

УДК 635.21:632.4:631.524:577.21

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-388-11-109-116

О.Г. Казаков¹О.Б. Поливанова^{1, 2} ✉М.К. Деревягина¹В.А. Бирюкова¹¹Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха, Красково, Московская обл., Россия²Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия

✉ polivanovaoks@gmail.com

Поступила в редакцию: 15.08.2024

Одобрена после рецензирования: 02.10.2024

Принята к публикации: 17.10.2024

© Казаков О.Г., Поливанова О.Б., Деревягина М.К., Бирюкова В.А.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2024-388-11-109-116

Oleg G. Kazakov¹Oksana B. Polivanova^{1, 2} ✉Marina K. Derevyagina¹Victoria A. Biryukova¹¹Russian Potato Research Centre, Kraskovo, Moscow region, Russia²Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

✉ polivanovaoks@gmail.com

Received by the editorial office: 15.08.2024

Accepted in revised: 02.10.2024

Accepted for publication: 17.10.2024

© Kazakov O.G., Polivanova O.B., Derevyagina M.K., Biryukova V.A.

Выявление перспективных гибридов *Solanum tuberosum* с высоким уровнем устойчивости к фитофторозу

РЕЗЮМЕ

Изучение генетического разнообразия картофеля на основе использования традиционных и современных молекулярно-генетических методов идентификации ценных генов позволяет ускорить выделение нужных генотипов с комплексом хозяйственно полезных признаков для использования в селекции. В данной работе по результатам многолетнего изучения 200 образцов питомника фитофтороустойчивых гибридов из генетической коллекции был выделен 31 образец со стабильно высоким проявлением признака по годам. Оценка производилась в полевых условиях и методом искусственного заражения клубней и листьев. Было определено наличие маркеров генов устойчивости методом ПЦР. По результатам проведенных испытаний данные образцы отличались высоким уровнем устойчивости листьев и клубней, характеризуются высоким уровнем ряда других селекционно значимых признаков. При этом отобранные образцы имели до 4 маркеров *Rpi*-генов, обуславливающих вертикальную устойчивость генотипов. Выявленные образцы могут быть использованы в селекционном процессе в качестве доноров высокого уровня устойчивости к фитофторозу.

Ключевые слова: картофель, фитофтороз, *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, горизонтальная устойчивость, *Rpi*-гены, молекулярные маркеры, генетическая коллекция

Для цитирования: Казаков О.Г., Поливанова О.Б., Деревягина М.К., Бирюкова В.А. Выявление гибридов *Solanum tuberosum* с высоким уровнем устойчивости к фитофторозу. *Аграрная наука*. 2024; 388(11): 109–116.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-109-116>

Identification of promising *Solanum tuberosum* hybrids with high resistance to late blight

ABSTRACT

The study of potato genetic diversity using traditional and modern molecular genetic methods for identifying valuable genes allows for faster selection of desired genotypes with a set of economically important traits for use in breeding programs. In this research, based on the results of a long-term study of 200 nursery samples of late blight-resistant hybrids from the genetic collection, 31 samples with a consistently high manifestation of the trait over the years were selected. The assessment was carried out in the field and by the method of artificial infection of tubers and leaves. The presence of markers of resistance genes was determined by PCR. According to the results of the tests, these samples were characterized by a high level of stability of leaves and tubers, and are characterized by a high level of a number of other selection-significant features. At the same time, the selected samples had up to 4 markers of *Rpi* genes, which determine the vertical resistance of genotypes. The identified samples can be used in the breeding process as donors of a high level of resistance to late blight.

Key words: potato, late blight, *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, horizontal resistance, *Rpi*-genes, molecular markers, genetic collection

For citation: Kazakov O.G., Polivanova O.B., Derevyagina M.K., Biryukova V.A. Identification of promising *Solanum tuberosum* hybrids with high resistance to late blight. *Agrarian science*. 2024; 388(11): 109–116 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-388-11-109-116>

Введение/Introduction

Проблема контроля распространения фитофтороза, возбудителем которого является оомицет *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, в производственных посадках картофеля не теряет своей остроты с момента фиксации первых эпифитотий болезней. История знает немало примеров, когда этот патоген сыграл трагическую роль в жизни людей. В 1843 году фитофтороз вызвал значительные поражения картофеля в США, а уже в 1845-м начал распространяться по территории Европы, что привело к голоду и массовой эмиграции из Ирландии, где картофель был основным продуктом питания [1].

В современную технологию возделывания картофеля интегрированы и постоянно совершенствуются различные комплексные меры предупреждения данного заболевания, которые применяются практически на всех этапах производственного цикла, включая хранение, подготовку к посадке, уход и уборку.

При благоприятных условиях для развития фитофтороза без своевременного применения химических препаратов большинство сортов подвержены сильному поражению. В настоящее время потери урожая из-за фитофтороза оцениваются в 10–15% от общего мирового годового производства картофеля. Экономическая стоимость потерянного урожая в совокупности с расходами на защиту растений составляет более 10 млрд долл. США в год [2]. Стоимость пестицидов для контроля фитофтороза может составлять от 10 до 25% рыночной стоимости урожая картофеля в развитых странах [3]. Поэтому наличие высокой генетически обусловленной устойчивости к фитофторозу — один из основных критериев при подборе исходных родительских форм для использования в селекции и одна из важнейших характеристик сорта. В связи с этим необходимо на этапе предселекции не только отбирать высокоустойчивые к патогену формы, но и на их основе создавать новые генетические источники, которые характеризуются высоким уровнем и стабильностью проявления хозяйственно ценных признаков.

Оценку устойчивости картофеля к фитофторозу проводят непосредственно в поле и при помощи искусственного заражения в лабораторных и полевых условиях. Естественные эпифитотии *P. infestans* могут быть использованы для скрининга картофеля на устойчивость к фитофторозу. Но такая оценка не может быть точной, так как на развитие эпифитотий значительное влияние оказывают факторы внешней среды, такие как температура, относительная влажность и осадки.

Таким образом, степень проявления инфекции в поле может варьироваться от года к году. Использование искусственной инокуляции дает более надежные результаты оценки устойчивости. Надежно выявить генетические источники, обладающие высоким уровнем фитофтороустойчивости, позволяет совмещение лабораторных тестов и скрининга в полевых условиях. Лабораторное заражение создает максимально благоприятные условия для развития инфекции, и, в отличие от заражения в поле, результат не определяется условиями окружающей среды. При искусственном заражении в лаборатории можно оценить устойчивость к широкому спектру рас патогена, которые могут быть нетипичными для отдельных территорий. При искусственном заражении создается повышенная вирулентность среды, что позволяет более точно оценить уровень как горизонтальной (при использовании сложного инокулюма), так и вертикальной устойчивости.

Сочетание полевого скрининга и искусственного заражения в лаборатории позволяет ускорить отбор устойчивых генотипов в самом начале селекционного процесса. При этом лабораторный скрининг, включающий искусственное заражение отдельных клубней и листьев, дает результаты, сопоставимые с оценкой в полевых условиях в период естественных эпифитотий фитофтороза, и позволяет выявить устойчивые гибриды [4].

Горизонтальная (полевая) устойчивость к фитофторозу относится к аддитивно наследуемым полигенным признакам. Вертикальная (расоспецифическая) устойчивость определяется наличием доминантных *Rpi*-генов (генов устойчивости к *P. infestans*), которые были выявлены у диких видов картофеля. Для поражения растений картофеля *P. infestans* использует эффекторный белки, многие из которых содержат мотив RXLR. R-белки растений, кодируемые генами *Rpi*, распознают эффекторный белки RXLR, что останавливает прогрессирование инфекции. Данная система ответа объясняет специфическую устойчивость определенных генотипов хозяина к различным штаммам патогенов [5].

Выявление устойчивых к фитофторозу генотипов *Solanum demissum* из Мексики способствовало селекции культурного картофеля в Европе в начале XX века. Однако внедрение генов *Rpi* из *S. demissum* оказалось малоэффективным — в большинстве случаев *P. infestans* смогла преодолеть устойчивость, так как R-гены обеспечивают защиту от определенных рас *P. infestans*, и некоторые расы патогена оказались вирулентными по отношению ко всем изначально идентифицированным и внедренным от диких видов R-генам [6].

На современном этапе селекционерами в кооперации со специалистами по защите растений, генетиками, молекулярными биологами непрерывно ведется поиск новых генетических источников устойчивости к *P. infestans* среди большого разнообразия ранее не задействованных в селекционном процессе видов картофеля.

К настоящему времени идентифицированы более 70 *Rpi*-генов у 32 видов *Solanum*. При этом у диких видов могут встречаться как единичные *Rpi*-гены, так и несколько генов одновременно. Например, *S. huancabambense*, *S. pinnatisectum*, *S. schenckii* и *S. tarijense* имеют по 2 функциональных *Rpi*-гена, *S. hjertingii* и *S. chacoense* — 3, *S. edinense*, *S. venturii* и *S. stoloniferum* — 4, *S. berthaultii* и *S. bulbocastanum* — 5, *S. demissum* — 14.

Rpi-гены были картированы кластерами на I, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X и XI хромосомах картофеля [7]. Все перечисленные виды могут быть потенциальными донорами новых *Rpi*-генов и, таким образом, более широко включаться в программы скрещиваний. Использование надежных молекулярных маркеров, сцепленных с *Rpi*-генами, в рамках маркер-опосредованной селекции ускоряет процесс отбора растений, несущих данные гены. Такой подход для широкого скрининга перспективных форм картофеля является наиболее информативным для их изучения и дальнейшего использования.

Остро стоит проблема преодоления устойчивости к фитофторозу у вновь создаваемых сортов и гибридов. Наличие нескольких *Rpi*-генов одновременно может способствовать сохранению устойчивости [7].

В ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха значительное внимание уделяется оценке и созданию генотипов картофеля с высокой устойчивостью к фитофторозу. В генетической коллекции картофеля сформирована группа образцов (питомник фитофтороустойчивых форм), которые наряду с комплексом хозяйственно ценных признаков характеризуются устойчивостью к фитофторозу на уровне,

сопоставимом с лучшими мировыми стандартами. Многолетнее их изучение по признаку устойчивости к фитофторозу позволило выделить формы, отличающиеся стабильно высоким уровнем этого признака.

Цель работы — выявить перспективные гибриды с высоким уровнем устойчивости к *P. infestans*, используя данные многолетней комплексной оценки генетической коллекции картофеля.

Для осуществления поставленной цели проводили многолетнюю лабораторную оценку фитофтороустойчивости клубней и листьев, скрининг в полевых условиях в отсутствие искусственного заражения, выявление молекулярных маркеров *Rpi*-генов.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Исследования выполнены на базе опытного поля ЭБ «Коренево» ФГБНУ «ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха» (Московская обл., Люберецкий р-н) с 2015 по 2023 год. Агротехника общепринятая, без искусственного орошения. Обработку фунгицидными препаратами не проводили. Материалом для исследований стали гибриды картофеля из генетической коллекции, сформированной в ФИЦ, полученные в ходе реализации собственных селекционных программ.

Ежегодно (начиная с 2015 года) для поддержания коллекции гибриды высаживались однорядковыми 10-клубневыми деланками в однократной повторности по схеме 70 x 30 см с расстоянием между разными образцами 1,5 м.

Оценка и отбор гибридного материала по комплексу хозяйственно полезных признаков и устойчивости проводились в соответствии с методическими указаниями по технологии селекционного процесса картофеля¹, методикой исследований по защите картофеля от болезней, вредителей, сорняков и иммунитету².

Для оценки лабораторной устойчивости наиболее типичные развитые листья собирали со средней части стебля. При искусственном заражении в условиях лаборатории использовали инокулюм, состоящий из 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7...хуз рас фитофтороза. Для заражения готовили суспензию, содержащую 25 конидий (× 120), что соответствует наличию 30–35 тыс. зооспор в 1 мл. Период инфицирования составлял 24 часа.

Первый учет пораженности проводили через трое суток после инокуляции, второй учет — через сутки после предыдущего. Завершали учет на 5–6-е сутки, степень поражения каждого листа оценивали по девятибалльной шкале: 9 — поражение отсутствует (высокая устойчивость), 1 — поражена вся поверхность. При оценке учитывались выраженность развития мицелия и пораженная доля площади листа.

При оценке устойчивости клубней для заражения использовали целые клубни, которые выдерживали в суспензии с концентрацией 20–25 зооспорангий в поле зрения микроскопа (при 120-кратном увеличении) в течение 3 мин. После этого клубни помещали в камеру, в которой поддерживали влажность 80–90% и температуру 18–20 °С. Камеру периодически проветривали. Учет производили на 15-е сутки с момента заражения. Определяли степень поражения поверхности клубня и глубину проникновения некроза путем разреза через пятно. Оценка производилась по девятибалльной шкале с учетом этих двух показателей.

Таблица 1. Критерии визуальной полевой оценки восприимчивости к фитофторозу растений картофеля

Table 1. Criteria for visual field assessment of susceptibility to late blight of potato plants

Балл	Описание
9 баллов	Полное отсутствие признаков поражения фитофторозом
8 баллов	Наличие отдельных пятен
7 баллов	Поражено до ¼ поверхности листьев
5 баллов	Поражено до ½ поверхности
3 балла	Поражена вся поверхность листа

Визуальную полевую оценку наличия и степени поражения растений картофеля фитофторозом проводили в два этапа — при появлении первых признаков болезни на неустойчивых формах и через 7–10 дней после. Руководствовались девятибалльной шкалой (табл. 1).

Картофель сорта Жуковский ранний (восприимчивый) был использован в качестве отрицательного контроля. Картофель сорта Sarpo Mira (устойчивый) использовался в качестве положительного контроля, так как у него подтверждено наличие 5 генов устойчивости к фитофторозу [8].

Выявление молекулярных маркеров генов устойчивости методом ПЦР

В исследовании были использованы ранее опубликованные молекулярные SCAR-маркеры *Rpi*-генов (*R1*, *R2/Rpi-blb3*, *R3a*, *R3b*, *Rpi-blb1* = *Rpi-sto1*) [9–13]. Выделение ДНК в соответствии с методом СТАВ.

ПЦР проводили по стандартному протоколу [9]. Объем реакционной смеси составил 25 мкл. В состав реакционной смеси входили следующие компоненты: однократный буфер, 1 единица активности Taq-полимеразы, 5 mM хлорида магния, 0,25 mM смеси дезоксинуклеотидтрифосфатов, 0,2 μM каждого из праймеров, геномная ДНК. Амплификация производилась в приборе Thermo Fisher (США) при температуре отжига, соответствующей каждой паре праймеров (*R1*, *Rpi-blb1* = *Rpi-sto1* — 65 °С; *R3a*, *R3b* — 64 °С, *R2* — 54 °С).

Разделение ПЦР-продуктов производили методом электрофореза в агарозном геле (концентрация агарозы — 1,5%).

Полученные данные обрабатывали статистически при помощи Microsoft Excel (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Генетически обусловленная высокая устойчивость картофеля к фитофторозу — один из основных критериев подбора исходных родительских форм для скрещиваний и одна из важнейших характеристик сорта. При этом наиболее селекционно ценными являются формы, сохраняющие долговременную устойчивость к патогену в широком диапазоне изменчивости внешних факторов, которые существенно варьируют по годам, во многом определяя развитие растений и реализацию их генетического потенциала.

С 2015 по 2023 год проведена лабораторная оценка устойчивости к фитофторозу 207 образцов из генетической коллекции картофеля. В результате выделен ряд генотипов (31 образец), характеризующихся стабильно высоким проявлением изучаемого признака по годам. Данные их лабораторной оценки по устойчивости листьев и клубней представлены в таблице 2.

¹ Методическими указаниями по технологии селекционного процесса картофеля // Е.А. Симакон, Н.П. Складова, И.М. Яшина. М.: Достижения науки и техники АПК. 2006; 70.

² Методика исследований по защите картофеля от болезней, вредителей, сорняков и иммунитету. М., 1995; 108.

Таблица 2. Лабораторная оценка фитофтороустойчивости листьев и клубней гибридов картофеля по годам
Table 2. Laboratory evaluation of late blight resistance of leaves and tubers of potato hybrids by years

№	Селекционный номер	Происхождение	Лабораторная оценка устойчивости к фитофторозу, балл										
			листья						клубни				
			2015 г.	2016 г.	2017 г.	2021 г.	2022 г.	Средний балл	2015 г.	2016 г.	2021 г.	2022 г.	Средний балл
1	Sarpo mira	76.PO.12.14.268 x D187	8,0	8,0	8,9	4,7	6,7	7,3	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
2	Жуковский ранний	Ягодка x Гидра	н	4,0	н	2,2	5,2	3,8	н	3,0	8,3	3,0	4,8
3	4700-81	Луговской x Русский сувенир	7,8	8,0	9,0	7,4	8,3	8,1	9,0	9,0	8,2	9,0	8,8
4	4691-2	Никулинский x 91.7-26	7,5	7,0	8,8	н	8,5	8,0	9,0	9,0	н	9,0	9,0
5	4700-84	Луговской x Русский сувенир	7,5	8,0	9,0	8,4	6,0	7,8	8,5	8,5	9,0	9,0	8,8
6	2406-39	Никулинский x Петербургский	8,2	8,0	9,0	8,3	5,7	7,8	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
7	2707-12	2308-11 x Rosalind	7,5	8,0	8,3	7,5	7,6	7,8	8,5	8,5	5,6	7,6	7,6
8	2778-45	Никулинский x Аврора	6,5	7,0	н	8,0	8,7	7,7	9,0	9,0	8,2	6,3	8,1
9	2651-6	Никулинский x 1976-36	7,5	7,5	6,0	8,5	9,0	7,7	7,8	7,8	6,0	9,0	7,7
10	2674-8	2374-22 x Русский сувенир	8,0	8,0	9,0	4,2	8,8	7,6	9,0	9,0	н	н	9,0
11	4705-46	Крепыш x Русский сувенир	7,7	7,3	9,0	4,5	8,8	7,4	9,0	9,0	9,0	6,7	8,4
12	2727-29	Герань x Ягодка	8,0	8,0	5,7	н	8,0	7,4	9,0	9,0	9,0	6,3	8,3
13	2775-35	2331-4 x Брянский надежный	н	8,0	8,2	6,2	7,0	7,4	н	9,0	9,0	9,0	9,0
14	2584-29	Никулинский x Аусония	8,0	8,0	6,7	7,3	6,0	7,2	9,0	9,0	9,0	6,3	8,3
15	Русский сувенир	281m-2 x 9к-29	7,0	6,0	8,5	6,0	6,8	6,9	8,8	8,8	6,4	6,3	7,6
16	4609-15	Колобок x Аврора	7,4	7,3	5,8	8,1	6,2	6,9	8,1	8,1	9,0	7,3	8,1
17	4700-82	Луговской x Русский сувенир	8,0	8,0	7,1	5,0	5,5	6,7	8,0	8,0	9,0	5,3	7,6
18	2651-21	Никулинский x 1976-31	5,2	4,3	7,7	7,5	9,0	6,7	8,0	8,0	9,0	н	8,3
19	2791-22	2652-2 x Русский сувенир	6,5	7,0	9,0	2,7	5,2	6,1	8,8	8,8	9,0	6,3	8,2
20	4432-1	92.7-26 x Аврора	7,0	7	5,9	2,0	9,0	6,0	6,0	6,0	8,2	7,6	7,0
21	4676-98	Сказка x 128-6	6,7	7,0	6,7	4,3	5,0	5,9	8,5	8,5	8,2	7,3	8,1
22	2747-25	Вектор x Романо	6,4	6,0	5,6	н	5,1	5,8	1,0	1,0	8,2	7,6	4,5
23	2714-71	Жуковский ранний x Белоусовский	5,0	4,0	8,7	2,7	5,5	5,2	8,4	8,4	5,0	3,6	6,4
24	4428-14	Наяда x 88.17/72	5,5	6,0	н	2,5	6,3	5,1	9,0	9,0	4,6	1,0	5,9
25	350-7	90-15 x Sarpo mira	н	н	8,6	1,5	5,1	5,1	н	н	9,0	9,0	9,0
26	4609-14	Колобок x Аврора	5,5	6,0	6,1	2,3	5,5	5,1	7,6	7,6	9,0	8,3	8,1
27	2587-13	Сиреневый туман x Россиянка	5,0	5,0	н	3,4	6,8	5,0	5,9	5,9	н	7,6	6,5
28	2791-117	2652-2 x Русский сувенир	5,0	5,0	5,1	4,4	5,5	5,0	7,9	7,9	3,0	4,0	5,7
29	2765-11	Василек x 88.34/14	5,3	4,6	5,7	3,7	5,5	4,8	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0
30	2719-15	2714-73 x Кондор	4,4	4,4	5,6	4,0	5,3	4,7	8,0	8,0	6,6	н	7,5
31	323-1	Голубой Дунай x Манифест	н	н	7	3,0	5,5	4,3	н	н	9,0	7,6	8,3

По результатам лабораторного скрининга листьев в группу высокоустойчивых выделены 13 образцов со средней оценкой 7,1–8,0 баллов, 5 образцов отнесены в группу устойчивых с оценкой 6,1–7,0 баллов, среднюю устойчивость с оценкой 5,1–6,0 баллов показали 7 образцов, 6 образцов с оценкой менее 5 баллов — низкоустойчивые или восприимчивые.

Следует отметить, что лабораторная оценка складывается как средняя между двумя учетами. В ходе первого учета оценивается степень проникновения патогена. Спустя 24 часа определяют динамику распространения патогена в растительной ткани [14].

Гибриды с итоговой оценкой менее 5,0 баллов характеризуются средней устойчивостью к проникновению патогена и интенсивным распространением со значительными участками поражения на поверхности листа. При выращивании таких гибридов требуется обработка пестицидами.

Устойчивые и среднеустойчивые генотипы имеют оценку в интервале 5,0–7,0 баллов. На начальном этапе заражения гибриды этой группы имели большую степень проникновения инфекции, но динамика ее дальнейшего распространения была сдержанной.

Высокоустойчивые генотипы демонстрируют реакцию на заражение по типу сверхчувствительности.

Такие гибриды хорошо сопротивляются как проникновению, так и распространению патогена в ткани листа.

Другая важная составляющая характеристики фитофтороустойчивости гибридов — это устойчивость их клубней. Из 32 отобранных по результатам лабораторной оценки листьев образцов 24 имеют высокоустойчивые к фитофторозу клубни (табл. 2). В этом ряду обращают на себя внимание генотипы 27-65-11, 27-19-15, 323-1, которые сочетают низкую устойчивость ботвы (4,8, 4,7, 4,3 балла соответственно) и высокоустойчивые клубни (9,0, 7,5 и 8,3 балла соответственно).

Ранее опубликованные данные показывают, что в ответ на заражение фитофторой в клубнях и листьях активируются различные наборы генов, что говорит об органоспецифической реакции. Тем не менее удалось идентифицировать консервативные паттерны ответной реакции, связанные со стрессом и метаболизмом этилена, общие как для клубней, так и для листьев [15].

Полевая оценка устойчивости ботвы к фитофторозу велась среди генотипов, показавших высокую устойчивость листьев и клубней по результатам лабораторной оценки. Отобранные образцы были охарактеризованы фенотипически по комплексу хозяйственно полезных признаков (табл. 3). У всех генотипов была отмечена

Таблица 3. Хозяйственно-биологическая характеристика генетических источников устойчивости к фитофторозу

Table 3. Economic and biological characteristics of genetic sources of resistance to late blight

Селекци- онный номер	Происхождение	Ягодообразование	Морфологические признаки				Крахмалистость, %	Вкус, балл	Консистенция мякоти	Продуктивность, г/куст (средняя за 2020, 2022 и 2023 гг.)	Устойчивость, балл						
			Форма клубней	Глубина глаза	Окраска кожуры клубня	Цвет мякоти клубня					к фито- фторозу листьев	к вирусам					
												полевая (средняя за 2020, 2022 гг.)	визуальная оценка в поле	ИФА, 2023 г.			
														X	S	Y	L
1	4700-81	Луговской х Русский сувенир	+	ок	8	ф	б	14,5	4,2	муч.	560,0	9,0	6	1	0	0	0
2	4691-2	Никулинский х 91.7-26	+	ок	8	б	б	18,18	–	–	823,0	8,0	8	0	0	0	0
3	4700-84	Луговской х Русский сувенир	–	оо	6	ж	св.-ж	14,1	4,3	воск.	794,3	9,0	7	н	н	н	н
4	2406-39	Никулинский х Петербургский	–	ок	9	б	б	15,4	4,6	муч.	513,4	9,0	7	н	н	н	н
5	2707-12	2308-11 х Розалинда	+	оо	8	ж	б	12,0	3,3	воск.	552,8	9,0	7	0	0	0	0
6	2778-45	Никулинский х Аврора	–	оо	7	б	б	12,9	3,3	воск.	484,3	9,0	7	1	1	0	0
7	2651-6	Никулинский х 1976-36	+	ок	8	ж	б	15,5	3,7	воск.	361,2	9,0	7	0	0	0	0
8	2674-8	2374-22 х Русский сувенир	+	–	–	–	–	22,9	–	–	547,1	9,0	9	0	0	0	0
9	4705-46	Крепыш х Русский сувенир	+	ок	9	б	б	10,3	4,0	воск.	638,1	9,0	6	0	0	0	0
10	2727-29	Герань х Ягодка	–	ок	7	р	св.-ж	14,7	3,0	воск.	472,8	9,0	5	1	0	0	0
11	2775-35	2331-4 х Брянский надежный	+	оо	7	р	б	13,5	3,2	муч.	458,8	9,0	8	н	н	н	н
12	Sarpo mira	76.PO.12.14.268 х D187	–	ов	7	р	б	13,0	4,0	сл. расс.	593,7	9,0	9	0	0	1	0
13	2584-29	Никулинский х Аусония	–	ов	8	ж	б	10,2	4,6	муч.	697,9	8,5	8	н	н	н	н
14	Русский сувенир	281m-2 × 9к-29	–		7		ж	13,1	4,0	муч.	692,7	8,0	7	0	0	0	0

Примечание: форма клубней: ок — округлая, оо — округло-овальная, ов — овальная; ягодообразование: – (минус) отсутствует, + (плюс) присутствует; окраска клубней и мякоти: б — белая, ж — желтая, ф — фиолетовая, св.-ж — светло-желтая, р — розовая.

устойчивость в интервале 8,0–9,0 баллов, что характеризует их как очень высокоустойчивые.

В то же время многими экспериментальными данными оценки гибридных популяций при искусственном заражении отделенных листьев и в полевых условиях в период эпифитотий фитофтороза подтверждается их идентичность [16].

В полевых условиях достоверно оценить фитофтороустойчивость можно только в годы эпифитотий болезни, но и в этом случае возможно получить данные по устойчивости лишь к ограниченному числу распространенных в конкретной местности рас патогена. Условия окружающей среды оказывают значительное влияние — температура, осадки и относительная влажность связаны со степенью воздействия патогена на организм растения в полевых условиях.

Различные расы *P. infestans* могут обладать иными характеристиками в полевых условиях по сравнению с лабораторными. В то же время применение в лабораторных тестах сложного инокулюма, содержащего несколько рас *P. infestans*, в совокупности с идеальной средой для проникновения и распространения инфекции может давать результаты, не сопоставимые с визуальной оценкой в естественных условиях [17].

Отобранные по результатам лабораторной и полевой оценки формы картофеля были протестированы по шести маркерам, определяющим наличие пяти R-генов устойчивости к фитофторозу.

В таблице 4 представлены результаты ДНК маркирования генов устойчивости к фитофторозу.

Маркеры генов *R1*, *R2*, *R3a*, *R3b* ассоциированы с *S. demissum*. Наиболее редкими в изучаемой выборке являются маркеры гена *Rpi-blb1* = *Rpi-sto1* (они отмечены у двух образцов с полевыми номерами 4609-15 и 4609-14) (табл. 5). Оба генотипа имеют общее происхождение и были отобраны в потомстве от скрещивания сортов Колобок и Аврора. Допускается, что

в родословной этих гибридов могут присутствовать дикие виды *S. bulbocastanum* и *S. stoloniferum*, которые, вероятно, являются донорами этих генов. *Rpi-blb1* относят к группе наиболее древних, медленно эволюционирующих генов устойчивости [18].

Ген *Rpi-blb1* рассматривают как ген широкого спектра действия, определяющего высокую нерасспецифическую устойчивость к фитофторозу. Этот ген и его аналоги считаются наиболее перспективными для использования в селекции на устойчивость к фитофторозу. Однако их интрогрессия в селекционный материал сильно затруднена из-за жестких межвидовых барьеров между культурным картофелем и мексиканскими дикими видами картофеля. Введение этого гена в геном *S. tuberosum* успешно осуществляется посредством соматической гибридизации [19]. Наличие этого гена в культурной геноплазме, несомненно, делает его носителей ценными для селекционного использования, хотя и предполагается, что его экспрессия не достигает уровня, наблюдаемого у диких видов — доноров гена.

По количеству ассоциированных с R-генами маркеров получены следующие результаты: 5 генотипов (2584-29, 4700-81, 2778-45, 4609-15, 4691-2) имеют 4 маркера генов устойчивости, 8 генотипов — 3 маркера, 9 генотипов — 2 маркера, 6 генотипов — 1 маркер. У 3 генотипов, включая отрицательный контроль, не было определено ДНК-маркеров.

Наиболее распространенным маркером, выявленным среди изучаемых образцов, является *R3b*. Он присутствует в генотипе 21 гибрида, преимущественно в сочетании с маркерами других генов. *R3b* и *R3a* — расо-специфические гены устойчивости, первоначально идентифицированные у *S. demissum*. Данные гены являются членами сложного локуса R3 на хромосоме XI. При этом гены *R3b* и *R3a* функционально различимы и распознают разные эффекторы. *R3a* относится к быстро эволюционирующим генам [19].

Таблица 4. Наличие маркеров устойчивости к фитофторозу у отобранных коллекционных образцов

Table 4. Presence of markers of resistance to late blight in selected collection samples

Селекционный номер	Происхождение	Маркеры генов устойчивости к фитофторозу					
		R1-1250	R2-686	Blb-820	Rpi-sto-890	R3a-1380	R3b-378
		ген R1	ген R2	ген Rpi-blb1 = Rpi-sto1		ген R3a	ген R3b
Жуковский ранний	Жуковский ранний	-	-	-	-	-	-
4428-14	Наяда х 88.17/72	-	-	-	-	-	+
Сарпо Мира	Сарпо Мира	-	-	-	-	+	+
2587-13	Сиреневый туман х Россиянка	+	-	-	-	+	+
Русский сувенир	Русский сувенир	-	+	-	-	-	+
4700-84	Луговской х Русский сувенир	-	+	-	-	-	-
2714-71	Жуковский ранний х Белоусовский	-	-	-	-	-	-
2584-29	Никулинский х Аусония	+	+	-	-	+	+
2791-22	2652-2 х Русский сувенир	-	+	-	-	-	-
2747-25	Вектор х Романо	+	-	-	-	+	+
2406-39	Никулинский х Петербургский	+	+	-	-	-	+
4676-98	Сказка х 128-6	+	+	-	-	-	-
2765-11	Василек х 88.34/14	+	+	-	-	-	-
4705-46	Крепыш х Русский сувенир	-	+	-	-	-	-
2707-12	2308-11 х Розалинда	-	+	-	-	-	-
2719-15	2714-73 х Кондор	-	-	-	-	-	-
350-7	90-15 х Сарпо мира	+	-	-	-	+	+
4432-1	92.7-26 х Аврора	-	+	-	-	-	-
2727-29	Герань х Ягодка	-	+	-	-	-	+
2775-35	2331-4 х Брянский надежный	-	+	-	-	-	+
4700-81	Луговской х Русский сувенир	+	+	-	-	+	+
4700-82	Луговской х Русский сувенир	-	-	-	-	+	+
2651-21	Никулинский х 1976-31	-	+	-	-	+	+
323-1	Голубой Дунай х Манифест	-	-	-	-	+	+
2778-45	Никулинский х Аврора	+	+	-	-	+	+
4609-14	Колобок х Аврора	-	-	+	+	-	+
4609-15	Колобок х Аврора	+	-	+	+	-	+
2651-6	Никулинский х 1976-36	-	+	-	-	+	+
2791-117	2652-2 х Русский сувенир	-	-	-	-	+	+
2674-8	2374-22 х Русский сувенир	+	+	-	-	-	+
4691-2	Никулинский х 91.7-26	+	+	-	-	+	+

В других исследованиях по генотипированию коллекций картофеля было продемонстрировано, что наличие маркеров генов устойчивости к фитофторозу значительно коррелировало с лабораторной устойчивостью [20–22], что согласуется с полученными данными авторов. Генотипы, несущие по 4 гена, характеризовались высоким уровнем устойчивости к искусственному заражению. Таким образом, сочетание различных генов устойчивости может оказывать аддитивный эффект на горизонтальную устойчивость к *P. infestans* [22].

Уровень устойчивости может быть связан с комбинацией R-генов. Некоторые исследователи отмечают, что наличие маркера гена R1 высоко коррелирует с устойчивостью, в то время как наличие маркеров R2 или R3a не демонстрирует значимых корреляций [22].

Несмотря на наличие маркеров генов устойчивости почти у всех отобранных образцов, всегда можно установить прямую зависимость лабораторной устойчивости листьев и клубней от наличия маркеров *Rpi*-генов и их количества. Так, образцы 2714-71, 2584-29

Таблица 5. Частота встречаемости генотипов в исследуемой выборке

Table 5. Frequency of occurrence of genotypes in the studied sample

Генотип	Количество образцов	Частота встречаемости
R2	5	0,16129032
R3b	1	0,03225806
R1 R2	2	0,06451613
R2 R3b	3	0,09677419
R3a R3b	4	0,12903226
R1 R2 R3b	2	0,06451613
R1 R3a R3b	3	0,09677419
R2 R3a R3b	2	0,06451613
R3b Rpi-blb1 Rpi-sto1	1	0,03225806
R1 R2 R3a R3b	4	0,12903226
R1 Rpi-blb1 Rpi-sto1 R3b	1	0,03225806
Маркеры отсутствуют	3	0,09677419

характеризуются как устойчивые, несмотря на отсутствие соответствующих маркеров. В группе, где выявлен только один маркер генов устойчивости, из 6 образцов 3 были описаны как высокоустойчивые, 2 — устойчивые, 1 — среднеустойчивый. При этом только у среднеустойчивого присутствует ген *R3b*, остальные несут ген *R2*.

Для повышения эффективности отбора в процессе селекции необходимо, чтобы выделенный генетический источник высокого уровня целевого признака (фитофтороустойчивости) не только мог передавать свой высокий уровень наибольшему количеству гибридов, но наряду с этим обладал бы нужным уровнем дру-

гих хозяйственно ценных признаков, то есть он должен быть комплексным. В связи с этим необходимо на этапе предселекции не только отбирать высокоустойчивые к патогену формы, но и на их основе создавать новые генетические источники, которые характеризуются высоким уровнем и стабильностью проявления хозяйственно ценных признаков.

В таблице 3 представлена характеристика выделенных по высокой фитофтороустойчивости форм картофеля по параметрам клубней, продуктивности, содержанию крахмала, органолептическим показателям. Из данных видно, что образцы отличаются высокой вирусостойкостью, средним и высоким содержанием крахмала (более 16%), хорошими вкусовыми качествами клубней.

Селекционная ценность любого генетического источника по-настоящему может быть определена по результатам его использования для создания исходной формы или нового сорта. Получение этой информации требует значительного периода времени — от скрещивания и выращивания сеянцев до конца селекционного цикла.

Выводы/Conclusions

Использование в лабораторных тестах рас фитофтороза, не характерных для полевых популяций данного региона (с учетом возможности потенциальной миграции патогена), позволяет вести отбор устойчивых генотипов на перспективу.

На данном этапе не представляется возможным делать отбор фитофтороустойчивых генотипов, основываясь только на молекулярных маркерах. С одной стороны, необходимо повысить точность такого отбора за счет увеличения количества идентифицируемых генов, с другой — наблюдается большой вклад полигенного контроля устойчивости. Тем не менее сочетание традиционной и молекулярной составляющей оценки позволит пирамидировать гены в одном генотипе.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

С использованием молекулярных маркеров в сочетании с лабораторной и полевой оценкой в рамках данной работы был выделен 31 гибрид, несущий R-гены, отличающийся высокой фитофтороустойчивостью клубней и ботвы и обладающий комплексом хозяйственно полезных признаков. Такие генотипы могут оказаться перспективными для выведения новых сортов картофеля. Они могут быть использованы в различных программах селекции для получения устойчивых к фитофторозу форм.

Таким образом, сформирована коллекционная группа генотипов, гибриды которой наряду с комплексом хозяйственно ценных параметров обладают устойчивостью к фитофторозу на уровне или превышающей лучшие мировые стандарты. Выделившиеся генетические источники высокой устойчивости к фитофторозу рекомендованы для использования в селекции.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха согласно тематическому плану НИР по теме FGGM-2024-0014 «Формирование, изучение и сохранение генетических признаков коллекций картофеля для повышения эффективности селекционного процесса при селекции новых высокопродуктивных сортов с комплексной устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессорам».

FUNDING

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Russian Potato Research Center in accordance with the thematic plan of research on the topic FGGM-2024-0014 "Formation, study and preservation of genetic trait collections of potatoes to improve the efficiency of the breeding process in the selection of new highly productive varieties with complex resistance to biotic and abiotic stressors".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ristaino J.B. Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*. *Microbes and Infection*. 2002; 4(13): 1369–1377. [https://doi.org/10.1016/s1286-4579\(02\)00010-2](https://doi.org/10.1016/s1286-4579(02)00010-2)
- 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>
- Kamoun S. et al. The Top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*. 2015; 16(4): 413–434. <https://doi.org/10.1111/mpp.12190>
- Karki H.S., Halterman D.A. *Phytophthora infestans* (Late blight) Infection Assay in a Detached Leaf of Potato. *Bio-protocol*. 2021; 11(4): e3926 <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.3926>
- Lin X. et al. A potato late blight resistance gene protects against multiple *Phytophthora* species by recognizing a broadly conserved RXLR-WY effector. *Molecular Plant*. 2022; 15(9): 1457–1469. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.07.012>
- Stewart H.E., Bradshaw J.E., Pande B. The effect of the presence of R-genes for resistance to late blight (*Phytophthora infestans*) of potato (*Solanum tuberosum*) on the underlying level of field resistance. *Plant Pathology*. 2003; 52(2): 193–198. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00811.x>
- Paluchowska P., Śliwka J., Yin Z. Late blight resistance genes in potato breeding. *Planta*. 2022; 255(6): 127. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03910-6>
- Blatnik E., Horvat M., Berne S., Humar M., Dolničar P., Meglič V. 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>
- Sokolova 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*. 2011; 9(2): 309–312. <https://doi.org/10.1017/S1479262111000347>
- Kim H.-J. et al. Broad spectrum late blight resistance in potato differential set plants MaR8 and MaR9 is conferred by multiple stacked R genes. *Theoretical and Applied Genetics*. 2012; 124(5): 923–935. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1757-7>
- Wang M., Allefs S., van den Berg R.G., Vleeshouwers V.G.A.A., van der Vossen E.A.G., Vosman B. Allele mining in *Solanum*: conserved homologues of *Rpi-b1b1* are identified in *Solanum stoloniferum*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008; 116(7): 933–943. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0725-3>
- Rietman H. et al. Qualitative and Quantitative Late Blight Resistance in the Potato Cultivar Sarpö Mira Is Determined by the Perception of Five Distinct RXLR Effectors. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2012; 25(7): 910–919. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-12-0010-R>
- Zhu S., Li Y., Vossen J.H., Visser R.G.F., Jacobsen E. Functional stacking of three resistance genes against *Phytophthora infestans* in potato. *Transgenic Research*. 2012; 21(1): 89–99. <https://doi.org/10.1007/s11248-011-9510-1>

REFERENCES

- Ristaino J.B. Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*. *Microbes and Infection*. 2002; 4(13): 1369–1377. [https://doi.org/10.1016/s1286-4579\(02\)00010-2](https://doi.org/10.1016/s1286-4579(02)00010-2)
- 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>
- Kamoun S. et al. The Top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*. 2015; 16(4): 413–434. <https://doi.org/10.1111/mpp.12190>
- Karki H.S., Halterman D.A. *Phytophthora infestans* (Late blight) Infection Assay in a Detached Leaf of Potato. *Bio-protocol*. 2021; 11(4): e3926 <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.3926>
- Lin X. et al. A potato late blight resistance gene protects against multiple *Phytophthora* species by recognizing a broadly conserved RXLR-WY effector. *Molecular Plant*. 2022; 15(9): 1457–1469. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.07.012>
- Stewart H.E., Bradshaw J.E., Pande B. The effect of the presence of R-genes for resistance to late blight (*Phytophthora infestans*) of potato (*Solanum tuberosum*) on the underlying level of field resistance. *Plant Pathology*. 2003; 52(2): 193–198. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.2003.00811.x>
- Paluchowska P., Śliwka J., Yin Z. Late blight resistance genes in potato breeding. *Planta*. 2022; 255(6): 127. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03910-6>
- Blatnik E., Horvat M., Berne S., Humar M., Dolničar P., Meglič V. 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>
- Sokolova 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*. 2011; 9(2): 309–312. <https://doi.org/10.1017/S1479262111000347>
- Kim H.-J. et al. Broad spectrum late blight resistance in potato differential set plants MaR8 and MaR9 is conferred by multiple stacked R genes. *Theoretical and Applied Genetics*. 2012; 124(5): 923–935. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1757-7>
- Wang M., Allefs S., van den Berg R.G., Vleeshouwers V.G.A.A., van der Vossen E.A.G., Vosman B. Allele mining in *Solanum*: conserved homologues of *Rpi-b1b1* are identified in *Solanum stoloniferum*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008; 116(7): 933–943. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0725-3>
- Rietman H. et al. Qualitative and Quantitative Late Blight Resistance in the Potato Cultivar Sarpö Mira Is Determined by the Perception of Five Distinct RXLR Effectors. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2012; 25(7): 910–919. <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-12-0010-R>
- Zhu S., Li Y., Vossen J.H., Visser R.G.F., Jacobsen E. Functional stacking of three resistance genes against *Phytophthora infestans* in potato. *Transgenic Research*. 2012; 21(1): 89–99. <https://doi.org/10.1007/s11248-011-9510-1>

14. Королева А.К., Деревягина М.К., Бирюкова В.А., Поливанова О.Б., Казаков О.Г. Оценка устойчивости перспективных гибридов цветного картофеля к фитофторозу. *Аграрный вестник Урала*. 2024; 24(3): 319–337. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-319-337>
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. Фадына О.А. и др. Упреждающая селекция: использование молекулярных маркеров при создании доноров устойчивости картофеля (*Solanum tuberosum* L.) к фитофторозу на основе сложных межвидовых гибридов. *Сельскохозяйственная биология*. 2017; 52(1): 84–94. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.84rus>
17. Gastelo M., Perez W., Quispe K., Pozo V. Phenotypic Stability and Correlation for Late Blight Resistance in Advanced Potato Clones Under Field and Controlled Conditions. *American Journal of Potato Research*. 2022; 99(2): 150–159. <https://doi.org/10.1007/s12230-022-09861-8>
18. 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>
19. Rakosy-Tican E. et al. Introgression of Two Broad-Spectrum Late Blight Resistance Genes, *Rpi-Blb1* and *Rpi-Blb3*, From *Solanum bulbocastanum* Dun Plus Race-Specific *R* Genes Into Potato Pre-breeding Lines. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 699. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00699>
20. Gebhardt C., Ballvora A., Walkemeier B., Oberhagemann P., Schüller K. Assessing genetic potential in germplasm collections of crop plants by marker-trait association: a case study for potatoes with quantitative variation of resistance to late blight and maturity type. *Molecular Breeding*. 2004; 13(1): 93–102. <https://doi.org/10.1023/B:MOLB.0000012878.89855.df>
21. Соколова Е.А., Бекетова М.П., Хавкин Э.Е. ДНК-маркеры генов *R1* и *R3* как предикторы устойчивости к фитофторозу картофеля. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2010; (5): 15–16. <https://elibrary.ru/lmyvef>
22. Sharma R. et al. Identification of elite potato genotypes possessing multiple disease resistance genes through molecular approaches. *Scientia Horticulturae*. 2014; 179: 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.018>

ОБ АВТОРАХ

Олег Геннадьевич Казаков¹

кандидат сельскохозяйственных наук,
старший научный сотрудник
kazakov-og@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>

Оксана Борисовна Поливанова^{1,2}

кандидат биологических наук, научный сотрудник^{1,2}
polivanovaoks@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3992-5452>

Марина Константиновна Деревягина¹

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
vzeyruk@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>

Виктория Александровна Бирюкова¹

кандидат биологических наук, ведущий сотрудник
vika_biryukova@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7521-6883>

¹Федеральный исследовательский центр картофеля
им. А.Г. Лорха,
ул. Лорха, 23В, дач. пос. Красково, г. о. Люберцы, Московская
обл., 140051, Россия

²Российский государственный аграрный университет — МСХА
им. К.А. Тимирязева,
ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Россия

14. Koroleva A.K., Derevyagina M.K., Biryukova V.A., Polivanova O.B., Kazakov O.G. Resistance assessment of promising colored potato hybrids to late blight. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24(3): 319–337 (in Russian). <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-03-319-337>

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. Fadina O.A. et al. Anticipatory breeding: molecular markers as a tool in developing donors of potato (*Solanum tuberosum* L.) Late blight resistance from complex interspecific hybrids. *Agricultural Biology*. 2017; 52(1): 84–94. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.84eng>

17. Gastelo M., Perez W., Quispe K., Pozo V. Phenotypic Stability and Correlation for Late Blight Resistance in Advanced Potato Clones Under Field and Controlled Conditions. *American Journal of Potato Research*. 2022; 99(2): 150–159. <https://doi.org/10.1007/s12230-022-09861-8>

18. 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>

19. Rakosy-Tican E. et al. Introgression of Two Broad-Spectrum Late Blight Resistance Genes, *Rpi-Blb1* and *Rpi-Blb3*, From *Solanum bulbocastanum* Dun Plus Race-Specific *R* Genes Into Potato Pre-breeding Lines. *Frontiers in Plant Science*. 2020; 11: 699. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00699>

20. Gebhardt C., Ballvora A., Walkemeier B., Oberhagemann P., Schüller K. Assessing genetic potential in germplasm collections of crop plants by marker-trait association: a case study for potatoes with quantitative variation of resistance to late blight and maturity type. *Molecular Breeding*. 2004; 13(1): 93–102. <https://doi.org/10.1023/B:MOLB.0000012878.89855.df>

21. Sokolova E.A., Beketova M.P., Khavkin E.E. DNA markers of the *R1* and *R3* genes as predictors of potato late blight resistance. *Russian Agricultural Sciences*. 2010; 36(5): 334–337. <https://doi.org/10.3103/S1068367410050058>

22. Sharma R. et al. Identification of elite potato genotypes possessing multiple disease resistance genes through molecular approaches. *Scientia Horticulturae*. 2014; 179: 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.09.018>

ABOUT THE AUTHORS

Oleg Gennadievich Kazakov¹

Candidate of Agricultural Sciences,
Senior Research
kazakov-og@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>

Oksana Borisovna Polivanova^{1,2}

Candidate of Biological Sciences, Researcher^{1,2}
polivanovaoks@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3992-5452>

Marina Constantinovna Derevyagina¹

Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher
vzeyruk@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4131-3965>

Victoria Alexandrovna Biryukova¹

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher
vika_biryukova@inbox.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7521-6883>

¹Russian Potato Research Centre,
23B Lorkh Str., Kraskovo village, Lyubertsy, Moscow region, 140051,
Russia

²Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural
Academy,
49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127550, Russia