

УДК 631.527:632.3

ПРИМЕНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МАРКЕРОВ ПРИ ОТБОРЕ ГЕНОТИПОВ КАРТОФЕЛЯ, ОБЛАДАЮЩИХ РЕЗИСТЕНТНОСТЬЮ К ВИРУСАМ И ФИТОФТОРОЗУ

И. О. Газданова*, Н. Н. Догузова

*Федеральный научный центр «Владикавказский научный центр РАН» (ул. Вильямса, 1, с. Михайловское, Пригородный район, Республика Северная Осетия — Алания, Россия, 363110), *Gazdanovaira2020@gmail.com*

Цель исследования – выявление в гибридах картофеля генов, ассоциированных с устойчивостью культуры к основным вирусным заболеваниям и фитофторозу для дальнейшего использования этих гибридов в программе селекции и семеноводства картофеля. Применение маркер-ориентированной селекции (МОС) с использованием ДНК-маркеров позволяет облегчить селекцию сельскохозяйственных растений с комплексной устойчивостью к болезням и вредителям. МОС широко используется для ускорения отбора устойчивых сортов с хорошими агрономическими характеристиками. Для молекулярно-генетического скрининга были взяты гибриды картофеля, которые предварительно оценивались в полевых условиях в соответствии с рекомендациями по селекционному процессу для картофеля на устойчивость к фитопатогенам. Гибриды картофеля получены из селекционного питомника Владикавказского научного центра РАН. Для молекулярного скрининга генотипов картофеля использованы следующие молекулярные ДНК-маркеры: YES3-3A, RYSC3, Ry186, M45, M6, 5Rx1, R1-1205, R3b-378, которые позволяют выявить наличие в геноме гибридных сортов гены устойчивости к вирусам (PVY, PVX) и фитофторозу. На основании молекулярного скрининга выделены гибриды, которые в дальнейшем будут использованы для выведения новых вирусоустойчивых сортов картофеля.

Ключевые слова: картофель; гибрид; гены устойчивости; ДНК; праймер; маркер; фитопатогены; вирусные инфекции; фитофтороз

Для цитирования: Газданова И. О., Догузова Н. Н. Применение молекулярных маркеров при отборе генотипов картофеля, обладающих резистентностью к вирусам и фитофторозу // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 5. С. 90–98. doi: 10.17076/eb2266

I. O. Gazdanova*, N. N. Doguzova. USING MOLECULAR MARKERS IN THE SELECTION OF POTATO GENOTYPES RESISTANT TO VIRUSES AND LATE BLIGHT

Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences (1 Vil'yamsa St., 363110 Mikhailovskoe, Prigorodnyi District, Republic of North Ossetia – Alania, Russia), *Gazdanovaira2020@gmail.com

The aim of this study was to identify genes associated with resistance to major viral diseases and late blight in potato hybrids for subsequent use in potato breeding and seed production programs. Marker-assisted selection (MAS) using DNA markers facilitates the selection of crop plants with comprehensive disease and pest resistance. This method is widely used to accelerate the selection of resistant varieties with good agronomic characteristics. Potato hybrids selected for molecular genetic screening were previously evaluated in the field for resistance to phytopathogens in accordance with potato breeding recommendations. The potato hybrids were obtained from the breeding nursery of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. The following molecular DNA markers were used for molecular screening of potato genotypes: YES3-3A, RYSC3, Ry186, M45, M6, 5Rx1, R1-1205, and R3b-378. These markers allow us to identify the presence of virus- (PVY, PVX) and late blight resistance genes in the genomes of hybrid varieties. As a result of the analysis of resistance to phytopathogens, hybrids were isolated that will be used in the future development of new virus-resistant potato varieties.

Keywords: Potato; hybrid; resistance genes; DNA; primer; marker; phytopathogens; viral infections; late blight

For citation: Gazdanova I. O., Doguzova N. N. Using molecular markers in the selection of potato genotypes resistant to viruses and late blight. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 5. P. 90–98. doi: 10.17076/eb2266

Введение

Одной из важнейших проблем современного растениеводства является поражение сельскохозяйственных культур возбудителями болезней. В основном это грибные, вирусные и бактериальные инфекции, которые приводят к значительному снижению урожая. Картофель, один из важнейших продуктов питания во всем мире, в значительной степени поражается патогенами, снижающими урожайность и качество клубней, поэтому перед селекционерами стоит задача создания устойчивых сортов. Вирусные болезни картофеля широко распространены во всех зонах возделывания картофеля [Макарова и др., 2017; Симаков и др., 2020], и по вредоносности они могут превосходить грибные и бактериальные инфекции. Ежегодно от вирусных болезней мировое картофелеводство в среднем теряет 15–20 % урожая. Накопление вирусной инфекции в семенном материале является важнейшей причиной ухудшения развития растений, снижения урожайности, пищевой ценности, качества и свойств клубней [Burkhanova et al., 2019]. Высокая температура воздуха и недостаточное увлажнение приводят к широкому распростра-

нению вирусных заболеваний. Вирус воздействует на метаболизм растения, заражая его и вызывая симптомы болезней [Sobko et al., 2022]. Наиболее типичными проявлениями вирусных инфекций картофеля являются мозаичность листьев, деформации, хлорозы, некрозы. Высокая вирусная нагрузка может приводить к деформации растения и задержке его роста. Степень проявления симптомов зависит от сорта, вида вируса и времени заражения растения. Обычно заражение происходит на ранней стадии развития. При этом если вторично зараженных растений в посадках менее 10 %, потери урожая будут минимальными [Pourrahim et al., 2007; Kollioroulou et al., 2020].

В настоящее время известно около 40 фитопатогенных вирусов, поражающих картофель в различных регионах и странах с разнообразными природно-климатическими условиями. Из них наиболее вредоносными для Северной Осетии являются вирусы PVX и PVY [Бирюкова и др., 2022].

Патологии, вызванные Y-вирусом (PVY), занимают особое место среди болезней картофеля. Поражение растений этим патогеном может приводить к потере от 10 до 80 % урожая, а при синергическом взаимодействии с другими

вирусами (PVA, PVV, PVX, PLRV) – к практически полной его утрате [Elison et al., 2020]. Высокая патогенность, повсеместная распространенность в мире, а также широкое генетическое разнообразие выделенных изолятов дали основание причислить PVY к группе наиболее опасных вирусных инфекций растений, вызывающих такие заболевания картофеля, как полосчатость, штриховая полосчатость [Ahmadvand et al., 2021].

Ответ растений картофеля на инфекцию PVY в основном характеризуется как гиперчувствительный ответ (HR) и сверхустойчивость (ER). Сверхустойчивость контролируется генами *Ry*, характеризуется широкой, длительной устойчивостью и часто отсутствием видимых симптомов после инокуляции. Напротив, HR (обычно регулируется генами *Ny*) включает локализованную запрограммированную гибель клеток, но может не ограничивать системное вирусное распространение при определенных условиях.

Гены устойчивости к PVY были интрогрессированы в культивируемый картофель от диких и одомашненных видов *Solanum*. Со сверхустойчивостью ассоциированы локусы: *Ry_{adg}* на хромосоме XI; *Ry_{sto}* и *Ry_{fsto}* на коротком плече хромосомы XII и *Ry_{chc}* на хромосоме IX. Остальные пять локусов ассоциированы с гиперчувствительным ответом: *Ny-1* и *Ny-S_{mira}* на хромосоме IX; *Ny-2* на хромосоме XI, *Ny_{tbr}* и *Ny_{spl}* на хромосоме IV. Среди генов *Ry* двумя клонированными членами являются *Ry_{sto}* и *Ry_{chc}*, оба кодируют иммунные рецепторы TIR-NLR (TNL) [Zhang et al., 2026].

Вирус PVX также широко распространен в районах выращивания картофеля. Чаще инфекция PVX протекает бессимптомно, но иногда на листьях появляется слабая пятнистость. Известны многочисленные штаммы вируса X, которые характеризуются различным уровнем патогенности [Fisenko et al., 2022]. Данный вирус способен вызвать такие заболевания, как межжилковая мозаика, крапчатость, верхушечный некроз, обыкновенная мозаика картофеля. Вирус передается контактно, может передаваться почвенными грибами и вредителями. Некоторые некротические штаммы могут вызвать у ряда сортов картофеля потери более чем 50 % урожая. Наиболее вредоносен этот вирус в сочетании с другими вирусами картофеля и вследствие этого является потенциально опасным [Haverkort et al., 2009].

Фитофтороз, одна из основных грибных инфекций, представляет собой серьезную угрозу 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. При благоприятных для патогена условиях надземная часть картофельного растения может полностью погибнуть всего за 1–2 недели. Без применения химических средств защиты растений добиться хорошего урожая практически невозможно. Несмотря на необходимость защиты растений от фитофторы, чрезмерное использование химических фунгицидов может привести к негативным последствиям – ухудшению качества самого картофеля, а также потенциальным рискам для здоровья потребителей, которые могут возникнуть из-за остатков химических веществ на клубнях [Elnahal et al., 2020]. Одним из перспективных подходов к решению проблемы повышения устойчивости картофеля к фитофторозу является применение методов молекулярного маркирования и создания устойчивых сортов [Haverkort et al., 2016].

Современные методы, используемые для определения и обнаружения болезней сельскохозяйственных культур, в значительной степени основаны на визуальной оценке растений (цвет листьев и стеблей). Этот метод действительно важен для диагностики, однако его использование неэффективно для раннего выявления болезней [Beketova et al., 2021]. Раннее точное выявление и диагностика болезней растений являются ключевыми факторами успешного растениеводства и снижения потерь урожая. На текущем этапе развития сельского хозяйства и селекции растений особое внимание уделяется внедрению современных технологий и методов, которые способны значительно улучшить эффективность работы селекционеров. Успех селекции во многом зависит от изучения, подбора и систематизации исходного материала, мобилизации в селекционных программах культурных и дикорастущих видов *Solanum L.* – генетических источников устойчивости, создания на их основе эффективных доноров, а также применения современных биотехнологий, таких как маркер-ориентированная селекция (МОС), основанная на применении ДНК-маркеров [Aguiar et al., 2016]. Она позволяет сократить срок создания сорта, снизить финансовые затраты, сэкономить на трудовых и энергетических ресурсах, уменьшить занимаемые в селекционном процессе посевные площади. На сегодняшний день больше всего диагностических ДНК-маркеров разработано для генов устойчивости к фитофторозу, PVY- и PVX-вирусам [Kasai et al., 2000; Ahmadvand et al., 2013; Sorensen et al., 2023].

Устойчивость к вирусу X контролируется доминантным геном *Rx1*, источником которого является *Solanum andigenum*. *Rx1* картирован на 12-й хромосоме и был охарактеризован на молекулярном уровне. На основе информации о нуклеотидной последовательности *Rx* разработан STS(Sequence Tagged Site)-маркер PVX, сцепленный с *Rx1*. Для выявления генов устойчивости к вирусу PVY были разработаны селекционные маркеры: RYSC3 для гена *Ry_{adg}*, YES3-3A для *Ry_{sto}* и Ry186 для *Ry_{chc}*.

Таким образом, методы МОС представляют собой модифицированный вариант традиционного подхода – комбинационной селекции, усиливая его потенциал благодаря использованию методов точной ДНК-диагностики. Они нашли широкое применение в мировом растениеводстве, в том числе в картофелеводстве, особенно в селекции на устойчивость к фитопатогедам, служат основой для инновационного развития отечественного картофелеводства.

Цель настоящей работы – с помощью молекулярных маркеров выявить в гибридах картофеля на начальном этапе селекции гены, контролирующие резистентность к вирусным и грибным болезням картофеля.

Материалы и методы

В качестве материала использовали 46 гибридных комбинаций картофеля, полученных в результате скрещиваний и отбора устойчивых сортов картофеля к различным фитопатогедам. Для выделения растительной ДНК использовали листья картофеля. ДНК из листьев

картофеля выделяют стандартным методом с использованием 2% СТАВ. Образцы растирали в СТАВ-буфере, гомогенизировали, инкубировали в СТАВ-буфере, очищали хлороформом, осаждали смесью изопропанола и 0,5М ацетата калия, 2 раза промывали 70% спиртом. Полученную ДНК хранили при –20 °С. Амплификацию ДНК проводили в термоциклере MiniAmp Plus (Thermo FS). Электрофорез проводили в горизонтальном 1,5% агарозном геле в буфере TBE с последующей окраской бромистым этидием и визуализацией в УФ-свете. Скрининг селекционного материала на наличие *R*-генов устойчивости к вирусам и фитофторозу осуществляли с использованием следующих ПЦР-маркеров. Для идентификации гена *Ry_{adg}* использовали SCAR-маркеры (Sequence Characterized Amplified Region) – RYSC3, M45, M6 [Song, Schwarzfischer, 2008; Herrera et al., 2018]. Наличие в материале гена *Ry_{sto}* выявляли с помощью STS-маркера YES3-3A [Mori et al., 2012]. Для детекции гена *Ry_{chc}* применяли маркер Ry186 [Rietman et al., 2012].

Использовали внутригенные маркеры R1-1205 и R3b-378, разработанные для генов *R1* и *R3b*. Все маркеры взяты из литературных источников (табл. 1).

Результаты и обсуждение

Молекулярно-генетический скрининг образцов картофеля на *R*-гены, контролирующие устойчивость к PVY-вирусу, выявил 11 гибридов с одним или двумя маркерами (RYSC3, M45

Таблица 1. ДНК-маркеры, используемые для оценки генотипов картофеля

Table 1. DNA markers used for potato genotype evaluation

Ген Gene	Маркер Marker	Размер фрагмента (п. н.) Fragment size (bp)	Температура отжига праймеров (°С) Primer annealing temperature (°C)	Литературный источник Literary source
ДНК-маркеры устойчивости к вирусу PVY DNA markers of resistance to the PVY virus				
<i>Ry_{adg}</i>	RYSC3	321	60	Kasai et al., 2000
<i>Ry_{sto}</i>	YES3-3A	341	55	Song et al., 2008
<i>Ry_{adg}</i>	M45	268	60	Herrera et al., 2018
<i>Ry_{adg}</i>	M6	994	60	Herrera et al., 2018
<i>Ry_{chc}</i>	Ry186	587	55	Mori et al., 2012
ДНК-маркер устойчивости к вирусу PVX DNA marker of resistance to PVX virus				
<i>Rx1</i>	5Rx1	186	62	Ahmadvand et al., 2013
ДНК-маркеры устойчивости к <i>Phytophthora infestans</i> DNA markers of resistance to <i>Phytophthora infestans</i>				
<i>R1</i>	R1-1205	1205	61	Sokolova et al., 2011
<i>R3b</i>	R3b-378	378	64	Rietman et al., 2012

и M6) гена Ry_{adg} : 273c-1, 3254-2, 3267-1, 3278-4, 3244-1, 3195-4, 3195-5, 3190-3, 3208-5, 3235-1 и 3278-5. В исследованных образцах картофеля маркер YES3-3A гена Ry_{sto} и маркер RYSC3 гена Ry_{adg} , контролирующие устойчивость к вирусу PVY, интрогрессированному от аллотетраплоидного вида *S. stoloniferum*, не выявлены. В ходе работы в девяти гибридах картофеля с применением маркера Ry186 был выявлен ген Ry_{chc} (табл. 2).

Маркер 5Rx1 гена $Rx1$ устойчивости к вирусу PVX выявлен у 17 образцов картофеля, которые можно использовать в качестве исходного

ценного материала для дальнейшей гибридизации. Результаты представлены в таблице 2.

Скрининг маркеров генов устойчивости к фитофторозу выявил наличие маркера R3b-378 гена $R3b$ в геноме 35 гибридов и полное отсутствие маркера R1-1205 гена $R1$. Внутригенные маркеры R1-1205 и R3b-378 часто используются для скрининга в молекулярно-генетических программах как за рубежом, так и в России. Эти гены играют ключевую роль в устойчивости растений к фитофторозу, что делает их особенно актуальными для селекционеров [Sokolova et al., 2011].

Таблица 2. Скрининг генотипов картофеля с помощью генетических маркеров устойчивости к фитопатогенам (2024 г.)

Table 2. Screening of potato genotypes with the use of genetic markers of resistance to phytopathogens (2024)

№ п/п No.	Селекционный номер гибрида Hybrid breeding number	Происхождение Origin	YES3-3A / ген/gene Ry_{sto}	RYSC3 / ген/gene Ry_{adg}	M45 / ген/gene Ry_{adg}	M6 / ген/gene Ry_{adg}	Ry186 / ген/gene Ry_{chc}	5Rx1 / ген/gene $Rx1$	R3b-378 / ген/gene $R3b$	R1-1205 / ген/gene $R1$	Общее кол-во R-генов Total number of R-genes
			PVY						PVX	Phytophthora infestans	
1	3273c-1	Ред Скарлетт × Кармен Red Skarlett × Karmen	-	-	+	-	-	+	+	-	3
2	3273c-2	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
3	3273c-3	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
4	3235-1	Сандрин × Лабадиа Sandrin × Labadia	-	-	-	+	-	-	-	-	1
5	3263-1	Чароит × Эльмундо Charoit × El'mundo	-	-	-	-	-	+	+	-	2
6	3290-1	Джувел × Крепыш Dzhuvel × Krepysh	-	-	-	-	+	-	+	-	2
7	3290-2	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
8	3254-1	Сандрин × Мираж Sandrin × Mirazh	-	-	-	-	-	-	+	-	1
9	3254-2	«	-	-	+	+	-	+	-	-	3
10	3264-1	Кармен × Эльмундо Karmen × El'mundo	-	-	-	-	-	-	-	-	0
11	3264-2	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1
12	3267-1	Триумф × Эльмундо Triumf × El'mundo	-	-	+	+	-	-	+	-	3
13	3267-2	«	-	-	-	-	-	-	-	-	0
14	3234-1	Палац × Лабадиа Palats × Labadia	-	-	-	-	+	-	+	-	2
15	3234-2	«	-	-	-	-	-	-	-	-	0
16	3234-3	«	-	-	-	-	-	-	-	-	0
17	3278-4	Аксения × Кармен Akseniya × Karmen	-	-	+	-	-	+	+	-	3
18	3278-5	«	-	-	-	+	+	+	+	-	4
19	3314-1	Ривьера × Гала Riv'era × Gala	-	-	-	-	-	+	+	-	2
20	3244-1	Чароит × Лабадиа Charoit × Labadia	-	-	+	-	+	+	+	-	4
21	3278-2	Аксения × Кармен Akseniya × Karmen	-	-	-	-	+	-	+	-	2

Окончание табл. 2
Table 2 (continued)

№ п/п No.	Селекционный номер гибрида Hybrid breeding number	Происхождение Origin	YES3-3A / ген/gene <i>Ry_{sto}</i>	RYS3 / ген/gene <i>Ry_{adg}</i>	M45/ ген/gene <i>Ry_{adg}</i>	M6/ ген/gene <i>Ry_{adg}</i>	Ry186 / ген/gene <i>Ry_{chc}</i>	5Rx1 / ген/gene <i>Rx1</i>	R3b-378 / ген/gene <i>R3b</i>	R1-1205 / ген/gene <i>R1</i>	Общее кол-во <i>R</i> -генов Total number of <i>R</i> -genes
			PVY						PVX	<i>Phytophthora infestans</i>	
22	3278-3	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1
23	3278-1	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1
24	3195-1	Арктика × Эльбеда Arktika × El'beida	-	-	-	-	+	-	+	-	2
25	3195-2	«	-	-	-	-	-	-	-	-	0
26	3195-3	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
27	3195-4	«	-	-	+	+	-	-	-	-	2
28	3195-5	«	-	-	+	+	-	-	+	-	3
29	3188-1	Ариэль × Феррари Ariel' × Ferrari	-	-	-	-	-	-	+	-	1
30	3188-2	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1
31	3188-3	«	-	-	-	-	-	-	-	-	0
32	3188-4	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1
33	3188-5	«	-	-	-	-	-	-	-	-	0
34	3214c-1	Джувел × Спринтер Dzhuvel × Sprinter	-	-	-	-	-	-	+	-	1
35	3214c-2	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1
36	3190-1	Санibel' × Феррари Sanibel' × Ferrari	-	-	-	-	-	-	+	-	1
37	3190-2	«	-	-	-	-	+	+	+	-	3
38	3190-3	«	-	-	+	-	-	-	+	-	2
39	3190-4	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
40	3233-1	Кибиц × Лабадиа Kibits × Labadia	-	-	-	-	-	+	+	-	2
41	3208-1	Кармен × Капризе Karmen × Kaprize	-	-	-	-	-	+	+	-	2
42	3208-2	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
43	3208-3	«	-	-	-	-	-	+	+	-	2
44	3208-4	«	-	-	-	-	+	-	-	-	1
45	3208-5	«	-	-	+	-	+	-	+	-	3
46	3208-6	«	-	-	-	-	-	-	+	-	1

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

Note. "+" – marker is present; "-" – marker is absent.

Исследования, проведенные с помощью молекулярно-генетического анализа на наличие генов устойчивости среди гибридов картофеля, показали, что использование ДНК-маркеров может существенно повысить эффективность и точность отбора и облегчить работу селекционера. Данные молекулярно-генетического анализа являются информативными, их можно рассматривать в качестве одного из основных критериев при составлении программ по гибридизации картофеля.

Таким образом, молекулярный скрининг позволил охарактеризовать отобранные ранее устойчивые гибриды (по фенотипу) на наличие в их генотипе генетических маркеров устойчивости к вирусам PVX, PVY и фитоторе.

По результатам молекулярного скрининга гибридов из питомника второго года испытания с использованием 8 маркеров 6 генов устойчивости картофеля к патогенам выявлено два ценных генотипа с четырьмя генами устойчивости (3278-5 (Аксения × Кармен), 3244-1 (Чароит × Лабадиа)) и семь генотипов с тремя *R*-генами. Полученные данные будут учитываться в последующей селекционной работе с изученными гибридами.

Заключение

Создание вирусоустойчивых сортов имеет большое значение в связи с тем, что вирусы накапливаются в клубнях и приводят к вырождению

сортов. Особую ценность представляют сорта с групповой устойчивостью к разным видам вирусов, что обусловлено синергическим взаимодействием некоторых из них при смешанной инфекции растений. По результатам молекулярного анализа в гибридах картофеля выявлены две комбинации генов с четырьмя *R*-генами: 3278-5 (Аксения × Кармен), 3244-1 (Чароит × Лабадиа). Наличие в генотипе комбинаций генов устойчивости, вероятно, будет обуславливать большую устойчивость растений картофеля к фитопатогенам. Внедрение этих гибридов в культуру, вероятно, обеспечит высокий урожай картофеля и улучшит качество клубней.

Таким образом, результаты проведенных исследований подчеркивают важность использования молекулярных маркеров в селекции картофеля, что позволяет не только выявлять устойчивые генотипы, но и значительно увеличивать эффективность селекционного процесса.

Литература

- Бирюкова В. А., Жарова В. А., Чалая Н. А., Шмыгля И. В., Рогозина Е. В. Молекулярные маркеры как инструмент в селекции на устойчивость к Y-вирусу картофеля // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022. Т. 23, № 6. С. 777–787. doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.6.777-787
- Макарова С. С., Макаров В. В., Тальянский М. Э., Калинина Н. О. Устойчивость картофеля к вирусам: современное состояние и перспективы // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017. Т. 21, № 1. С. 62–73. doi: 10.18699/VJ17.224
- Симаков Е. А., Анисимов Б. В., Жевора С. В., Митюшкин А. В., Журавлев А. А., Митюшкин А. В., Гайзатулин А. С. Актуальные направления развития селекции и семеноводства картофеля в России // *Картофель и овощи*. 2020. № 12. С. 22–26. doi: 10.25630/PAV.2020.49.70.005
- Aguiar E. R., Olmo R. P., Marques J. T. Virus-derived small RNAs: molecular footprints of host-pathogen interactions // *Wiley Interdiscip. Rev. RNA*. 2016. Vol. 7, no. 6. P. 824–837. doi: 10.1002/wrna.1361
- Ahmadvand R., Javanmard T. H., Mousapour G. A. Biological and molecular screening of some potato cultivars and promising clones for resistance to potato virus X (PVX) // *Seed Plant*. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 63–82.
- Ahmadvand R., Wolf I., Gorji A. M., Polgár Z., Taller J. Development of molecular tools for distinguishing between the highly similar Rx1 and Rx2 PVX extreme resistance genes in tetraploid potato // *Potato Res.* 2013. Vol. 56, no. 4. P. 277–291. doi: 10.1007/s11540-013-9244-y
- Beketova M. P., Chalaya N. A., Zoteyeva N. M., Gurina A. A., Kuznetsova M. A., Armstrong M., Hein I., Drobyszina P. E., Khavkin E. E., Rogozina E. V. Combination breeding and marker-assisted selection to develop late blight resistant potato cultivars // *Agronomy*. 2021. No. 11. Art. 2192. doi: 10.3390/agronomy11112192
- Burkhanova G. F., Sorokan A. V., Cherepanova E. A. Endophytic. Bacillus bacteria with RNase activity in the resistance of potato plants to viruses // *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019. Vol. 23, no. 7. P. 873–878. doi: 10.18699/VJ19.561
- Elison G. L., Hall D. G., Novy R. G., Whitworth J. L. Development and application of a multiplex marker assay to detect PVY resistance genes in *Solanum tuberosum* // *Am. J. Potato Res.* 2020. Vol. 97. P. 289–296. doi: 10.1007/s12230-020-09777-1
- Elnahal A. S. M., Li J., Wang X., Zhou C., Wen G., Wang J., Lindqvist-Kreuzer H., Meng Y., Shan W. Identification of natural resistance mediated by recognition of *Phytophthora infestans* effector gene Avr3aEM in potato // *Front Plant Sci.* 2020. No. 11. Art. 919. doi: 10.3389/fpls.2020.00919
- Fisenko P., Sobko O., Kim I., Matsishina N., Volkov D. Screening of potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) and identification of markers of resistance genes to PVX, PVY, *Globodera pallida* and *Globodera rostochiensis* // *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2021)*. Cham, Switzerland: Springer, 2022. P. 1–8.
- Haverkort A. J., Boonekamp P. M., Hutten R., Jacobsen E., Lotz L. A. P., Kessel G. J. T., Vossen J. H., Visser R. G. F. Durable late blight resistance in potato through dynamic varieties obtained by cisgenesis: scientific and societal advances in the DuRPh project // *Potato Res.* 2016. Vol. 59, no. 1. P. 35–66. doi: 10.1007/s11540-015-9312-6
- Haverkort A. J., Struik P. C., Visser R. G. F., Jacobsen E. Applied biotechnology to combat late blight in potato caused by *Phytophthora infestans* // *Potato Res.* 2009. Vol. 52, no. 3. P. 249–264. doi: 10.1007/s11540-009-9136-3
- Herrera M. D. R., Vidalon L. J., Montenegro J. D., Riccio C., Guzman F., Bartolini I., Ghislain M. Molecular and genetic characterization of the *Ry^{adg}* locus on chromosome XI from Andigena potatoes conferring extreme resistance to potato virus Y // *Theor. Appl. Gen.* 2018. Vol. 131, no. 9. P. 1925–1938. doi: 10.1007/s00122-018-3123-5
- Kasai K., Morikawa Y., Sorri V. A., Valkonen J. P. T., Gebhardt C., Watanabe K. N. Development of SCAR markers to the PVY resistance gene *Ry^{adg}* based on a common feature of plant disease resistance genes // *Genome*. 2000. Vol. 43, no. 1. P. 1–8.
- Kolliopoulou A., Kontogiannatos D., Swevers L. The use of engineered plant viruses in a trans-kingdom silencing strategy against their insect vectors // *Front. Plant Sci.* 2020. Vol. 11. Art. 917. doi: 10.3389/fpls.2020.00917
- Mori K., Mukojima N., Nakao T., Tamiya S., Sakamoto Y., Sohbaru N., Hayashi K., Watanuki H., Nara K., Yamazaki K., Ishii T., Hosaka K. Germplasm release: Saikai 35, a male and female fertile breeding line carrying *Solanum phureja*-derived cytoplasm and potato cyst nematode resistance (*H1*) and Potato virus Y resistance (*Ry^{chc}*) genes // *Am. J. Potato Res.* 2012. Vol. 89. P. 63–72. doi: 10.1007/s12230-011-9221-4
- Pourrahim R., Farzadfar Sh., Golnaraghi A. R., Ahoonmanesh A. Incidence and distribution of important viral pathogens in some Iranian potato fields

// Plant Dis. 2007. Vol. 91. P. 609–615. doi: 10.1094/PDIS-91-5-0609

Rietman H., Bijsterbosch G., Cano L. M., Lee H. R., Vossen J. H., Jacobsen E., Visser R. G., Kamoun S., Vleeshouwers V. G. Qualitative and quantitative late blight resistance in the potato cultivar Sárpo Mira is determined by the perception of five distinct RXLR effectors // Mol. Plant Microbe Interact. 2012. Vol. 25, no. 9. P. 910–919. doi: 10.1094/MPMI-01-12-0010-R

Sobko O. A., Fisenko P. V., Kim I. V., Matsishina N. V. Potato viruses of 7 commercial cultivars grown in field Primorsky Krai of Russia // Vegetable Crops of Russia. 2022; 1:79–85. doi: 10.18619/2072-9146-2022-1-79-85

Sokolova E., Pankin A., Beketova M., Kuznetsova M., Spiglazova S., Rogozina E., Yashina I., Khavkin E. SCAR markers of the R-genes and germplasm of wild *Solanum* species for breeding late blight-resistant potato cultivars // Plant Gen. Res. 2011. Vol. 9, no. 2. P. 309–312. doi: 10.1017/S1479262111000347

Song Y.-S., Schwarzfischer A. Development of STS markers for selection of extreme resistance (Ry_{sto}) to PVY and maternal pedigree analysis of extremely resistant cultivars // Am. J. Potato Res. 2008. Vol. 85. P. 159–170. doi: 10.1007/s12230-008-9012-8

Sorensen P. L., Christensen G., Karki H. S., Endelman J. B. A KASP marker for the potato late blight resistance gene RB/Rpi-blb1 // Am. J. Potato Res. 2023. Vol. 100, no. 3. P. 240–246. doi: 10.1007/s12230-023-09914-6

Zhang Z., Tian R., Wang K., Zhou J., Haoyu S., Wang Z., Jiao G., Du Y., Huang H., Lv D. Pathogenicity, resistance genes and integrated management strategies of potato virus Y in potato // Viruses. 2026. Vol. 18, no. 3. P. 2–14. doi: 10.3390/v18030343

References

Aguiar E. R., Olmo R. P., Marques J. T. Virus-derived small RNAs: molecular footprints of host-pathogen interactions. *Wiley Interdiscip. Rev. RNA*. 2016;7(6): 824–837. doi: 10.1002/wrna.1361

Ahmadvand R., Javanmard T. H., Mousapour G. A. Biological and molecular screening of some potato cultivars and promising clones for resistance to potato virus X (PVX). *Seed Plant*. 2021;37(1):63–82.

Ahmadvand R., Wolf I., Gorji A. M., Polgár Z., Taller J. Development of molecular tools for distinguishing between the highly similar Rx1 and Rx2 PVX extreme resistance genes in tetraploid potato. *Potato Res.* 2013;56(4):277–291. doi: 10.1007/s11540-013-9244-y

Beketova M. P., Chalaya N. A., Zoteyeva N. M., Gurina A. A., Kuznetsova M. A., Armstrong M., Hein I., Drobyazina P. E., Khavkin E. E., Rogozina E. V. Combination breeding and marker-assisted selection to develop late blight resistant potato cultivars. *Agronomy*. 2021; 11:2192. doi: 10.3390/agronomy11112192

Biryukova V. A., Zharova V. A., Chalaya N. A., Shmyglya I. V., Rogozina E. V. Molecular markers as a tool in breeding for resistance to potato Y virus. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2022;23(6):777–787. (In Russ.). doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.6.777-787

Burkhanova G. F., Sorokan A. V., Cherepanova E. A. Endophytic. Bacillus bacteria with RNase activity in the resistance of potato plants to viruses. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(7):873–878. doi: 10.18699/VJ19.561

Elison G. L., Hall D. G., Novy R. G., Whitworth J. L. Development and application of a multiplex marker assay to detect PVY resistance genes in *Solanum tuberosum*. *Am. J. Potato Res.* 2020; 97:289–296. doi: 10.1007/s12230-020-09777-1

Elnahal A. S. M., Li J., Wang X., Zhou C., Wen G., Wang J., Lindqvist-Kreuzer H., Meng Y., Shan W. Identification of natural resistance mediated by recognition of *Phytophthora infestans* effector gene Avr3aEM in potato. *Front Plant Sci.* 2020;11:919. doi: 10.3389/fpls.2020.00919

Fisenko P., Sobko O., Kim I., Matsishina N., Volkov D. Screening of potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) and identification of markers of resistance genes to PVX, PVY, *Globodera pallida* and *Globodera rostochiensis*. *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2021)*. Cham, Switzerland: Springer; 2022. P. 1–8.

Haverkort A. J., Boonekamp P. M., Hutten R., Jacobsen E., Lotz L. A. P., Kessel G. J. T., Vossen J. H., Visser R. G. F. Durable late blight resistance in potato through dynamic varieties obtained by cisgenesis: scientific and societal advances in the DuRPh project. *Potato Res.* 2016;59(1):35–66. doi: 10.1007/s11540-015-9312-6

Haverkort A. J., Struik P. C., Visser R. G. F., Jacobsen E. Applied biotechnology to combat late blight in potato caused by *Phytophthora infestans*. *Potato Res.* 2009;52(3):249–264. doi: 10.1007/s11540-009-9136-3

Herrera M. D. R., Vidalon L. J., Montenegro J. D., Riccio C., Guzman F., Bartolini I., Ghislain M. Molecular and genetic characterization of the Ry_{adg} locus on chromosome XI from Andigena potatoes conferring extreme resistance to potato virus Y. *Theor. Appl. Gen.* 2018;131(9):1925–1938. doi: 10.1007/s00122-018-3123-5

Kasai K., Morikawa Y., Sorri V. A., Valkonen J. P. T., Gebhardt C., Watanabe K. N. Development of SCAR markers to the PVY resistance gene Ry_{adg} based on a common feature of plant disease resistance genes. *Genome*. 2000;43(1):1–8.

Kolliopoulou A., Kontogiannatos D., Swevers L. The use of engineered plant viruses in a trans-kingdom silencing strategy against their insect vectors. *Front. Plant Sci.* 2020;11:917. doi: 10.3389/fpls.2020.00917

Makarova S. S., Makarov V. V., Tal'yanskii M. E., Kalinina N. O. Resistance to viruses of potato: current status and prospects. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(1):62–73. (In Russ.). doi: 10.18699/VJ17.224

Mori K., Mukojima N., Nakao T., Tamiya S., Sakamoto Y., Sohbaru N., Hayashi K., Watanuki H., Nara K., Yamazaki K., Ishii T., Hosaka K. Germplasm release: Saikai 35, a male and female fertile breeding line carrying *Solanum phureja*-derived cytoplasm and potato cyst nematode resistance (H1) and Potato virus Y resistance (Ry_{chc}) genes. *Am. J. Potato Res.* 2012;89:63–72. doi: 10.1007/s12230-011-9221-4

Pourrahim R., Farzadfar Sh., Golnaraghi A. R., Ahoonmanesh A. Incidence and distribution of important viral pathogens in some Iranian potato fields. *Plant Dis.* 2007;91:609–615. doi: 10.1094/PDIS-91-5-0609

Rietman H., Bijsterbosch G., Cano L. M., Lee H. R., Vossen J. H., Jacobsen E., Visser R. G., Kamoun S., Vleeshouwers V. G. Qualitative and quantitative late blight resistance in the potato cultivar Sárpo Mira is determined by the perception of five distinct RXLR effectors. *Mol. Plant Microbe Interact.* 2012;25(9):910–919. doi: 10.1094/MPMI-01-12-0010-R

Simakov E. A., Anisimov B. V., Zhevora S. V., Mityushkin A. V., Zhuravlev A. A., Mityushkin A. V., Gaizatulina A. S. Current trends in the development of potato breeding and seed production in Russia. *Kartofel' i ovoshchi = Potatoes and Vegetables.* 2020;12:22–26. (In Russ.). doi: 10.25630/PAV.2020.49.70.005

Sobko O. A., Fisenko P. V., Kim I. V., Matsishina N. V. Potato viruses of 7 commercial cultivars grown in field Primorsky Krai of Russia. *Vegetable Crops of Russia.* 2022; 1:79–85. doi: 10.18619/2072-9146-2022-1-79-85

Sokolova E., Pankin A., Beketova M., Kuznetsova M., Spiglazova S., Rogozina E., Yashina I., Khavkin E. SCAR markers of the R-genes and germplasm of wild *Solanum* species for breeding late blight-resistant potato cultivars. *Plant Gen. Res.* 2011;9(2):309–312. doi: 10.1017/S1479262111000347

Song Y.-S., Schwarzfischer A. Development of STS markers for selection of extreme resistance ($R_{y_{sto}}$) to PVY and maternal pedigree analysis of extremely resistant cultivars. *Am. J. Potato Res.* 2008;85:159–170. doi: 10.1007/s12230-008-9012-8

Sorensen P. L., Christensen G., Karki H. S., Endelman J. B. A KASP marker for the potato late blight resistance gene RB/Rpi-blb1. *Am. J. Potato Res.* 2023;100(3):240–246. doi: 10.1007/s12230-023-09914-6

Zhang Z., Tian R., Wang K., Zhou J., Haoyu S., Wang Z., Jiao G., Du Y., Huang H., Lv D. Pathogenicity, resistance genes and integrated management strategies of potato virus Y in potato. *Viruses.* 2026;18(3): 2–14. doi: 10.3390/v18030343

Поступила в редакцию / received: 08.12.2025; принята к публикации / accepted: 06.04.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Газданова Ирина Олеговна

канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник
лаборатории молекулярно-генетических
исследований сельскохозяйственных растений

e-mail: Gazdanovaira2020@gmail.com

Догузова Нино Нодаровна

научный сотрудник лаборатории молекулярно-
генетических исследований сельскохозяйственных
растений

e-mail: doguzovanino@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Gazdanova, Irina

Cand. Sci. (Agr.), Senior Researcher

Doguzova, Nino

Researcher