

Оценка устойчивости различных сортов картофеля к возбудителям черной ножки и мягкой гнили*

А. А. ВАСИЛЬЕВА¹, А. Н. ИГНАТОВ², Ф. С.-У. ДЖАЛИЛОВ¹

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127434, Российская Федерация

²Российский университет дружбы народов имени П. Лумумбы, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью комплексной оценки реакции 16 сортов картофеля на заражение тремя видами пектолитических энтеробактерий – возбудителей мокрой гнили и черной ножки картофеля: *Dickeya dianthicola*, *Pectobacterium atrosepticum* и *Pectobacterium brasiliense*. Оценка устойчивости сортов проводили двумя методами – по диаметру зоны мацерации зараженных ломтиков клубней картофеля и по баллу развитию черной ножки на вегетирующих растениях после инъекции в стебель. Сорт Красавчик (НИИХ) наиболее устойчив ко всем трем видам пектолитических энтеробактерий при заражении, как клубней, так и вегетирующих растений. Сорт Жуковский ранний при оценке клубней отнесен к восприимчивым, а при инокуляции патогенов в стебель проявлял устойчивость. На сорте Кумач отмечена специфическая восприимчивость к штамму F004 *Pectobacterium atrosepticum* при инокуляции клубней, а в условиях вегетационных опытов, он проявлял восприимчивость по отношению ко всем трем видам патогенов. Наибольшую агрессивность при инокуляции клубней продемонстрировал штамм вида *Pectobacterium atrosepticum*, в условиях вегетационных опытов – *Dickeya dianthicola*. Наименьшая агрессивность при обоих методах заражения отмечена для штамма *Pectobacterium brasiliense*. Между клубневой и стеблевой устойчивостью сортов картофеля к возбудителям черной ножки и мягкой гнили $(r = 0,248)$ или ранговой $(r = 0,176)$ корреляции, что доказывает необходимость оценки устойчивости сортов картофеля параллельно двумя методами.

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), черная ножка картофеля, мягкая гниль картофеля, *Pectobacterium* spp., *Dickeya* spp., сортовая устойчивость, многофакторный анализ.

Сведения об авторах: А. А. Васильева, младший научный сотрудник (e-mail: annadacyk@rgau-msha.ru); А. Н. Игнатов, доктор биологических наук, профессор (e-mail: an.ignatov@gmail.com); Ф. С.-У. Джалилов, доктор биологических наук, зав. кафедрой (e-mail: labzara@mail.ru).

Для цитирования: Васильева А. А., Игнатов А. Н., Джалилов Ф. С.-У. Оценка устойчивости различных сортов картофеля к возбудителям черной ножки и мягкой гнили // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. №3. С. 10–16. doi: 10.53859/02352451_2024_38_3_10

*исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-317 от 20 апреля 2022 г.). Грант предоставлен в рамках государственной поддержки научного центра «Агротехнологии будущего».

Assessment of the resistance of various potato varieties to blackleg and soft rot pathogens

A. A. Vasilieva¹, A. N. Ignatov², F. S.-U. Dzhalilov¹

¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moskva, 127550, Russian Federation

²RUDN University (Peoples' Friendship University of Russia), ul. Miklukho-Maklaya, 6, Moskva, 117198, Russian Federation

Abstract. The studies were carried out to comprehensively assess the response of 16 potato varieties to infection with three types of pectolytic enterobacteria – the causative agents of soft rot and blackleg of potatoes: *Dickeya dianthicola*, *Pectobacterium atrosepticum* and *Pectobacterium brasiliense*. The resistance of varieties was assessed by two methods – by the diameter of the maceration zone of infected slices of potato tubers and by the score of the development of blackleg on vegetative plants after injection into the stem. The Krasavchik variety (NIKH) was the most resistant to all three types of pectolytic enterobacteria when infecting both tubers and vegetative plants. When assessing tubers, the Zhukovsky early variety was classified as susceptible, but when inoculated with pathogens into the stem it showed resistance. The Kumach variety showed specific susceptibility to *Pectobacterium atrosepticum* strain F004 when inoculating tubers, and under conditions of vegetation experiments, it showed susceptibility to all three types of pathogens. The *Pectobacterium atrosepticum* strain demonstrated the greatest aggressiveness during inoculation of tubers; under the conditions of vegetation experiments – *Dickeya dianthicola*. The least aggressiveness for both methods of infection was observed for the *Pectobacterium brasiliense* strain. There was no significant linear $(r = 0.248)$ or rank $(r = 0.176)$ correlation between the tuber and stem resistance of potato varieties to pathogens, which proves the need to evaluate the resistance of potato varieties in parallel by two methods.

Keywords: potato (*Solanum tuberosum* L.), potato blackleg, potato soft rot, *Pectobacterium* spp., *Dickeya* spp., varietal resistance, multivariate analysis.

Author Details: A. A. Vasilieva, junior research fellow (e-mail: annadacyk@rgau-msha.ru); A. N. Ignatov, D. Sc. (Biol.), prof. (e-mail: an.ignatov@gmail.com); F. S.-U. Dzhalilov, D. Sc. (Biol.), head of department (e-mail: labzara@mail.ru).

For citation: Vasilieva AA, Ignatov AN, Dzhalilov FS-U [Assessment of the resistance of various potato varieties to blackleg and soft rot pathogens]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024;38(3):10–6. Russian. doi: 10.53859/02352451_2024_38_3_10

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – одна из важнейших сельскохозяйственных культур в мире, которая по объему ежегодного производства (378 млн т) занимает второе место после зерновых злаков. Благодаря высокой экологической пластичности и устойчивости к абиотическим стрессам эту культуру выращивают в 160 странах мира, преимущественно в зонах с умеренным климатом [1]. При этом 10...15 % потенциального ежегодного урожая теряется от различных бактериозов. К числу наиболее вредоносных патогенов картофеля относят пектолитические

энтеробактерии, в частности представителей родов *Pectobacterium* spp. и *Dickeya* spp. [2], вызывающих черную ножку и мягкую гниль.

Основные симптомы черной ножки картофеля – некротизация прикорневой части стебля, которая приводит к мягкой гнили паренхимы стебля, поражению сосудистой системы и гибели растения. Кроме того, наблюдается снижение или замедление прорастания зараженных клубней, белесая пятнистость, хлороз и частичное увядание листьев при слабом развитии болезни [3, 4]. Важным источником заражения семенного

материала считают передачу патогенов от материнских растений к клубням нового урожая. Кроме того, бактерии продолжительное время сохраняются в почве [5], особенно в ризосфере растений [6], распространяются поливной водой, насекомыми, нематодами и фитопатогенными почвенными грибами, проникающими в клубни и корни.

До 70 % случаев заражения происходит из-за механического повреждения клубней во время уборки, транспортировки, сортировки, хранения и предпосадочной подготовки картофеля. В период хранения возможна латентная форма течения инфекции [7], которая продолжается до тех пор, пока не установятся благоприятные условия для развития типичных симптомов заболевания и дальнейшей передачи патогенов.

Устойчивость растений и температура играют важную роль в дифференциации патогенности возбудителей мягкой гнили и черной ножки картофеля [8, 9, 10]. Для каждого из видов пектолитических энтеробактерий определен специфический диапазон температур, при которых они развиваются активнее и вызывают заболевание. *Pectobacterium atrosepticum* размножается лучше и более агрессивен при низких температурах (<25 °C), по сравнению с *Dickeya* spp. (>25 °C) [3, 8]. *Pectobacterium brasiliense* более вредоносен в субтропическом климате и в условиях защищенного грунта и, вероятно, чаще находится в латентной форме в условиях умеренного климата [11]. В целом, оптимальные

температуры для развития видов рода *Dickeya* выше, чем для *Pectobacterium* spp., поэтому *Dickeya* шире представлены в сухих тропических и субтропических районах [8, 9]. Термические условия не только влияют на скорость размножения бактерий и вероятность заражения растения, но и определяют экспрессию генов патогенности у бактерий и генов устойчивости у растений, а значит и итог взаимодействия растения и микроорганизма.

На сегодняшний день нет химических средств защиты эффективных против возбудителей черной ножки и мягкой гнили картофеля. Борьба с этими заболеваниями сводится к комплексу профилактических мер, таких как заблаговременная диагностика зараженности посадочного материала [10, 12, 13], своевременная обработка клубней и растений биологическими средствами защиты растений, которые служат антагонистами пектолитических бактерий и повышают устойчивость растений к болезням. Однако, учитывая биологию возбудителей, профилактические меры не могут в полной мере гарантировать защиту растений от заражения [12]. Таким образом, наиболее надежным направлением борьбы с этими патогенами служит селекция сортов картофеля на устойчивость.

Устойчивость к пектолитическим бактериям обнаружена у многих дикорастущих и культурных видов рода *Solanum* [14, 15, 17]. Однако интрогрессия их генов устойчивости в современные коммерческие

Таблица 1. Сорта картофеля, использованные в работе

Сорт	Оригинатор	Группа спелости	Устойчивость по описанию*				Регион допуска**
			к возбу- дителю рака карто- феля	к золотис- той карто- фельной нематоде	к возбудителю фитофтороза		
					по ботве	по клубням	
Айл оф Джура	Cygnnet PB Ltd	среднеранняя	У	У	В	УВ	3
Альвара	Saatzucht Fritz Lange KG	среднеранняя	У	У	УУ	УУ	2, 6
Варяг	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	среднеспелая	У	В	У	У	3, 5
Винета	Europlant Pflanzenzucht GmbH	раннеспелая	У	У	В	УВ	3, 4, 5, 6, 7, 9
Голубизна	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	среднеспелая	У	В	УВ	УВ	3, 4, 5, 6
Жуковский ранний	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	раннеспелая	У	У	В	В	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12
Красавчик	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	среднеранняя	У	В	У	УВ	5
Кумач	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	среднеспелая	У	У	УВ	УВ	3
Невский	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	среднеранняя	У	В	УВ	УВ	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Пламя	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха	среднеспелая	У	У	УВ	УВ	3, 5
Ред Скарлетт	HZPC Holland B.V.	раннеспелая	У	У	УВ	УВ	2, 3, 4, 5, 7, 8, 12
Ривьера	Agrico U.A.	раннеспелая	У	У	В	В	3, 5, 6, 8
Розара	Saka Pflanzenzucht GBR	раннеспелая	У	У	В	УВ	2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12
Снегирь	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха; ФГБУ ИОГЕН РАН им. Н. И. Вавилова	раннеспелая	У	В	УВ	УУ	1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12
Удача	ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха	раннеспелая	У	В	УВ	УУ	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12
Шарвари пирושка	Венгрия	раннеспелая	У	У	УУ	УУ	-

*У – устойчив, УУ – умеренно-устойчив, УВ – умеренно-восприимчив, В – восприимчив;

**1 – Северный, 2 – Северо-Западный, 3 – Центральный, 4 – Волго-Вятский, 5 – Центрально-Черноземный, 6 – Северо-Кавказский, 7 – Средневолжский, 8 – Нижневолжский, 9 – Уральский, 10 – Западно-Сибирский, 11 – Восточно-Сибирский, 12 – Дальневосточный.

сорта картофеля затруднена сложным механизмом наследования признака, связанным с аддитивным взаимодействием генов, расположенных на разных хромосомах [14, 16, 18]. Селекцию на устойчивость осложняет и тот факт, что реакция растений на заражение фитопатогенами, в виде проявления симптомов черной ножки на растениях и развития мягкой гнили на клубнях не всегда коррелирует [19].

Цель исследования – комплексная оценка устойчивости сортов картофеля к мягкой гнили и черной ножке, вызванных тремя основными видами пектолитических энтеробактерий родов *Pectobacterium* и *Dickeya*, для выявления наиболее перспективных для селекции сортов.

Условия, материалы и методы. Исследования проводили в мае-июле 2022–2023 гг. на базе лаборатории защиты растений РГАУ-МСХА, при соблюдении одинаковых условий лабораторных и тепличных экспериментов.

Для искусственного заражения были взяты 3 вида пектолитических бактерий, выделенных из естественно зараженных растений картофеля – *Dickeya dianthicola* (штамм D9) из коллекции лаборатории защиты растений РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, *Pectobacterium atrosepticum* (F004) и *Pectobacterium brasiliense* (F126) из коллекции лаборатории молекулярной биоинженерии Института биоорганической химии имени М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН [20, 21].

В работе использовали семенные клубни 16 сортов картофеля, предоставленные полевой опытной станцией РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, урожая 2021 и 2022 гг. для экспериментов, соответственно, в 2022 и 2023 гг. Информация о их характеристиках (табл. 1) взята из Государственного реестра селекционных достижений (<https://gossortrf.ru/>). Сорт Шарвари пирожка, не прошедший сортоиспытания на территории РФ (по состоянию на март 2024 г.), охарактеризован на основании данных, предоставленных Полевой опытной станцией РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева (<https://www.timacad.ru/about/struktura-universiteta/nauchnye-podrazdeleniya/polevaia-opytnaia-stantsiia>).

При проведении клубневой оценки к мягкой гнили поверхность клубней предварительно дезинфицировали 70 %-ным этанолом, трижды промывали дистиллированной водой, срезали кожуру, клубень разрезали на ломтики толщиной 5 мм. Центр каждого ломтика повреждали несколькими уколами на глубину 2 мм стерильной зубочисткой, предварительно смоченной в бактериальной суспензии патогенов. Затем на его поверхность автоматической пипеткой наносили по 10 мкл инокулюма и помещали ломтики картофеля в стеклянные чашки Петри на увлажненную стерильную фильтровальную бумагу (4 слоя). В качестве инокулюма использовали бактериальную суспензию 16-и часовой культуры, выращенной на среде King B при 28 °C, с оптической плотностью 0,2 при 600 нм, что примерно соответствовало концентрации 10^8 колониеобразующих единиц (КОЕ)/мл. Отрицательный контроль – стерильная вода.

Герметично закрытые пищевой пленкой чашки Петри с ломтиками клубней инкубировали в термостате в течение 120 ч при двух температурах – 13,5 и 22,0 °C. Они были подобраны в предварительных экспериментах, как наиболее дифференцирующие реакцию растений разных сортов к широкому набору штаммов исследу-

емых патогенов. Диаметр зоны мацерации измеряли электронным штангенциркулем каждые 24 ч на протяжении 5 суток. Опыты проводили в 4-х кратной повторности каждого варианта.

Для постановки опытов по оценке устойчивости сортов картофеля на вегетирующих растениях здоровые (проверенные сертифицированными методами ПЦР анализа) семенные клубни всех сортов предварительно проращивали в темноте во влажных опилках в течение 2 недель при температуре 18 °C до появления проростков. Затем, сформировавшиеся проростки укореняли в торфо-перлитовом субстрате («Велторф», Великие Луки, Россия) в пластиковых горшках объемом 0,5 л. Полученные растения выращивали в условиях стеклянной теплицы при температуре 28/22 °C (день/ночь), относительной влажности воздуха 70...75 %, естественном освещении, с ежедневным поливом равными объемами воды. Через 4 недели после укоренения проростков стебли растений инокулировали на высоте 5 см над уровнем почвы путем введения стерильным шприцом с иглой 20 мкл бактериального инокулюма в концентрации 10^8 КОЕ/мл. В качестве контроля использовали стерильную воду. Затем место инокуляции обматывали лабораторной лентой Parafilm M («Amscor», Цюрих, Швейцария) для замедления высыхания инокулюма, как описано ранее [14, 22].

После заражения растения выдерживали трое суток под укрывным материалом спанбонд СУФ-60 («Эксперт», Волоколамск, Россия) для создания повышенной влажности. Учеты развития заболевания проводили 8 раз с 5-го по 31-й день после инокуляции. Степень развития болезни выражали в баллах от 0 до 7, где 0 баллов – отсутствие симптомов заболевания, 1 – пожелтение менее 50 % листьев растения; 2 – пожелтение более 50 % листьев растения; 3 – скручивание листьев; 4 – почернение менее 2 см стебля; 5 – почернение более 2 см стебля; 6 – гниль стебля, частичное увядание; 7 – полное увядание растения.

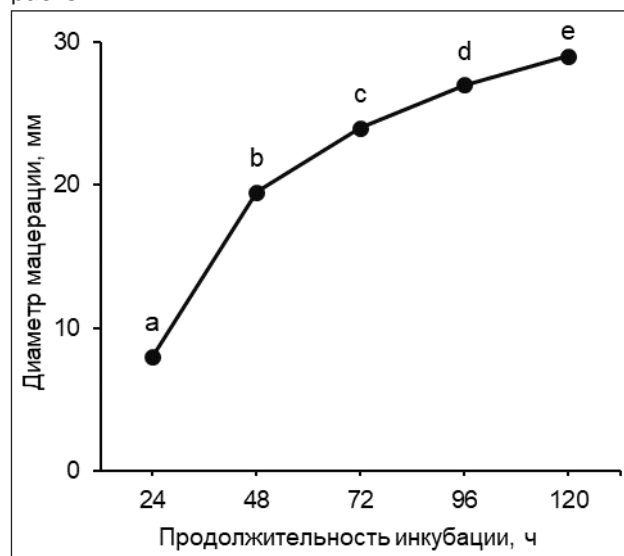


Рис. 1. Динамика развития мягкой гнили на ломтиках картофеля, инокулированных штаммами возбудителей черной ножки в зависимости от продолжительности инкубации, мм (здесь и на рис. 2, 4 буквы означают принадлежность к статистическим группам по критерию Дункана, между точками графика, обозначенными различными буквами, имеются статистически достоверные различия при 95 %-ном уровне вероятности): —●— — среднее значение.

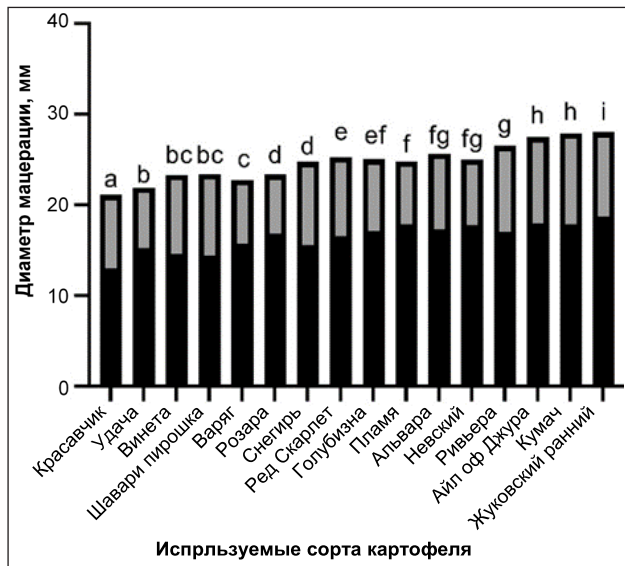


Рис. 2. Диаметры зон мацерации на ломтиках картофеля, инокулированных штаммами возбудителей черной ножки при различных температурах инкубации, мм; температура инкубации, °C: ■ – 13,5; ▒ – 22,0.

Результаты исследований обрабатывали методами корреляционного, факторного и дисперсионного многофакторного анализа (MANOVA) с использованием программы Statistica 12.0 (StatSoft, США). Средние значения сравнивали по критерию Дункана. Значимыми

Таблица 2. Диаметр зоны мацерации ломтиков картофеля, инокулированных пектолитическими энтеробактериями, мм

Штамм	Вид	Статистическая группа по критерию Дункана		
		A	B	C
F126	<i>Pectobacterium brasiliense</i>	19,1		
D9	<i>Dickeya dianthicola</i>		20,8	
F004	<i>Pectobacterium atrosepticum</i>			21,8

считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Действие и взаимодействие всех факторов (вид патогена, сорт, температура, день учета) эксперимента по оценке реакции клубней картофеля разных сортов на мягкую гниль были статистически существенными при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты расчета динамики развития мацерации на инокулированных ломтиках картофеля (рис. 1) свидетельствуют, что в среднем за 24 ч инкубации скорость роста диаметра некроза составила 0,37 мм/ч. При этом максимальное в опыте увеличение его зоны происходило при инкубации от 24 до 48 ч и составляло 0,45 мм/ч. Скорость увеличения диаметра некроза при дальнейшей инкубации с 48 до 120 ч была значительно ниже и составляла 0,14 мм/ч, что свидетельствовало о нецелесообразности продолжительной инкубации при анализе динамики развития мягкой гнили методом инокуляции ломтиков картофеля.

Согласно анализу средних по переменным «сорт» – «температура», диаметры зон мацерации на ломтиках картофеля при температуре инкубации 13,5 °C варьировали от 13,0 до 18,7 мм, при температуре 22 °C – от 21,1 до 28,0 мм (рис. 2). Наименьшие величины этого показателя отмечали на сорте Красавчик, наибольшие – Жуковский ранний, при этом крайние значения были справедливы для обеих температур. Кроме того, следует отметить, что на сорте Жуковский ранний зона некроза при температуре 13,5 °C была на 33,2 % меньше, чем

при температуре 22 °C, на сорте Красавчик эта разница составила 38,4 %. Наименьшая разница (27,5 %) отмечена на сорте Розара, что может свидетельствовать о специфической устойчивости сортов при разных температурах.

Дальнейший анализ средних величин показал, что наименьшей агрессивностью отличался штамм F126 (*P. brasiliense*), только 2 из 16 изучаемых сортов были к нему высоковосприимчивы. У наиболее агрессивного штамма F004 (*P. atrosepticum*) средний диаметр зоны мацерации был на 14 % больше (табл. 2). Кроме того, по рангу реакции пониженную восприимчивость к этому штамму проявили только испытанных 3 сорта. Промежуточное положение занимал штамм D9 (*D. dianthicola*), степень агрессивности которого была в среднем на 9 % выше, чем у штамма F126.

Достоверные различия между штаммами трех видов свидетельствуют о необходимости использования для объективной оценки реакции сортов картофеля к мягкой гнили клубней патогенов различного видового состава.

При анализе взаимодействия переменных «сорт» – «штамм» генотипы были кластеризованы (рис. 3) и разделены по поражаемости на три группы – устойчивые, восприимчивые и средневосприимчивые. Согласно результатам оценки устойчивостью к штамму F004 характеризовались сорта картофеля Красавчик, Варяг и Удача, средней восприимчивостью – сорта Розара, Ривьера и Шарвари пирожка, остальные были отнесены к восприимчивым. К штамму D9 устойчивость проявили сорта Винета, Красавчик и Шарвари пирожка, восприимчивость – Альвара, Голубизна, Айл оф Джера, Ривьера, Жуковский ранний и Кумач, к средневосприимчивым отнесены остальные 6 сортов. Восприимчивость к штамму F126 отмечена у сортов Айл оф Джера и Жуковский ранний, средневосприимчивые – Ред Скарлет, Невский, Пламя и Ривьера, остальные 10 сортов отнесены к устойчивым.

В целом к генотипам с наибольшей устойчивостью к мягкой гнили можно отнести сорта Красавчик и Уда-

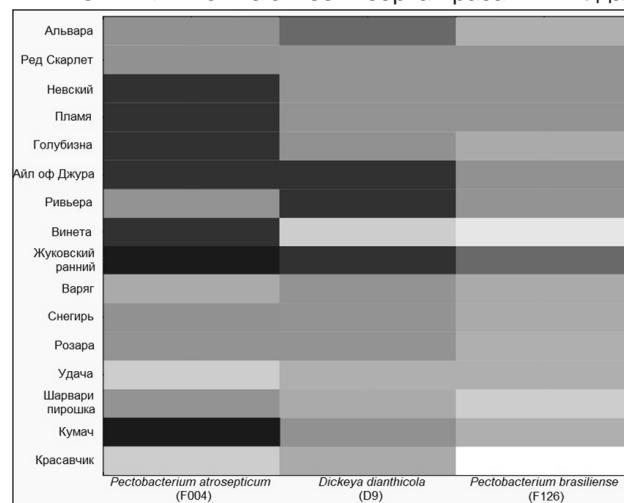


Рис. 3. Кластеризация сортов картофеля по оценке средних значений диаметров зоны мацерации в зависимости от используемого для инокуляции штамма патогена, мм. Диаметры мацерации, мм: ■ – 26, ■ – 24, ▒ – 22, ▒ – 20, ▒ – 18, □ – 16.

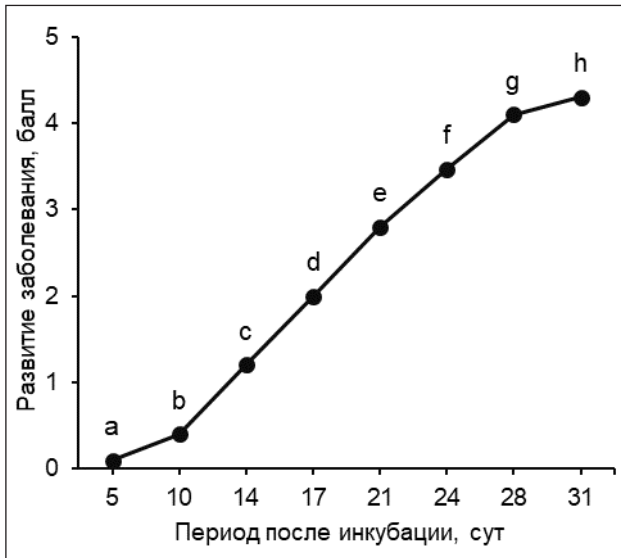


Рис. 4. Динамика развития симптомов черной ножки картофеля с 1 по 30 день после инокуляции, балл: —●— — среднее значение.

ча, в меньшей степени – Шарвари пирожка и Варяг. Наибольшая восприимчивость отмечена на сортах Жуковский ранний и Айл оф Джура. Также следует отметить специфическую восприимчивость к штамму F004 у сортов Кумач и Винета. В среднем по вариантам разница между диаметрами зон мацерации у устойчивого ко всем трем штаммам сорта Красавчик и восприимчивого к ним же сорта Жуковский ранний составляла около 37 %.

По результатам оценки реакции растений разных сортов картофеля к возбудителям черной ножки средний

Таблица 3. Развитие черной ножки картофеля на фоне искусственного заражения различными штаммами патогенов, балл

Штамм	Вид патогена	Статистическая группа по критерию Дункана		
		A	B	C
F126	<i>Pectobacterium brasiliense</i>	2,0		
F004	<i>Pectobacterium atrosepticum</i>		2,3	
D9	<i>Dickeya dianthicola</i>			2,6

балл поражения растений в течение 26 дней наблюдений варьировал в пределах от 0,1 до 4,3 (рис. 4). Наименьшую скорость развития симптомов отмечали в начале опыта с 5-го по 10-й день и в конце эксперимента с 28-го по 31-й день после инокуляции – соответственно 0,08 и 0,1 балла в сутки. Самую высокую скорость развития симптомов наблюдали с 14-й по 17-й день после инокуляции – 0,23 балла в сутки.

Влияние факторов «штамм», «сорт», «день учета» и их взаимодействия на степень поражения растений было статистически достоверным ($p < 0,05$). Фактор «год» и его взаимодействия со всеми перечисленными факторами не оказывали статистически значимого влияния ($p > 0,05$), различия между данными, полученными в 2022 и 2023 гг., были незначительными.

Согласно результатам факторного анализа, проведенного по дням учета, лишь два временных промежутка за всё время учета определяли наибольшую изменчивость полученных данных (75,6 % вариативности). Так, результаты наблюдений, полученные на 21...31 день после заражения определяли 55,3 % изменчивости, а данные собранные на 5...14 день после заражения – 20,3 %.

Высокая корреляционная зависимость между данными, выраженными в баллах поражения в отдельные

дни, была отмечена (от $r = 0,413$ до $r = 0,810$, при уровне значимости $p < 0,05$) только для смежных учетов. Например, коэффициент корреляции между 24-м и 31-м днем измерений составил $r = 0,81$, в то время как между 5-м и 31-м днями – $r = 0,2$. В целом, для отдаленных учетов коэффициент корреляции варьировал от $r = 0,14$ до $r = 0,38$ (при уровне значимости $p < 0,05$).

Последующий анализ средних величин балла поражения свидетельствует о достоверных различиях степени агрессивности трех видов патогена. Наименьшей агрессивностью, как и при анализе ломтиков картофеля, отличался штамм *P. brasiliense* F126 (табл. 3). По спектру поражаемых сортов он также наименее агрессивен, высокая восприимчивость к нему отмечена только у 3 из исследуемых генотипов. Штамм *D. dianthicola* D9 проявлял на 28 % большую агрессивность по отношению к вегетирующим растениям, по сравнению с F126, и оказался на 17 % агрессивнее, чем штамм *P. atrosepticum* F004, который был наиболее вредоносным при заражении клубней.

По результатам оценки взаимодействия переносных «сорт» – «штамм» (рис. 5) высокая восприимчивость к штамму F004 была отмечена для сортов Ривьера, Розара, Кумач, Снегирь, Варяг и Голубизна, относительная устойчивость – для сортов Винета, Жуковский ранний, Ред Скарлет и Красавчик, остальные были среднеустойчивыми. Устойчивость к штамму D9 проявили сорта Красавчик, Ривьера, Жуковский ранний, Пламя, среднеустойчивыми были Розара, Винета, Удача, остальные сорта проявляли восприимчивость к этому штамму. Восприимчивость к штамму F126 отмечали на сортах Голубизна, Кумач и Шарвари пирожка, среднеустойчивыми были Ривьера, Розара, Невский, Варяг и Удача, остальные сорта отнесены к устойчивым.

Наиболее устойчивыми ко всем трем штаммам были сорта Красавчик и Жуковский ранний. Самую высокую восприимчивость продемонстрировали сорта Голубизна и Кумач.

Отмечена специфическая восприимчивость сортов Ривьера и Розара к штамму F004, сортов Невский, Ред Скарлет, Винета – к штамму D9. Штамм F126

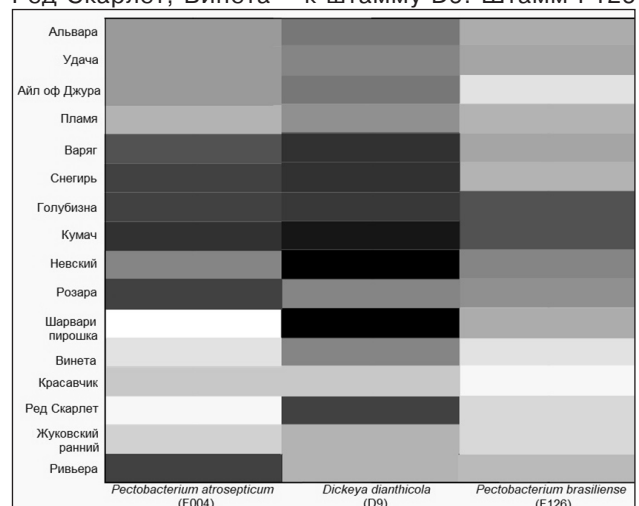


Рис. 5. Кластеризация сортов картофеля по оценке степени поражения черной ножкой картофеля на фоне искусственного заражения различными штаммами патогенов, балл. Развитие заболевания, балл: ■ – 3,1; ■ – 2,6; ■ – 2,1; ■ – 1,6; □ – 1,1.

сильно поражал два универсально восприимчивых сорта Голубизна и Кумач, в то время сорт Шарвари пирожка, характеризовался как устойчивый по отношению к штамму F004 и одновременно восприимчивый для штаммов D9 и F126.

Для оценки согласованности результатов, полученных при исследовании клубневой и стеблевой устойчивости сортов картофеля, были рассчитаны коэффициенты линейной и ранговой корреляции. Коэффициент линейной корреляции, рассчитанный на основе средних диаметров зон мацерации ломтиков картофеля и двухлетних средних баллов развития заболевания на вегетирующих растениях был равен 0,248, при уровне значимости $p < 0,05$. Коэффициент ранговой корреляции, рассчитанный для сформированных по критерию Дункана гомогенных групп средних значений, составил 0,176, при уровне значимости $p < 0,05$. Таким образом, устойчивость картофеля к черной ножке и мягкой клубневой гнили не коррелируют, что требует отдельной оценки для всех сортов.

Результаты оценки поражения клубней картофеля изолятами пектолитических бактерий трех различных видов (*P. carotovorum*, *P. atrosepticum*, *D. solani*), проведенной ранее, свидетельствуют о значительном влиянии вида возбудителя на реакцию сортов на заражение, особенно заметном в диапазоне температур ниже 22 °C [23]. Возможно, высокая частота заражения при низких температурах служит важным фактором распространения латентной инфекции возбудителей мягкой гнили и черной ножки [23].

Выводы. Устойчивость к мягкой гнили клубней, вызванной тремя видами патогенов (*Pectobacterium atrosepticum*, *Pectobacterium brasiliense*, *Dickeya dianthicola*), проявили среднеранний сорт картофеля Красавчик и ранний сорт Удача, в меньшей степени – ранний сорт Шарвари пирожка и среднеспелый сорт Варяг. Восприимчивость к патогенам отмечена у растений сорта Жуковский ранний и среднераннего сорта Айл оф Джур.

Литература.

1. Анисимов Б. В. Мировое производство картофеля: тенденции рынка, прогнозы и перспективы (аналитический обзор) // Картофель и овощи. 2021. № 10. С. 3–8.
2. Стацюк Н. В., Кузнецова М. А. Лабораторные методы оценки устойчивости растений и клубней картофеля к возбудителям черной ножки и мягкой гнили клубней // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 1. С. 111–122.
3. Helias V., Andrivon D., Jouan B. Development of symptoms caused by *Erwinia carotovora* ssp. *atroseptica* under field conditions and their effects on the yield of individual potato plants // Plant Pathology. 2000. Vol. 49. No. 1. P. 23–32.
4. Detection, identification and differentiation of *Pectobacterium* and *Dickeya* species causing potato blackleg and tuber soft rot: a review / R. Czajkowski, M. C. M. Perombelon, S. Jafra, et al. // Annals of Applied Biology. 2015. Vol. 166. No. 1. P. 18–38.
5. Potato tuber origin and microbial composition determines resistance against soft rot *Pectobacteriaceae* / V. Kurm, O. Mendes, J. Gros, et al. // European Journal of Plant Pathology. 2024. Vol. 168. No. 2. P. 383–399.
6. Systemic colonization of potato plants resulting from potato haulm inoculation with *Dickeya solani* or *Pectobacterium parmentieri* / P. Kastelein, M. G. Forch, M. C. Krijger, et al. // Canadian Journal of Plant Pathology. 2021. Vol. 43. No. 1. P. 1–15. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07060661.2020.1777465> (дата обращения: 14.01.2024).
7. Compatible mixture of bacterial antagonists developed to protect potato tubers from Soft Rot caused by *Pectobacterium* spp. and *Dickeya* spp. / D. M. Krzyzanowska, T. Maciag, J. Siwinska, et al. // Plant disease. 2019. Vol. 103. No. 6. P. 1374–1382.
8. Perombelon M., Salmond G. Bacterial soft rots // Prokaryotes. Pergamon: Oxford, 1995. P. 1–20.
9. Liaqat N., Khan M. A., Atiq M. Influence of environmental factors on the development of potato blackleg disease // Applied Ecology & Environmental Research. 2022. Vol. 20. No. 2. P. 1325–1333.
10. Field-scale molecular testing of virulent potato soft rot *Pectobacteriaceae* in Norway / S. Rossmann, M. W. Dees, T. Torp, et al. // European Journal of Plant Pathology. 2020. Vol. 156. P. 501–517.
11. Toth I. K. Microbe profile: *Pectobacterium atrosepticum*: an enemy at the door // Microbiology. 2022. Vol. 168. No. 8. Article 001221. URL: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.001221> (дата обращения: 30.01.2024).
12. Gerayeli N., Baghaee-Ravari S., Tarighi S. Evaluation of the antagonistic potential of *Bacillus* strains against *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and their role in the induction of resistance to potato soft rot infection // European Journal of Plant Pathology. 2018. Vol. 150. No. 4. P. 1049–1063.
13. Белов Г. Л., Зейрук В. Н., Васильева С. В. Бактериальные болезни картофеля и методы их диагностики // Защита и карантин растений. 2016. № 3. С. 30–32.

В условиях вегетационных опытов устойчивость к черной ножке на искусственном инфекционном фоне отмечена у сортов Красавчик и Жуковский ранний, восприимчивость – у среднеспелых сортов Голубизна и Кумач. Специфическая восприимчивость к штамму F004 *Pectobacterium atrosepticum* зафиксирована у сортов Ривьера и Розара, к штамму D9 *Dickeya dianthicola* – у сортов Невский и Ред Скарлет, устойчивость к штамму F004 *Pectobacterium atrosepticum* – у сорта Шарвари пирожка.

Наименьшей агрессивностью среди используемых штаммов патогенов отличался штамм F126 *Pectobacterium brasiliense*. Восприимчивость к нему в вегетационных опытах проявили всего 3 сорта, при клубневой оценке – 2 сорта. Наибольшую агрессивность при инокуляции клубней продемонстрировал штамм F004 *Pectobacterium atrosepticum*, в условиях вегетационных опытов – штамм D9 *Dickeya dianthicola*.

Наибольшую устойчивость к обоим типам поражения проявляет сорт картофеля Красавчик. Сорт Жуковский ранний демонстрирует высокую восприимчивость при оценке клубней и одновременно проявляет устойчивость стеблей. Выявлена специфическая восприимчивость сорта Кумач к штамму F004 *Pectobacterium atrosepticum* при инокуляции клубней, в то время как в вегетационных опытах он был восприимчив ко всем трем штаммам. Сорт Винета обладает специфической восприимчивостью к штамму D9 *Dickeya dianthicola* в вегетационных опытах и к штамму F004 *Pectobacterium atrosepticum* при инокуляции клубней.

При проведении корреляционного анализа не было выявлено линейной ($r = 0,248$, при $p < 0,05$) или ранговой ($r = 0,176$, при $p < 0,05$) зависимости между устойчивостью/восприимчивостью сортов картофеля к мягким гнилям клубней и развитию черной ножки в течение вегетации, что свидетельствует о необходимости оценки устойчивости по каждому из показателей.

14. Introgression and stabilization of *Erwinia* tuber soft rot resistance into potato after somatic hybridization of *Solanum tuberosum* and *S. brevidens* / J. M. McGrath, C. E. Williams, G. T. Haberlach, et al. // *American journal of potato research*. 2002. Vol. 79. P. 19–24.
15. QTL analysis of new sources of resistance to *Erwinia carotovora* ssp. *atroseptica* in potato done by AFLP, RFLP, and resistance-gene-like markers / E. Zimnoch-Guzowska, W. Marczewski, R. Lebecka, et al. // *Crop Science*. 2000. Vol. 40. No. 4. P. 1156–1167.
16. In vitro evaluation of resistant of potato cultivars against black leg disease (*Pectobacterium atrosepticum*) / A. Sima, J. Mozafari, H. Nader, et al. // *Biological Forum—An International Journal*. 2015. Vol. 7. No. 2. P. 1087–1094.
17. Metabolites from wild potato inhibit virulence factors of the soft rot and blackleg pathogen *Pectobacterium brasiliense* / J. R. Joshi, L. Yao, A. O. Charkowski, et al. // *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2021. Vol. 34. No. 1. P. 100–109.
18. QTLs for potato tuber resistance to *Dickeya solani* are located on chromosomes II and IV / R. Lebecka, J. Sliwka, A. Grupa-Urbanska, et al. // *Plant Pathology*. 2021. Vol. 70. No. 7. P. 1745–1756.
19. Taylor D., Charkowski A. O., Zeng Y. Laboratory assays used to rank potato cultivar tolerance to blackleg showed that tuber vacuum infiltration results correlate with field observations // *Plant Disease*. 2021. Vol. 105. No. 3. P. 585–591.
20. *Dickeya dianthicola* – новый для России бактериальный патоген картофеля / А. Н. Карлов, В. С. Зотов, Э. Ш. Пехтерева и др. // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2010. № 3. С. 134–141.
21. Development of qPCR detection assay for potato pathogen *Pectobacterium atrosepticum* based on a unique target sequence / A. A. Lukianova, P. V. Evseev, A. A. Stakheev, et al. // *Plants*. 2021. Vol. 10. No. 2. Article 355. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/355> (дата обращения: 30.01.2024).
22. Comparing inoculation methods for in vitro evaluation of resistance to blackleg disease in potato cultivars / S. Azadmanesh, J. Mozafari, N. Hasanzadeh, et al. // *Genetika*. 2022. Vol. 54. No. 2. P. 705–715.
23. Lebecka R., Flis B., Murawska Z. Comparison of temperature effects on the in vitro growth and disease development in potato tubers inoculated with bacteria *Pectobacterium atrosepticum*, *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* and *Dickeya solani* // *Journal of Phytopathology*. 2018. Vol. 166. No. 9. P. 654–662.

References

1. Anisimov BV. [World potato production: Market trends, forecasts and prospects (analytical review)]. *Kartofel' i ovoshchi*. 2021;(10):3-8. Russian.
2. Statsyuk NV, Kuznetsova MA. [Laboratory methods for assessing the resistance of potato plants and tubers to blackleg and tuber soft rot agents]. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*. 2018;53(1):111-22. Russian.
3. Helias V, Andrivon D, Jouan B. Development of symptoms caused by *Erwinia carotovora* ssp. *atroseptica* under field conditions and their effects on the yield of individual potato plants. *Plant Pathology*. 2000;49(1):23-32.
4. Czajkowski R, Perombelon MCM, Jafra S, et al. Detection, identification and differentiation of *Pectobacterium* and *Dickeya* species causing potato blackleg and tuber soft rot: a review. *Annals of Applied Biology*. 2015;166(1):18-38.
5. Kurm V, Mendes O, Gros J, et al. Potato tuber origin and microbial composition determines resistance against soft rot *Pectobacteriaceae*. *European Journal of Plant Pathology*. 2024;168(2):383-99.
6. Kastelein P, Forch MG, Krijger MC, et al. Systemic colonization of potato plants resulting from potato haulm inoculation with *Dickeya solani* or *Pectobacterium parmentieri*. *Canadian Journal of Plant Pathology [Internet]*. 2021 [cited 2024 Jan 14];43(1):1-15. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07060661.2020.1777465>.
7. Krzyzanowska DM, Maciag T, Siwinska J, et al. Compatible mixture of bacterial antagonists developed to protect potato tubers from Soft Rot caused by *Pectobacterium* spp. and *Dickeya* spp. *Plant disease*. 2019;103(6):1374-82.
8. Perombelon M, Salmond G. Bacterial soft rots. In: *Prokaryotes*. Pergamon: Oxford; 1995. p. 1-20.
9. Liaqat N, Khan MA, Atiq M. Influence of environmental factors on the development of potato blackleg disease. *Applied Ecology & Environmental Research*. 2022;20(2):1325-33.
10. Rossmann S, Dees MW, Torp T, et al. Field-scale molecular testing of virulent potato soft rot *Pectobacteriaceae* in Norway. *European Journal of Plant Pathology*. 2020;156:501-17.
11. Toth IK. Microbe profile: *Pectobacterium atrosepticum*: an enemy at the door. *Microbiology [Internet]*. 2022 [cited 2024 Jan 30];168(8): Article 001221. Available from: <https://www.microbiologyresearch.org/content/journal/micro/10.1099/mic.0.001221>.
12. Gerayeli N, Baghaee-Ravari S, Tarighi S. Evaluation of the antagonistic potential of *Bacillus* strains against *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and their role in the induction of resistance to potato soft rot infection. *European Journal of Plant Pathology*. 2018;150(4):1049-63.
13. Belov GL, Zeiruk VN, Vasil'eva SV. [Bacterial diseases of potato and methods for their diagnosis]. *Zashchita i karantin rastenii*. 2016;(3):30-2. Russian.
14. McGrath JM, Williams CE, Haberlach GT, et al. Introgression and stabilization of *Erwinia* tuber soft rot resistance into potato after somatic hybridization of *Solanum tuberosum* and *S. brevidens*. *American journal of potato research*. 2002;79:19-24.
15. Zimnoch-Guzowska E, Marczewski W, Lebecka R, et al. QTL analysis of new sources of resistance to *Erwinia carotovora* ssp. *atroseptica* in potato done by AFLP, RFLP, and resistance-gene-like markers. *Crop Science*. 2000;40(4):1156-67.
16. Sima A, Mozafari J, Nader H, et al. In vitro evaluation of resistant of potato cultivars against black leg disease (*Pectobacterium atrosepticum*). *Biological Forum—An International Journal*. 2015;7(2):1087-94.
17. Joshi JR, Yao L, Charkowski AO, et al. Metabolites from wild potato inhibit virulence factors of the soft rot and blackleg pathogen *Pectobacterium brasiliense*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2021;34(1):100-9.
18. Lebecka R, Sliwka J, Grupa-Urbanska A, et al. QTLs for potato tuber resistance to *Dickeya solani* are located on chromosomes II and IV. *Plant Pathology*. 2021;70(7):1745-56.
19. Taylor D, Charkowski AO, Zeng Y. Laboratory assays used to rank potato cultivar tolerance to blackleg showed that tuber vacuum infiltration results correlate with field observations. *Plant Disease*. 2021;105(3):585-91.
20. Karlov AN, Zotov VS, Pekhtereva ESh, et al. [*Dickeya dianthicola* is a new bacterial potato pathogen for Russia]. *Izvestiya Timirязevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2010;(3):134-41.
21. Lukianova AA, Evseev PV, Stakheev AA, et al. Development of qPCR detection assay for potato pathogen *Pectobacterium atrosepticum* based on a unique target sequence. *Plants [Internet]*. 2021 [cited 2024 Jan 30];10(2): Article 355. Available from: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/355>.
22. Azadmanesh S, Mozafari J, Hasanzadeh N, et al. Comparing inoculation methods for in vitro evaluation of resistance to blackleg disease in potato cultivars. *Genetika*. 2022;54(2):705-15.
23. Lebecka R, Flis B, Murawska Z. Comparison of temperature effects on the in vitro growth and disease development in potato tubers inoculated with bacteria *Pectobacterium atrosepticum*, *P. carotovorum* subsp. *carotovorum* and *Dickeya solani*. *Journal of Phytopathology*. 2018;166(9):654-62.