-5636-2022-9-16-20.
19. Лыжин А. С., Лукьянчук И. В. Оценка устойчивости к антракнозу (ген *Rca2*) сортов земляники зарубежной селекции с использованием днк-маркеров // Материалы XIX международной научной конференции «Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК». Брянск: Институт экономики и агробизнеса Брянского ГАУ, 2022. С. 81–85.
20. Lyzhin A., Luk'yanchuk I. Marker-assisted screening of promising forms in the strawberry breeding // E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations” (FARBA 2021). 2021. Vol. 254. Art. No. 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202125403002.
21. 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 // IX International Strawberry Symposium. 2021. Vol. 1309. P. 93–100. DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1309.15.
22. Baumgartner I. O., Patocchi A., Frey J. E., Peil A., Kellerhals M. Breeding elite lines of apple carrying pyramided homozygous resistance genes against apple scab and resistance against powdery mildew and fire blight // ISHS Acta Horticulturae: Plant Molecular Biology. 2015. No. 33. P. 1573–1583. DOI: 10.1007/s11105-015-0858-x.

References

1. Marchenko L. A. Strawberry: evolution of the domestic assortment and direction of selection // Agrarian Bulletin of the Urals. 2020. No. 12(203). P. 50–60. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-203-12-50-60.
2. Davis T. M., Shields M. E., Zhang Q., Poulsen E. G., Folta K. M., Bennetzen J. L., San Miguel P. The strawberry genome is coming into view // ISHS Acta Horticulturae: VI International Strawberry Symposium. 2009. Vol. 842. P. 533–536. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.842.111.
3. Sargent D. J., Passey T., Šurbanovski N., Lopez Girona E., Kuchta P., Davik J., Harrison R., Passey A., Whitehouse A. B., Simpson D. W. A microsatellite linkage map for the cultivated strawberry (*Fragaria × ananassa*) suggests extensive regions of homozygosity in the genome that may have resulted from breeding and selection // Theoretical and Applied Genetics. 2012. Vol. 124. P. 1229–1240. DOI: 10.1007/s00122-011-1782-6.
4. 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. DOI: 10.1007/s00122-005-0008-1.
5. 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. No 125(3). P. 330–339. DOI: 10.21273/JASHS.125.3.330.
6. U.S. Patent No. 10,724,093. Marker associated with powdery mildew resistance in plant of genus *Fragaria* and use thereof // Authors: Koishihara H., Enoki H., Muramatsu M., Nishimura S., Susumu Y. U. I., Honjo M. Washington, DC. U.S. Patent and Trademark Office. 2020.
7. Oh Y., Chandra S., Lee S. Development of subgenome-specific markers for *FaRXfl* conferring resistance to bacterial angular leaf spot in allo-octoploid strawberry // International Journal of Fruit Science. 2020. Vol. 20(sup2). P. S198–S210. DOI: 10.1080/15538362.2019.1709116.
8. Zorrilla-Fontanesi Y., Rambla J. L., Cabeza A., Medina J. J., Sánchez-Sevilla J. F., Valpuesta V., Botella M. A., Granell A., Amaya I. Genetic analysis of strawberry fruit aroma and identification of *O-methyltransferase FaOMT* as the locus controlling natural variation in mesifurane content // Plant Physiology. 2012. No. 159(2). P. 851–870. DOI: 10.1104/pp.111.188318.
9. Chambers A. H., Pillet J., Plotto A., Bai J., Whitaker V. M., Folta K. M. Identification of a strawberry flavor gene candidate using an integrated genetic-genomic-analytical chemistry approach // BMC Genomics. 2014. No. 15(1). P. 217. DOI: 10.1186/1471-2164-15-217.
10. Honjo M., Koishihara H., Tsukazaki H., Nishimura S., Yui S. DNA marker linked to everbearing flowering gene in cultivated strawberry, with high applicability to various breeding populations // The Horticulture Journal. 2020. No 89(2). P. 161–166. DOI: 10.2503/hortj.UTD-034.
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. No 55(5). P. 693–698. DOI: 10.21273/HORTSCI14807-20.
12. 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 Hort. 2002. No 567(2). P. 615–618. DOI: 10.17660/ActaHortic.2002.567.132.

13. Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V., Zhanova E. V. Polymorphism of the *Rca2* anthracnose resistance gene in strawberry cultivars (*Fragaria* × *ananassa*) // Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2019. Vol. 180. No. 1. P. 73–77. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-73-77.
14. 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. No. 54(5). P. 793–798. DOI: 10.21273/HORTSCI13805-18.
15. 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. Vol. 4(4). P. 15–24. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-4-03.
16. Luk'yanchuk I. V., Lyzhin A. S., Kozlova I. I. Analysis of strawberry genetic collection (*Fragaria* L.) for *Rca2* and *Rpfl* genes with molecular markers // Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2018. Vol. 22. No. 7. P. 795–799. DOI: 10.18699/VJ18.423.
17. Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V. Molecular screening of promising strawberry selected forms by anthracnose resistance (*Rca2* gene) // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 2(30). P. 66–73.
18. 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. Vol. 9. P. 16–20. DOI: 10.30906/1999-5636-2022-9-16-20.
19. Lyzhin A.S., Luk'yanchuk I.V. Assessment of anthracnose resistance (*Rca2* gene) at foreign strawberry varieties using DNA markers // Proceedings of the XIX International Scientific Conference “Agroecological aspects of sustainable development of the agro-industrial complex”. Bryansk: Institute of Economics and Agribusiness of Bryansk State Agrarian University, 2022. P. 81–85.
20. Lyzhin A., Luk'yanchuk I. Marker-assisted screening of promising forms in the strawberry breeding // E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Fundamental and Applied Research in Biology and Agriculture: Current Issues, Achievements and Innovations” (FARBA 2021). 2021. Vol. 254. Art. No. 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202125403002.
21. 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 // ISHS Acta Horticulturae: IX International Strawberry Symposium. 2021. Vol. 1309. P. 93–100. DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1309.15.
22. Baumgartner I. O., Patocchi A., Frey J. E., Peil A., Kellerhals M. Breeding elite lines of apple carrying pyramided homozygous resistance genes against apple scab and resistance against powdery mildew and fire blight // Plant Molecular Biology. 2015. No 33. P. 1573–1583. DOI: 10.1007/s11105-015-0858-x.

UDC 634.75:577.2:632.4

Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V.

INHERITANCE OF ANTHRACNOSE RESISTANCE DETERMINED BY THE DOMINANT *RCA2* GENE IN STRAWBERRY HYBRID PROGENY

Summary. *One of the most important indicators of the breeding value of varieties is their ability to transmit agrobiological traits to a certain number of seedlings. The use of identified donors in breeding programs allows carrying out targeted construction of genotypes with desired traits. In strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.), most traits are controlled polygenically, which makes it difficult to identify donors and carry out directed breeding. Resistance to anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) is one of the strawberry traits with monogenic determination, which makes it possible to carry out directed selection using DNA markers. The purpose of the study was marker-assisted analysis of strawberry seedlings created in the I.V. Michurin Federal Scientific Center to identify patterns of inheritance of the *Rca2* anthracnose resistance gene in hybrid progeny and to determine the donor qualities of the initial forms. The studies were carried out in 2022–2023. The biological objects of the study were strawberry hybrid seedlings of intervarietal crossing combinations: ‘Florence’ × ‘Faith’ (40 pcs.), ‘Malwina’ × ‘Tea’ (32 pcs.), ‘Quicky’ × ‘Olympia’ (22 pcs.) and ‘Roxana’ × ‘Kimberly’ (24 pcs.). The *Rca2* anthracnose resistance allele in strawberry genoplasm was identified by dominant marker STS-*Rca2*_240. As a result of the research, it was found that in the crossing combination ‘Florence’ × ‘Faith’, 37.5 % of seedlings were with the *Rca2* allele, in ‘Malwina’ × ‘Tea’ – 34.4%, in ‘Quicky’ × ‘Olympia’ – 45.4%, in ‘Roxana’ × ‘Kimberly’ – 66.7%. The average number of strawberry seedlings with the *Rca2* gene for the*

studied crossing combinations was 46 %. The observed segregation by the presence and absence of the *Rca2* allele in the hybrid genotypes corresponds to the theoretically expected ratio (1:1) at a significance level of 0.05 (χ^2 criterion for cross combinations was 0.182–34.4 %, in 'Quicky' × 'Olympia' – 45.4%, in 'Roxana' × 'Kimberly' – 66.7%. The average 3.125 at a critical value of 3.84). Based on the data obtained, the genotypic structure of the initial forms was established: the strawberry varieties 'Florence', 'Malwina', 'Olympia' and 'Roxana' have a heterozygous genotype and are able to transmit the *Rca2* resistance allele to 50% of hybrid seedlings. Hybrid forms with the identified STS-*Rca2*_240 marker also have a heterozygous genotype (*Rca2rca2*).

Keywords: *Fragaria* × *ananassa* Duch., crossing combinations, molecular markers, genotype.

Лыжин Александр Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии устойчивости и геномных технологий, ФГБНУ «ФНЦ им. И.В. Мичурина»; 393760 г. Мичуринск, Тамбовская обл., ул. Мичурина, 30; e-mail: Ranenburzhetc@yandex.ru.

Лукьянчук Ирина Васильевна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории частной генетики и селекции, ФГБНУ «ФНЦ им. И.В. Мичурина»; 393760 г. Мичуринск, Тамбовская обл., ул. Мичурина, 30; e-mail: irina.lk2011@yandex.ru.

Lyzhin Aleksandr Sergeevich, Cand. Sc. (Agr.), leading researcher of the Laboratory of physiology of resistance and genomic technologies, FSSI "I.V. Michurin Federal Scientific Center"; 30, Michurina str., Michurinsk, Tambov region, 393774, Russia; e-mail: Ranenburzhetc@yandex.ru.

Luk'yanchuk Irina Vasilievna, Cand. Sc. (Agr.), leading researcher of the Laboratory of private genetics and breeding, FSSI "I.V. Michurin Federal Scientific Center"; 30, Michurina str., Michurinsk, Tambov region, 393774, Russia; e-mail: irina.lk2011@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию – 10.09.2023.

Дата принятия к печати – 21.09.2023.