
ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЕКЦИЯ И СЕМЕНОВОДСТВО

**Молекулярно-генетический анализ генотипов картофеля
на фитофтороустойчивость**

Нино Нодаровна Догузова, Ирина Олеговна Газданова✉

Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр
Российской академии наук», Владикавказ, Россия

✉ **Автор, ответственный за переписку:** gazdanovaira2020@gmail.com

Аннотация

Повышение урожайности сельскохозяйственных культур и их адаптация к изменяющимся условиям произрастания являются одними из нескольких средств обеспечения продовольственной безопасности. Картофель является наиболее важной культурой в рационе питания человека и выращивается на всех континентах. Селекционеры призваны сыграть важную роль в обеспечении устойчивого производства картофеля путем выведения новых устойчивых сортов и с повышенной урожайностью с 1 га. Начиная с 1990-х гг. генетика стала играть все более важную роль в селекции растений благодаря внедрению ДНК-маркеров в качестве косвенных вспомогательных средств отбора или для изучения генетического разнообразия. Сегодня основанные на геномике методы селекции растений – такие, как маркерная селекция (MAS) и геномная селекция (GS), ускоряют селекционный процесс многих важнейших культур. Цель работы заключалась в выявлении генов, определяющих резистентность к фитофторозу 30 перспективных картофельных гибридов с использованием ДНК-маркеров. Лабораторный анализ на устойчивость к фитофторозу проведен в лаборатории молекулярно-генетических исследований сельскохозяйственных растений Владикавказского научного центра Российской академии наук. Предварительно селекционный материал был оценен в полевых условиях в соответствии с рекомендациями по селекционному процессу для картофеля. Геномную ДНК выделяли из листьев картофеля в период цветения по СТАВ-методу. По результатам молекулярно-генетического анализа было установлено наличие трех маркеров: R1-1250, R3a-1380 и R3b-378, которые были идентифицированы в 5 различных гибридах картофеля: 3375-1 (Тирас и Бриз), 3403-2 (Аризоны и Фрителлы), 3341-2 (Инноватор и Мираж), 3352-1 (Колетте и Мираж) и 3352-4 (Колетте и Мираж). Наличие всех трех генов указывает на высокую степень устойчивости к фитофторозу. Таким образом, выделение генотипов картофеля с применением молекулярных маркеров позволяет ускорить селекционный процесс при выведении новых устойчивых сортов картофеля.

Ключевые слова

картофель, генотип, болезнь, *Phytophthora infestans*, устойчивость, ДНК-маркеры

Для цитирования

Догузова Н.Н., Газданова И.О. Молекулярно-генетический анализ генотипов картофеля на фитофтороустойчивость // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2026. № 3. С. 69–81.

Molecular genetic analysis of potato genotypes for late blight resistance

Nino N. Doguzova, Irina O. Gazdanova✉

Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences,
Vladikavkaz, Russia

✉Corresponding author: gazdanovaira2020@gmail.com

Abstract

Increasing crop yields and enhancing their adaptation to changing growing conditions are among the key strategies for ensuring food security. Potato is one of the most important food crops worldwide and is cultivated on all continents. Plant breeders play a crucial role in ensuring sustainable potato production by developing new resistant varieties with increased yield per hectare. Since the 1990s, genetics has played an increasingly important role in plant breeding through the introduction of DNA markers as indirect selection tools and for the assessment of genetic diversity. Today, genomics-based plant breeding approaches, such as marker-assisted selection (MAS) and genomic selection (GS), accelerate the breeding process for many major crops. The aim of this study was to identify genes conferring late blight resistance in 30 promising potato hybrids using DNA markers. Laboratory analyses for late blight resistance were conducted at the Laboratory of Molecular Genetic Research of Agricultural Plants at the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. The breeding material was preliminarily evaluated under field conditions in accordance with the recommendations for potato breeding programs. Genomic DNA was extracted from potato leaves during the flowering period using the CTAB method. For molecular genetic analysis of late blight resistance, the following R-gene molecular markers were used: R1-1250, R3a-1380, and R3b-378. The molecular genetic analysis revealed the presence of all three markers R1-1250, R3a-1380, and R3b-378. They were identified in five different potato hybrids. These hybrids included: 3375-1 (Tiras × Breeze), 3403-2 (Arizona × Fritella), 3341-2 (Innovator × Mirage), 3352-1 (Kolette × Mirage), and 3352-4 (Kolette × Mirage). The presence of all three genes indicates a high degree of late blight resistance. Thus, the identification of potato genotypes using molecular markers facilitates the acceleration of the breeding process for developing new resistant potato varieties.

Keywords

potato, genotype, disease, *Phytophthora infestans*, resistance, DNA markers

For citation

Doguzova N.N., Gazdanova I.O. Molecular genetic analysis of potato genotypes for late blight resistance. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2026;(3):69–81.

Введение Introduction

Фитофтороз представляет собой одну из серьезных угроз для картофелеводства на глобальном уровне. Это заболевание вызывается патогеном *Phytophthora infestans*, который способен не только значительно снизить урожайность картофеля, но и полностью уничтожить его в регионах с умеренным климатом. Экономические потери от этой болезни колоссальны и исчисляются миллиардами долларов ежегодно [1, 2]. Это создает серьезные проблемы для сельского хозяйства, так как рост цен

на картофель может привести к ухудшению продовольственной безопасности в странах, где этот продукт является основным. *Phytophthora infestans* отличается от других видов рода *Phytophthora* тем, что это патоген листостебельного аппарата, который производит большое количество спорангиев [3–5]. Эти спорангии могут переноситься по воздуху, особенно в условиях высокой влажности и низкой температуры, что способствует их распространению [6]. Инкубационный период после заражения составляет всего 4–5 дней. При благоприятных условиях для патогена надземная часть картофельного растения может полностью погибнуть всего за 1–2 недели. Без применения химических средств защиты растений добиться хорошего урожая практически невозможно [7–11]. Согласно стандарту, ГОСТ 7176–85, картофель, предназначенный для пищевого употребления, не должен содержать клубней, пораженных фитофторозом. Исключение возможно только в случаях, когда это согласовано с торговыми организациями, и даже в этом случае уровень пораженности не должен превышать 2%. Несмотря на необходимость защиты растений от фитофторы, чрезмерное использование химических фунгицидов может привести к негативным последствиям, что включает в себя ухудшение качества самого картофеля, а также потенциальные риски для здоровья потребителей, которые могут возникнуть ввиду остатков химических веществ на урожае [12].

Для борьбы с этой болезнью у картофеля выработались два основных типа устойчивости: сверхчувствительность и полевая устойчивость. Эти типы устойчивости имеют разные механизмы действия и уровни защиты. Полевая устойчивость, также известная как горизонтальная, или неспецифическая, является полигенной. Это означает, что она контролируется множеством генов, которые действуют в совокупности. Эти гены обеспечивают аддитивный эффект, что позволяет картофелю сохранять устойчивость к различным расам возбудителя фитофтороза на протяжении длительного времени. Полевая устойчивость обеспечивает защиту независимо от того, с какой расой патогена сталкивается растение, что делает ее более универсальной и надежной. С другой стороны, сверхчувствительность, является результатом активации доминантных генов устойчивости, известных как R-гены. Эти гены реагируют на специфические продукты генов авирулентности, которые присутствуют у патогена. В результате такого взаимодействия возникает полная невосприимчивость картофеля к определенным группам рас фитофтороза. Этот механизм взаимодействия между генами растения и патогена имеет специфический характер, и именно поэтому его называют специфической устойчивостью. Например, ген *R1* обеспечивает защиту картофеля от всех рас фитофторы, кроме тех, которые имеют в своем обозначении цифру 1. Это означает, что если раса патогена обозначена как 1, 1.2, 1.3, 1.4 или 1.2.3.4, то сорт картофеля с геном *R1* будет уязвим к данным расам. В то же время ген *R3* обеспечивает защиту от рас 1, 1.3, 1.4 и других, что также подчеркивает важность правильного выбора сортов картофеля в зависимости от присутствующих рас фитофторы в конкретной местности [13].

Таким образом, сорта картофеля, обладающие определенными R-генами или их комбинациями, могут оставаться непораженными фитофторозом до тех пор, пока не возникнут новые расы патогена, которые смогут преодолеть эту защиту. Это подчеркивает важность постоянного мониторинга и исследования новых рас фитофторы, а также необходимость селекции сортов картофеля с высокой устойчивостью для обеспечения стабильных урожаев и снижения потерь от болезни.

Одним из перспективных подходов к решению проблемы повышения устойчивости картофеля к фитофторозу является применение методов молекулярного маркирования. Эти методы позволяют выделять селекционно-ценные гены – в частности, доминантные гены, ответственные за устойчивость к болезням и вредителям.

Разработка молекулярных маркеров для быстрой и точной идентификации устойчивых генотипов картофеля может значительно упростить процесс выявления зараженных растений. Важно помнить, что использование молекулярных маркеров и генетически модифицированных организмов требует строгого соблюдения правил биологической безопасности. Необходимо учитывать потенциальные риски, связанные с внедрением новых технологий в сельское хозяйство. Обширные исследования в области картофелеводства уже выявили наличие доминантных генов, которые могут обеспечить устойчивость растений к фитофторозу. Эти достижения открывают новые горизонты для селекции и позволяют надеяться на создание более устойчивых сортов картофеля, которые смогут противостоять этому опасному патогену.

Таким образом, фитофтороз представляет собой серьезную угрозу для картофелеводства, и борьба с ней требует комплексного подхода, включающего в себя как традиционные методы защиты растений, так и современные молекулярные технологии. Важно продолжать исследования в этой области, чтобы разработать эффективные стратегии, которые помогут минимизировать ущерб от фитофтороза и обеспечить стабильное производство картофеля в будущем [14, 15].

Цель исследований: выявление генов, определяющих устойчивость к фитофторозу, у 30 перспективных картофельных гибридов с использованием ДНК-маркеров.

Методика исследований

Research method

В рамках исследований, проведенных в 2024 г., использовались гибриды картофеля, которые были получены в селекционном питомнике Владикавказского научного центра Российской академии наук. Работа была осуществлена в лаборатории, специализирующейся на молекулярно-генетических исследованиях сельскохозяйственных растений. Выделение растительной ДНК из образцов картофеля является важным этапом для дальнейшего анализа генетического материала. Для выделения ДНК мы использовали листья картофеля, которые были отобраны в период вегетации растений. Этот выбор был обусловлен тем, что именно в этот период листья содержат наибольшее количество генетического материала, необходимого для проведения дальнейших анализов. Геномную ДНК выделяли с использованием классического СТАВ-метода [16]. После этого происходила гомогенизация, которая обеспечивала равномерное распределение клеточных компонентов, и инкубация в том же буфере, что способствовало разрушению клеточных стенок и освобождению ДНК. На следующем этапе мы осуществили очистку полученной смеси с использованием хлороформа, что позволило отделить ДНК от других клеточных компонентов. После этого проводилось осаждение ДНК с помощью смеси изопропанола и 0,5 М ацетата калия, что также способствовало получению чистого образца. В завершение выделенную ДНК растворяли в деионизированной воде, что обеспечивало ее стабильность, и помещали на хранение в морозильную камеру при температуре -20°C , чтобы предотвратить деградацию. Для амплификации выделенной ДНК использовали термоциклер Mini-Amp Plus (MJ Research, США). Стандартная реакционная смесь для проведения ПЦР имела объем 25 мкл и состояла из ключевых компонентов. В ее состав входили также 10X буфер для Taq ДНК-полимеразы (производство ООО «Синтол»), 2,5 мМ смесь дезоксирибонуклеотидов (dNTP) от компании Диаэм, водный раствор хлорида магния 2,5 мМ, который был предоставлен компанией Fermentas. Каждый из праймеров добавлялся в количестве 5 пкмоль – также от компании ООО «Синтол». Кроме того, в реакционную смесь добавляли 0,2 ед. Taq ДНК-полимеразы и 20 нг пробы ДНК,

а также 15 мкл автоклавированной бидистиллированной воды, что обеспечивало необходимую среду для реакции

Условия проведения полимеразной цепной реакции (ПЦР) соответствовали рекомендациям разработчиков праймеров, что указано в таблице 1 [17, 18]. После завершения амплификации мы проводили электрофорез в горизонтальном 1,5%-ном агарозном геле, используя буфер TBE. После электрофореза окрашивали гель бромистым этидием и визуализировали его под ультрафиолетовым светом, что позволяло увидеть отдельные фрагменты ДНК.

В таблице 1 перечислены все использованные в работе ДНК маркеры, относящиеся к R-генам, обеспечивающим устойчивость растений к патогену *Phytophthora infestans*. Эти маркеры играют ключевую роль в селекции и генетическом анализе картофеля, так как они помогают выявить устойчивые к болезням сорта, что является важным аспектом в агрономии и сельском хозяйстве в целом.

Таблица 1

ДНК–маркеры R–генов, контролирующие устойчивость к фитофторозу

Table 1

DNA markers of R–genes controlling late blight resistance

Ген/Мар–кер	Размер мар–кера, п.н.	Темпера–тура отжига, °С	Последовательности праймеров	Источник литературы
R1/R1–1205	1205	65	F: CACTCGTGACATATCCTCACTA R: GTAGTACCTATCTTATTTCTGCAAGAAT	[17]
R3a/R3a–1380	1380	64	F: TCCGACATGTATTGATCTCCCTG R: AGCCACTTCAGCTTCTTACAGTAGG	[17]
R3b/R3b–378	378	64	F: GTCGATGAATGCTATGTTTCTCGAGA R: ACCAGTTTCTTGCAATTCCAGATTG	[18]

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

В рамках исследований был проведен молекулярный скрининг на наличие маркеров генов устойчивости к фитофторозу среди 30 гибридов картофеля, которые были отобраны из питомника и находились на стадии испытаний второго года. Для оценки устойчивости картофеля к фитофторозу в исследованиях были использованы специфические маркеры – такие, как R1/R1–1205, R3a/R3a–1380 и R3b/R3b–378. Эти маркеры указывают на наличие определенных генов устойчивости, которые достаточно широко распространены среди различных генотипов картофеля. По результатам анализа было установлено, что полный набор из трех маркеров (R1–1250/R1, R3a–1380/R3a и R3b–378/R3b) был обнаружен у 5 гибридных линий картофеля: 3375–1 (Тирас × Бриз); 3403–2 (Аризона × Фрителла); 3341–2 (Инноватор × Мираж); 3352–1 (КоLETTE × Мираж); 3352–4 (КоLETTE × Мираж).

Гибриды картофеля, у которых диагностировано наибольшее количество генов устойчивости к фитофторозу, представляют интерес для дальнейшей

селекции как родительские формы. Молекулярный генетический анализ позволил выявить в 11 гибридных комбинациях наличие только некоторых из трех маркеров, что может указывать на различные уровни устойчивости к фитофторе среди исследуемых гибридов: 3403–1 (Аризона × Фрителла), 3380–1 (Аризона × Вымпел), 3340–1 (Тирас × Мираж), 3340–2 (Тирас × Мираж), 3341–1 (Инноватор × Мираж), 3373–1 (Реал × Бриз), 3379–1 (Алуэт × Вымпел), 3352–2 (Колетте × Мираж), 3385–1 (BP808 × Вымпел), 3385–2 (BP808 × Вымпел), 3188–5 (Ариэль × Феррари) (табл. 2, рис. 1–3).

Молекулярно-генетический анализ, направленный на выявление генов, отвечающих за устойчивость среди различных гибридов картофеля, представляет собой важный шаг к повышению эффективности и точности отбора при использовании ДНК-маркеров. Данные исследования имеют огромное значение в контексте современного сельского хозяйства, поскольку устойчивые сорта картофеля играют ключевую роль в снижении распространенности фитофтороза – одного из самых разрушительных заболеваний, поражающих эту культуру. Устойчивость к фитофторозу не только помогает сохранить здоровье растений на различных этапах их роста и развития, но и обеспечивает более высокие и качественные урожаи. Этот подход включает в себя использование как современных генетических и молекулярных методов, так и традиционных методов скрещивания. Такое сочетание открывает новые горизонты в борьбе с фитофторозом и позволяет более эффективно справляться с данной угрозой.

Таблица 2

Результаты молекулярно-генетического анализа гибридов картофеля с помощью ДНК-маркеров

Table 2

Results of molecular genetic analysis of potato hybrids using DNA markers

№	Гибрид	Происхождение	Наличие ДНК-маркеров (маркер/ген) к <i>Phytophthora infestans</i>			Общее количество генов
			R1–1250/R1	R3a–1380/R3a	R3b–378/R3b	
1	3424–1	Королева Анна × Сигнал	–	–	+	1
2	3424–2	Королева Анна × Сигнал	–	–	+	1
3	3375–1	Тирас × Бриз	+	+	+	3
4	3403–1	Аризона × Фрителла	+	–	+	2
5	3403–2	Аризона × Фрителла	+	+	+	3
6	3493–1	Королева Анна × 4614–12	–	–	+	1
7	3493–2	Королева Анна × 4614–12	–	–	+	1
8	3493–3	Королева Анна × 4614–12	–	–	+	1

№	Гибрид	Происхождение	Наличие ДНК-маркеров (маркер/ген) к <i>Phytophthora infestans</i>			Общее количество генов
			R1–1250/R1	R3a–1380/R3a	R3b–378/R3b	
9	3493–4	Королева Анна × 4614–12	–	–	+	1
10	3493–5	Королева Анна × 4614–12	–	–	+	1
11	3493–6	Королева Анна × 4614–12	–	–	+	1
12	3380–1	Аризона × Вымпел	–	+	+	2
13	3380–2	Аризона × Вымпел	–	–	+	1
14	3380–3	Аризона × Вымпел	–	–	+	1
15	3340–1	Тирас × Мираж	+	–	+	2
16	3340–2	Тирас × Мираж	+	–	+	2
17	3341–1	Инноватор × Мираж	+	–	+	2
18	3341–2	Инноватор × Мираж	+	+	+	3
19	3373–1	Реал × Бриз	+	–	+	2
20	3379–1	Алуэт × Вымпел	–	+	+	2
21	3335–1	Садон × Беллароза	–	–	–	
22	3352–1	Колетте × Мираж	+	+	+	3
23	3352–2	Колетте × Мираж	+	–	+	2
24	3352–3	Колетте × Мираж	+	–	–	1
25	3352–4	Колетте × Мираж	+	+	+	3
26	3385–1	ВР808 × Вымпел	+	–	+	2
27	3385–2	ВР808 × Вымпел	+	–	+	2
28	3385–3	ВР808 × Вымпел	–	–	+	1
29	3278–1	Аксения × Кармен	–	–	+	1
30	3188–5	Ариэль × Феррари	–	+	+	2

Примечание. «+» – маркер присутствует; «–» – маркер отсутствует.

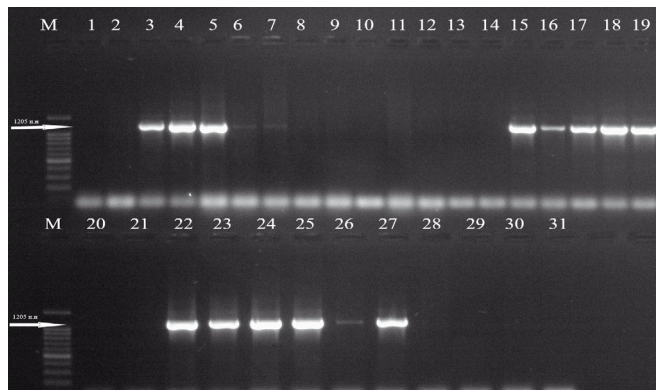


Рис. 1. ПЦР-тест на присутствие гена R (*R1-1250*)

М–маркер 1Kb DNA Ladder (Thermo ScientificTM); 1 – 13424–1; 2 – 3424–2; 3 – 3375–1; 4 – 3403–1; 5 – 3403–2; 6 – 3493–1; 7 – 3493–2; 8 – 3493–3; 9 – 3493–4; 10 – 3493–5; 11 – 3493–6; 12 – 3380–1; 13 – 3380–2; 14 – 3380–3; 15 – 3340–1; 16 – 3340–2; 17 – 3341–1; 18 – 3341–2; 19 – 3373–1; 20 – 3379–1; 21 – 3335–1; 22 – 3352–1; 23 – 3352–2; 24 – 3352–3; 25 – 3352–4; 26 – 3385–1; 27 – 3385–2; 28 – 3385–3; 29 – 3278–1; 30 – 3188–5; 31 – отрицательный контрольный образец

Figure 1. PCR test for the presence of the *R1* gene (*R1-1250*).

М – 1 kb DNA ladder (Thermo ScientificTM); 1 – 13424–1; 2 – 3424–2; 3 – 3375–1; 4 – 3403–1; 5 – 3403–2; 6 – 3493–1; 7 – 3493–2; 8 – 3493–3; 9 – 3493–4; 10 – 3493–5; 11 – 3493–6; 12 – 3380–1; 13 – 3380–2; 14 – 3380–3; 15 – 3340–1; 16 – 3340–2; 17 – 3341–1; 18 – 3341–2; 19 – 3373–1; 20 – 3379–1; 21 – 3335–1; 22 – 3352–1; 23 – 3352–2; 24 – 3352–3; 25 – 3352–4; 26 – 3385–1; 27 – 3385–2; 28 – 3385–3; 29 – 3278–1; 30 – 3188–5; 31 – negative control sample

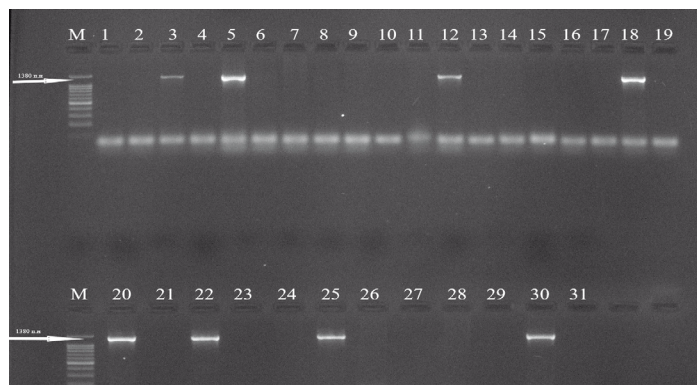


Рис. 2. ПЦР-тест на присутствие гена R3a (*R3a-1380*)

М–маркер 1Kb DNA Ladder (Thermo ScientificTM); 1 – 13424–1; 2 – 3424–2; 3 – 3375–1; 4 – 3403–1; 5 – 3403–2; 6 – 3493–1; 7 – 3493–2; 8 – 3493–3; 9 – 3493–4; 10 – 3493–5; 11 – 3493–6; 12 – 3380–1; 13 – 3380–2; 14 – 3380–3; 15 – 3340–1; 16 – 3340–2; 17 – 3341–1; 18 – 3341–2; 19 – 3373–1; 20 – 3379–1; 21 – 3335–1; 22 – 3352–1; 23 – 3352–2; 24 – 3352–3; 25 – 3352–4; 26 – 3385–1; 27 – 3385–2; 28 – 3385–3; 29 – 3278–1; 30 – 3188–5; 31 – отрицательный контрольный образец

Figure 2. PCR test for the presence of the *R3a* gene (*R3a-1380*).

М – 1 kb DNA ladder (Thermo ScientificTM); 1 – 13424–1; 2 – 3424–2; 3 – 3375–1; 4 – 3403–1; 5 – 3403–2; 6 – 3493–1; 7 – 3493–2; 8 – 3493–3; 9 – 3493–4; 10 – 3493–5; 11 – 3493–6; 12 – 3380–1; 13 – 3380–2; 14 – 3380–3; 15 – 3340–1; 16 – 3340–2; 17 – 3341–1; 18 – 3341–2; 19 – 3373–1; 20 – 3379–1; 21 – 3335–1; 22 – 3352–1; 23 – 3352–2; 24 – 3352–3; 25 – 3352–4; 26 – 3385–1; 27 – 3385–2; 28 – 3385–3; 29 – 3278–1; 30 – 3188–5; 31 – negative control sample

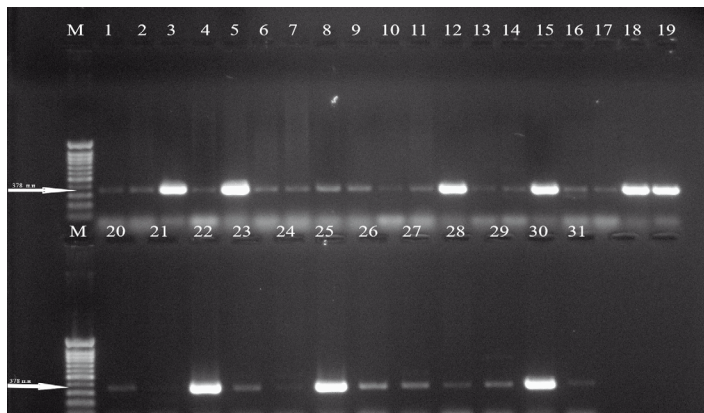


Рис. 3. ПЦР-тест на присутствие гена R3b (R3b-378)

М – маркер 1Kb DNA Ladder (Thermo Scientific™); 1 – 13424-1; 2 – 3424-2; 3 – 3375-1; 4 – 3403-1; 5 – 3403-2; 6 – 3493-1; 7 – 3493-2; 8 – 3493-3; 9 – 3493-4; 10 – 3493-5; 11 – 3493-6; 12 – 3380-1; 13 – 3380-2; 14 – 3380-3; 15 – 3340-1; 16 – 3340-2; 17 – 3341-1; 18 – 3341-2; 19 – 3373-1; 20 – 3379-1; 21 – 3335-1; 22 – 3352-1; 23 – 3352-2; 24 – 3352-3; 25 – 3352-4; 26 – 3385-1; 27 – 3385-2; 28 – 3385-3; 29 – 3278-1; 30 – 3188-5; 31 – отрицательный контрольный образец

Figure 3. PCR test for the presence of the R3b gene (R3b-378).

М – 1 kb DNA ladder (Thermo Scientific™); 1 – 13424-1; 2 – 3424-2; 3 – 3375-1; 4 – 3403-1; 5 – 3403-2; 6 – 3493-1; 7 – 3493-2; 8 – 3493-3; 9 – 3493-4; 10 – 3493-5; 11 – 3493-6; 12 – 3380-1; 13 – 3380-2; 14 – 3380-3; 15 – 3340-1; 16 – 3340-2; 17 – 3341-1; 18 – 3341-2; 19 – 3373-1; 20 – 3379-1; 21 – 3335-1; 22 – 3352-1; 23 – 3352-2; 24 – 3352-3; 25 – 3352-4; 26 – 3385-1; 27 – 3385-2; 28 – 3385-3; 29 – 3278-1; 30 – 3188-5; 31 – negative control sample

Необходимо подчеркнуть, что дальнейшие исследования и селекция картофеля с акцентом на устойчивость к фитофторозу являются важными направлениями в агрономии и селекции. Это связано с тем, что понимание генетической основы устойчивости к этому заболеванию может привести к созданию новых сортов, которые будут способны противостоять фитофторозу. Это в свою очередь обеспечит стабильные и качественные урожаи, что крайне важно для сельского хозяйства и продовольственной безопасности.

Выводы

Conclusions

Благодаря молекулярно-генетическому скринингу, основанному на использовании ДНК-маркеров, стало возможным выделение генотипов, которые имеют в своем составе комбинацию R-генов, отвечающих за устойчивость картофеля к такому опасному заболеванию, как *Phytophthora infestans*. В ходе проведенных исследований было установлено наличие трех ключевых маркеров: R1-1250, R3a-1380 и R3b-378, которые были идентифицированы в 5 различных гибридах картофеля. Эти гибриды включают в себя 3375-1 (Тирас и Бриз), 3403-2 (Аризона и Фрителлы), 3341-2 (Инноватор и Мираж), 3352-1 (Колетте и Мираж) и 3352-4 (Колетте и Мираж). Наличие всех трех генов указывает на высокую степень устойчивости к фитофторозу. Кроме того, в исследованиях было отмечено, что у 11 гибридов картофеля также обнаружены маркеры R1-1250/R1 и R3b-378/R3b. Среди этих гибридов можно выделить следующие: 3403-1 (Аризона × Фрителла), 3380-1 (Аризона × Вымпел), 3340-1 (Тирас × Мираж),

3340–2 (Тирас × Мираж), 3341–1 (Инноватор × Мираж), 3373–1 (Реал × Бриз), 3379–1 (Алуэт × Вымпел), 3352–2 (Колетте × Мираж), 3385–1 (ВР808 × Вымпел), 3385–2 (ВР808 × Вымпел) и 3188–5 (Ариэль × Феррари). Это свидетельствует о том, что наличие комбинации генов R1, R3a и R3b является наиболее желательным признаком для обеспечения высокой устойчивости картофеля к *Phytophthora infestans*.

Таким образом, результаты проведенных исследований подчеркивают важность использования ДНК-маркеров в селекции картофеля. Они не только позволяют ускорить процесс отбора устойчивых к заболеваниям сортов, но и обеспечивают более надежные результаты благодаря точности молекулярного анализа. Это открывает новые горизонты для селекционеров и агрономов, стремящихся к созданию высокопродуктивных и устойчивых к болезням сортов картофеля, что в свою очередь имеет большое значение для обеспечения продовольственной безопасности и повышения урожайности в условиях изменяющегося климата и растущих угроз со стороны различных заболеваний.

Список источников

1. Королева А.К., Деревягина М.К., Бирюкова В.А., Поливанова О.Б. и др. Оценка устойчивости перспективных гибридов цветного картофеля к фитофторозу // *Аграрный вестник Урала*. 2024. Т. 24, № 3. С. 319–337. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-319-337>
2. Sorensen P.L., Christensen G., Karki H.S., Endelman J.B. A KASP Marker for the Potato Late Blight Resistance Gene *RB/Rpi-blb1*. *American Journal of Potato Research*. 2023;100(3):240. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09914-6>
3. Догузова Н.Н., Газданова И.О. Изучение устойчивости к *Phytophthora infestans* селекционного материала картофеля с помощью ДНК-маркеров // *Аграрный научный журнал*. 2024. № 10. С. 19–24. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp19-24>
4. Клименко Н.С. Генетическое разнообразие сортов картофеля отечественной селекции, изученное с использованием различных типов ДНК-маркеров: Дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург, 2022. 225 с. EDN: UFRRVW
5. Рогозина Е.В., Хавкин Э.Е. Межвидовые гибриды картофеля как доноры долговременной устойчивости к патогенам // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017. Т. 21, № 1. С. 30–41. <https://doi.org/10.18699/VJ17.221>
6. Хавкин Э.Е. Молекулярный диалог растений с патогенами: эволюция, механизмы и практическое использование // *Физиология растений*. 2021. Т. 68, № 2. С. 115–131. <https://doi.org/10.31857/S001533032102007X>
7. Muratova (Fadina) O.A., Beketov M.P., Kuznetsova M.A., Rogozina E.V. et al. South American species *Solanum alandiae* Card. and *S. okadae* Hawkes et Hjerting as potential sources of genes for potato late blight resistance. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(1):73-83. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-1-73-83>
8. Dong S.-M., Zhou S.-Q. Potato late blight caused by *Phytophthora infestans*: From molecular interactions to integrated management strategies. *Journal of Integrative Agriculture*. 2022;21(12):3456-3466. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.060>
9. Blatnik E., Horvat M., Berne S., Humar M. et al. Late Blight Resistance Conferred by *Rpi-Smira2/R8* in Potato Genotypes In Vitro Depends on the Genetic Background. *Plants*. 2022;11(10):1319. <https://doi.org/10.3390/plants11101319>
10. Gao L., Bradeen J.M. Contrasting Potato Foliage and Tuber Defense Mechanisms against the Late Blight Pathogen *Phytophthora infestans*. *PLoS One*. 2016;11(7): e0159969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159969>

11. Sorensen P.L., Christensen G., Karki H.S., Endelman J.B. A KASP Marker for the Potato Late Blight Resistance Gene *RB/Rpi-blb1*. *American Journal of Potato Research*. 2023;100(3):240-246. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09914-6>
12. Wang E.S., Kieu N.P., Lenman M., Andreasson E. Tissue culture and refreshment techniques for improvement of transformation in local tetraploid and diploid potato with late blight resistance as an example. *Plants*. 2020;9(6):695-709. <https://doi.org/10.3390/plants9060695>
13. Фисенко П.В., Мацишина Н.В., Попова Ю.С., Волков Д.И. и др. Изучение устойчивости сортов картофеля к *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, *Synchytrium endobioticum* (Schilb.), *Globodera pallida* (Stone), *Globodera rostochiensis* (Wollenweber), PVY, PVX в Приморском крае // *Аграрная наука*. 2023. № 9. С. 126–132. <https://doi.org/10.32634/08698155-2023-374-9-126-132>
14. Дзедаев Х.Т., Газданова И.О., Бекмурзов Б.В. Биологическая борьба с фитофторозом картофеля, вызываемым *Phytophthora infestans* // *Аграрный вестник Урала*. 2023. Т. 23, № 9. С. 2–10. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-09-2-10>
15. Gao L., Bradeen J.M. Contrasting Potato Foliage and Tuber Defense Mechanisms against the Late Blight Pathogen *Phytophthora infestans*. *PLoS One*. 2016;11(7): e0159969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159969>
16. Song Y.-S., Schwarzfischer A. Development of STS markers for selection of extreme resistance (Rysto) to PVY and maternal pedigree analysis of extremely resistant cultivars. *American Journal of Potato Research*. 2008;85:159-170. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9012-8>
17. Sokolova E., Pankin A., Beketova M., Khavkin E. et al. SCAR markers of the R-genes and germplasm of wild *Solanum* species for breeding late blight-resistant potato cultivars. *Plant Genetic Resources: Characterisation and Utilisation*. 2011;9(2):309-312. <https://doi.org/10.1017/S1479262111000347>
18. Rietman H., Bijsterbosch G., Cano L.M., Lee H.R. et al. Qualitative and quantitative late blight resistance in the potato cultivar Sarpo Mira is determined by the perception of five distinct RXLR effectors. *Molecular Plant-Microbe Interaction*. 2012;25(7):910-919. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-12-0010-R>

References

1. Koroleva A.K., Derevyagina M.K., Biryukova V.A., Polivanova O.B. et al. Resistance assessment of promising colored potato hybrids to late blight. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024;24(3):319-337. (In Russ.) <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-319-337>
2. Sorensen P.L., Christensen G., Karki H.S., Endelman J.B. A KASP Marker for the Potato Late Blight Resistance Gene *RB/Rpi-blb1*. *American Journal of Potato Research*. 2023;100:240-246. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09914-6>
3. Doguzova N.N., Gadzanova I.O. Study of resistance to phytophthora infestans of potato breeding material using dna markers. *The Agrarian Scientific Journal*. 2024;(10):19-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp19-24>
4. Klimenko N.S. *Genetic diversity of domestically bred potato varieties studied using different types of DNA markers*: CSc (Bio) thesis. St. Petersburg, Russia, 2022:225. (In Russ.)
5. Rogozina E.V., Khavkin E.E. Interspecific potato hybrids as donors of durable resistance to pathogens. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(1):30-41. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/VJ17.221>

6. Khavkin E.E. Molecular dialogue of plants with pathogens: evolution, mechanisms, and practical use. *Fiziologiya rastenij*. 2021;68(2):115-131. 115-131. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S001533032102007X>
7. Muratova (Fadina) O.A., Beketov M.P., Kuznetsova M.A., Rogozina E.V. et al. South American species *Solanum alandiae* Card. and *S. okadae* Hawkes et Hjerting as potential sources of genes for potato late blight resistance. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(1):73-83. <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2020-1-73-83>
8. Dong S.-M., Zhou S.-Q. Potato late blight caused by *Phytophthora infestans*: From molecular interactions to integrated management strategies. *Journal of Integrative Agriculture*. 2022;21(12):3456-3466. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.060>
9. Blatnik E., Horvat M., Berne S., Humar M. et al. Late Blight Resistance Conferred by Rpi-Smira2/R8 in Potato Genotypes In Vitro Depends on the Genetic Background. *Plants*. 2022;11(10):1319. <https://doi.org/10.3390/plants11101319>
10. Gao L., Bradeen J.M. Contrasting Potato Foliage and Tuber Defense Mechanisms against the Late Blight Pathogen *Phytophthora infestans*. *PLoS One*. 2016;11(7): e0159969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159969>
11. Sorensen P.L., Christensen G., Karki H.S., Endelman J.B. A KASP Marker for the Potato Late Blight Resistance Gene RB/Rpi-blb1. *American Journal of Potato Research*. 2023;100(3):240-246. <https://doi.org/10.1007/s12230-023-09914-6>
12. Wang E.S., Kieu N.P., Lenman M., Andreasson E. Tissue culture and refreshment techniques for improvement of transformation in local tetraploid and diploid potato with late blight resistance as an example. *Plants*. 2020;9(6):695-709. <https://doi.org/10.3390/plants9060695>
13. Fisenko P.V., Matsishina N.V., Popova Yu.S., Volkov D.I. et al. Study of the structure of potato varieties to *Phytophthora infestans* (mont.) De Bary, *Synchytrium endobioticum* (Schilb.), *Globodera pallida* (Stone), *Globodera rostochiensis* (Wollenweber), PVY, PVX in Primorsky Krai. *Agrarian Science*. 2023;(9):126-132. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/08698155-2023-374-9-126-132>
14. Dzedaev Kh.T., Gazdanova I.O., Bekmurzov B.V. Biological control of *Phytophthora infestans* in potatoes. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2023;23(9):2-10. (In Russ.) <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-09-2-10>
15. Gao L., Bradeen J.M. Contrasting Potato Foliage and Tuber Defense Mechanisms against the Late Blight Pathogen *Phytophthora infestans*. *PLoS One*. 2016;11(7): e0159969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159969>
16. Song Y.-S., Schwarzfischer A. Development of STS markers for selection of extreme resistance (Rysto) to PVY and maternal pedigree analysis of extremely resistant cultivars. *American Journal of Potato Research*. 2008;85:159-170. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9012-8>
17. Sokolova E., Pankin A., Beketova M., Khavkin E. et al. SCAR markers of the R-genes and germplasm of wild *Solanum* species for breeding late blight-resistant potato cultivars. *Plant Genetic Resources: Characterisation and Utilisation*. 2011;9(2):309-312. <https://doi.org/10.1017/S1479262111000347>
18. Rietman H., Bijsterbosch G., Cano L.M., Lee H.R. et al. Qualitative and quantitative late blight resistance in the potato cultivar Sarpo Mira is determined by the perception of five distinct RXLR effectors. *Molecular Plant-Microbe Interaction*. 2012;25(7):910-919. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-12-0010-R>

Сведения об авторах

Догузова Нино Нодаровна, научный сотрудник, лаборатория молекулярно-генетических исследований сельскохозяйственных растений, Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр Российской академии наук»; 363110, Российская Федерация, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса; e-mail: doguzovanino@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3655-5166>

Газданова Ирина Олеговна, канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник, лаборатория молекулярно-генетических исследований сельскохозяйственных растений, Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр Российской академии наук»; 363110, Российская Федерация, РСО-Алания, Пригородный район, с. Михайловское, ул. Вильямса; e-mail: gazdanovaira2020@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3000-8615>

Information about the authors

Nino N. Doguzova, Research Associate at the Laboratory of Molecular Genetic Research of Agricultural Plants, Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 1 Vil'yamsa St., Mikhaylovskoe Vlg., Prigorodny District, Republic North Ossetia-Alania, 363110, Russian Federation; e-mail: doguzovanino@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3655-5166>

Irina O. Gazdanova, Senior Research Associate at the Laboratory of Molecular Genetic Research of Agricultural Plants, Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 1 Vil'yamsa St., Mikhaylovskoe Vlg., Prigorodny District, Republic North Ossetia-Alania, 363110, Russian Federation; e-mail: gazdanovaira2020@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3000-8615>