

СЕЛЕКЦИЯ, СЕМЕНОВОДСТВО И БИОТЕХНОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ / PLANT BREEDING, SEED PRODUCTION AND BIOTECHNOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.51.21>

УСПЕХИ ГЕНОМНОГО РЕДАКТИРОВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ

Обзор

Дегтярёва В.И.^{1,*}, Долгов С.В.², Мирошниченко Д.Н.³

¹ORCID : 0000-0003-1946-3980;

²ORCID : 0000-0003-1399-3235;

³ORCID : 0000-0003-3975-7484;

^{1,2,3} Филиал Института биоорганической химии им. академиков М. М. Шемякина и Ю. А. Овчинникова РАН, Пущино, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (vlada.buryak[at]gmail.com)

Аннотация

Эффективность и точность подходов редактирования генома растений совершенствуются с каждым годом, благодаря чему значительно расширяются возможности улучшения различных характеристик сельскохозяйственных культур. Картофель – важнейшая овощная и техническая культура, выращиваемая во всех регионах мира. Картофель является вегетативно размножаемым тетраплоидным видом растений с высокой гетерозиготностью, поэтому успешное применение различных систем геномного редактирования, таких как CRISPR/Cas или TALEN, требует множества усилий, времени и соответствующих методологических подходов. За прошедшие десять лет исследования в области редактирования генов картофеля позволили изменить состав крахмала и улучшить качество клубней, повысить устойчивость растений к фитопатогенам, вирусам, гербицидам и абиотическим стрессам. В данном обзоре кратко рассмотрены основные направления и достижения редактирования генов картофеля.

Ключевые слова: геномное редактирование, картофель, CRISPR/Cas9, TALEN.

ADVANCES IN POTATO GENOME EDITING

Review article

Degtyaryova V.I.^{1,*}, Dolgov S.V.², Miroshnichenko D.N.³

¹ORCID : 0000-0003-1946-3980;

²ORCID : 0000-0003-1399-3235;

³ORCID : 0000-0003-3975-7484;

^{1,2,3} The Branch of the M.M. Shemyakin Yu.A. Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Puschino, Russian Federation

* Corresponding author (vlada.buryak[at]gmail.com)

Abstract

The efficiency and accuracy of plant genome editing approaches are improving every year, thus greatly enhancing the potential for improving various crop traits. Potato is the most important vegetable and technical crop grown in all regions of the world. Potato is a vegetatively propagated tetraploid plant species with high heterozygosity, therefore the successful application of different genome editing systems such as CRISPR/Cas or TALEN requires a lot of effort, time and appropriate methodological approaches. Over the past decade, potato gene editing research has led to changes in starch composition and improved tuber quality, increased plant resistance to phytopathogens, viruses, herbicides and abiotic stresses. This review summarizes the main directions and achievements of potato gene editing.

Keywords: genome editing, potato, CRISPR/Cas9, TALEN.

Введение

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) считается важной сельскохозяйственной культурой как в развитых, так и в развивающихся странах. Он широко используется не только для потребления в пищу, но также для промышленной переработки (производство крахмала, спирта и др. фармацевтических субстанций) и рекультивации [1]. Картофель является четвертой сельскохозяйственной культурой по величине валового сбора в мире после кукурузы, риса и пшеницы. Традиционные методы селекции картофеля направлены на повышение урожайности, улучшение пищевой ценности, качества переработки и хранения клубней. Выращивание картофеля сталкивается с рядом проблем, связанных с рядом абиотических стрессов, таких как засуха, засоление, неустойчивая температура, заморозки, эрозия почвы и др. Помимо этого, картофель уязвим примерно к 50-ти различным типам вредителей и болезней, вызываемых вирусами, бактериями, грибами, нематодами и насекомыми, что требует постоянного обновления сортимента [2]. Высокая гетерозиготность и тетраплоидный характер генома картофеля являются немаловажными сдерживающими факторами усилий селекционеров по улучшению картофеля. Для его совершенствования можно использовать не только традиционную селекцию, но и различные биотехнологические подходы, появившиеся в последнее десятилетие, позволяющие ускорить селекционный процесс. К таким подходам относится редактирование генома с помощью различных молекулярно-биологических инструментов, таких как CRISPR/Cas9 системы, а также цинковые пальцы (ZNF) и TALEN нуклеазы [3]. Все они основаны на изменении нуклеотидной последовательности целевых генов на уровне клеток, с дальнейшей регенерацией из них полноценных растений. Обычно генетические конструкции,

несущие последовательности редактирования генома, доставляются в растительные клетки путем генетической трансформации с использованием *Agrobacterium*, бомбардировки частицами и трансфекции протопластов. Подавляющее большинство генетически отредактированных растений (90%) получено путем агробактериальной трансформации [3]. Используя транзientную экспрессию, можно осуществлять редактирование генома без введения в геном растений последовательностей, кодирующих компоненты систем редактирования ДНК.

Первыми растениями, подвергшимися редактированию генома, были сельскохозяйственные культуры – кукуруза, рис и томат, а также модельные растения – табак и Арабидопсис [2]. Первые растения картофеля с отредактированным геномом были получены десять лет назад в 2014 г. [4]. Исследования показывают, что геномное редактирование у полиплоидных видов растений, к которым относится картофель, менее эффективно, так как для полноценного проявления признака необходимо внести мутации во все аллели. Картофель характеризуется недетерминантным типом развития, что позволяет его легко поддерживать путем вегетативного размножения клубнями или черенками в культуре клеток и тканей *in vitro*. Однако при неполном редактировании, когда не удается индуцировать мутации у всех гомеологов, гомозиготные мутанты в дальнейшем можно получить только путем скрещивания, что приводит к потере сортовой специфичности. В данном обзоре рассмотрены различные аспекты и достижения редактирования генома картофеля за десять лет применения этой биотехнологии, направленные не только на совершенствование способов геномного редактирования картофеля, но и на улучшение его различных признаков и свойств.

Доставка инструментов редактирования генов в клетки картофеля

Для успешного применения любого из существующих инструментов редактирования генов важно доставить его в растительные клетки, способные к регенерации. Чаще всего этого можно достичь путем генетической трансформации различных соматических тканей картофеля, таких как листовые экспланты, стеблевые сегменты или клубневые диски с помощью *A. tumefaciens* или *A. rhizogenes*. Также можно использовать ПЭГ- опосредованную трансфекцию или бомбардировку протопластов (Табл. 1). Анализ литературных данных показывает, что в зависимости от используемых методик доставки и ряда сопутствующих условий, эффективность трансформации может отличаться. Например, в исследовании [5] с использованием *A. tumefaciens* для трансформации листовых и стеблевых эксплантов эффективность варьировала от 0 до 19,2% в зависимости от генотипа, при этом индукция побегов из клеток стебля была лучше, чем из клеток листа. По данным различных литературных источников (Табл. 1), эффективность доставки инструментов геномного редактирования в клетки картофеля при использовании *A. rhizogenes* – от 7% до 68,8% [6], тогда как при использовании *A. tumefaciens* может составлять от 0 до 100% [7]. Другой часто используемый метод – ПЭГ-трансфекция протопластов картофеля – позволяет доставлять генетические конструкции с частотой до 39% [8]. Несмотря на более низкую эффективность, ПЭГ-опосредованная трансфекция позволяет осуществлять временную экспрессию инструментов редактирования генов в виде рибонуклеопротеинов (РНП), транскрибированных *in vitro* РНК, а также плазмид [9]. Существуют данные о возможности редактирования генов картофеля бомбардировкой и инфльтрацией комплексов РНП, иммобилизованных на микрочастицах хитозана [10]. Благодаря таким методологическим подходам получаемые растения картофеля не являются трансгенными, поскольку не содержат чужеродных вставок вследствие переноса Т-ДНК из *A. tumefaciens* или *A. rhizogenes*.

Оптимизация методов геномного редактирования картофеля

Первое редактирование генома картофеля осуществлено в 2014 году с использованием системы TALEN. Изменению подвергся ген редуктазы боковой цепи стерола (*SSR2*), ответственной за синтез растительного холестерина и предшественника токсичных стероидных гликоалкалоидов [4], при этом данных об эффективности редактирования не было приведено. В 2015 году сразу в нескольких лабораториях было выполнено геномное редактирование различных сортов картофеля с использованием TALEN и CRISPR/Cas9 систем [8], [11], [12], [13]. С этого времени опубликовано более 37-ми работ, посвященных как методологическим аспектам геномного редактирования, так и целевой модификации генов картофеля, имеющей практическое значение (Табл. 1).

Для разработки эффективных протоколов редактирования картофеля в ряде работ использовали гены-мишени, которые позволяют легко обнаружить фенотипические проявления при наличии мутаций. Так, в нескольких работах были представлены данные об использовании CRISPR/Cas9 и TALEN систем для редактирования гена ацетолактатсинтазы *ALS* (определяет устойчивость к гербициду) с целью выяснения влияния используемой системы экспрессии на эффективность редактирования генов [7], [8], [13], [14]. В другом исследовании ген *ALS* использовали в качестве маркера для выявления успешного нокаута 5'-UTR гена *Ubi7* картофеля после временной экспрессии инструментов редактирования TALEN для создания растений с сайт-специфически интегрированной Т-ДНК [15]. Помимо гена *ALS*, для разработки методологии редактирования генома картофеля использовали ген зеленого флуоресцентного белка *GFP* [16], ген флаванон-3-гидроксилазы *F3H* [17] и ген фитоендесатуразы *PDS* [18], [19]. Так, нокаут гена *PDS* приводит к появлению хлорофилл-дефицитных пятен на листьях или растения становятся полностью альбиносными в результате нарушения функциональной активности фермента фитоендесатуразы, катализирующей ключевую стадию биосинтеза каротиноидов. Нокаут *GFP* в ранее полученных трансгенных растениях, позволил оценить эффективность редактирования за счет изменения флуоресценции клеток [16]. Антоцианы, придающие тканям картофеля красный и фиолетовый цвет, не могут образовываться, если произошел успешный нокаут гена *F3H*, поэтому изменение окраски цветов и клубней (на белый или желтый) служат характеристикой эффективности геномного редактирования, которые легко заметить и оценить во время выращивания [17]. Несмотря на возможность использования указанных и подобных генов для оптимизации процесса геномного редактирования картофеля, большинство исследователей предпочитает оттачивать методические подходы непосредственно на целевых-генах мишенях, имеющих прикладное или научное значение (Табл. 1). Например, обнаружено, что осмотический стресс может увеличить эффективность редактирования генома картофеля методом CRISPR/Cas9, при этом, целевой

модификации подвергался ген *Like3*, фермент которого участвует в катализе определенных этапов метаболизма глюкозинолатов для защиты растений [20].

Таблица 1 - Успехи модификации генов картофеля при использовании различных технологий геномного редактирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.51.21.1>

Год публикации	Способ доставки и тип экспланта	Система редактирования	Цель генетического редактирования	Ген/ы	Ссылка
2014	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> клубневых дисков	TALEN	Изменение метаболизма	SSR2	[4]
2015	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология, изменение метаболизма	IAA2	[11]
2015	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Методология	ALS1	[13]
2015	Трансфекция протопластов	TALEN	Качество клубней	<i>VInv</i>	[12]
2015	Трансфекция протопластов	TALEN	Методология	ALS	[8]
2016	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9 и TALEN	Методология	ALS1	[14]
2016	Трансформация <i>A. tubefaciens</i>	TALEN	Методология	<i>Ubi7, ALS</i>	[15]
2017	Трансфекция протопластов	CRISPR/Cas9	Методология, качество клубней	GBSS	[21]
2017	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> листовых эксплантов	TALEN	Методология, качество клубней	<i>vacINV2 SBE1</i>	[31]
2017	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Устойчивость к абиотическому стрессу	<i>MYB44</i>	[40]
2018	Трансформация <i>A. tubefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология, качество клубней	GBSS	[22]
2018	Трансформация <i>A. rhizogenes</i>	CRISPR/Cas9	Изменение метаболизма	<i>16DOX</i>	[26]
2018	Трансфекция протопластов	CRISPR/Cas9	Методология, качество	GBSS	[9]

			клубней		
2018	Бомбардировка и вакуумная инфильтрация меристем	CRISPR/Cas9	Методология	<i>COIL</i>	[10]
2018	Бомбардировка и вакуумная инфильтрация меристем	CRISPR/Cas9	Методология	<i>PDS</i>	[18]
2019	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля	TALEN	Изменение метаболизма, качество клубней	<i>SSR2</i>	[27]
2019	Трансфекция протопластов	CRISPR/Cas9	Методология, качество клубней	<i>GBSS</i>	[23]
2019	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология	<i>ALS</i>	[7]
2020	Трансфекция протопластов	CRISPR/Cas9	Качество клубней	<i>PPO2</i>	[33]
2021	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология, качество клубней	<i>PPO1</i> <i>PPO2</i> <i>vacINV1</i> <i>BAM1</i>	[32]
2021	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Устойчивость к биотическим стрессам	<i>MLO1</i> <i>HDS</i> <i>TTM2</i> <i>DND1</i> <i>CHL1</i> <i>DMR6-1</i> <i>DMR6-2</i>	[38]
2022	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Устойчивость к биотическим стрессам	<i>eIF4E</i>	[35]
2022	Трансфекция протопластов	CRISPR/Cas9	Устойчивость к биотическим стрессам	<i>eIF4E</i>	[36]
2022	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология	<i>GFP</i>	[16]
2022	Трансформация <i>A. rhizogenes</i> листовых эксплантов и сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология	<i>HLH47</i>	[6]
2022	Трансформация <i>A. tumefaciens</i>	CRISPR/Cas13	Устойчивость к биотическим	<i>PI, HC-Pro, P3, CI1, CI2, VPg</i>	[37]

	сегментов стебля		стрессам		
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Устойчивость к биотическим стрессам	<i>NRL1</i>	[39]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Методология	<i>PDS</i>	[19]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля и листьев	CRISPR/Cas9	Методология, качество клубней	<i>GBSS</i>	[5]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Методология, качество клубней	<i>GBSS SBE</i>	[24]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Качество клубней	<i>FtsZ1</i>	[25]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	TALEN	Методология, изменение метаболизма	<i>SSR2</i>	[28]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> сегментов стебля	CRISPR/Cas9	Методология, изменение метаболизма	<i>Like3</i>	[20]
2023	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Качество клубней	<i>VInv AS1</i>	[30]
2024	Трансфекция протопластов	CRISPR/Cas9	Методология	<i>F3H</i>	[17]
2024	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Устойчивость к абиотическим стрессам	<i>DMR6-1</i>	[41]
2024	Трансформация <i>A. tumefaciens</i> листовых эксплантов	CRISPR/Cas9	Качество клубней	<i>Pain-1 (VInv1)</i>	[29]

В настоящее время большая часть работ, посвященных геномному редактированию картофеля выполнена с использованием системы CRISPR/Cas9 (Табл.1). В 30-ти известных нам работах для индукции мутаций использовали CRISPR/Cas9, тогда как только в 8-ми исследованиях для этого применяли систему TALEN, что является следствием того, что эффективность последней обычно ниже, при этом конструирование TALEN инструментов более трудоемко. Что касается типа экспланта, используемого для получения геномно отредактированных регенерантов картофеля, то листовые и стеблевые сегменты растений *in vitro* используются в одинаковой мере, часто (Табл.1) в зависимости от

предпочтений в той или иной лаборатории. Только в исключительных случаях для этого использовали меристемы [18], [10] или клубневые диски [4].

Основные направления редактирования генов картофеля

Поскольку основной целью культивирования картофеля является получение клубней, то модификация признаков, так или иначе связанных с клубнями, является одним из главных направлений геномного редактирования. Анализ литературы показывает, что изменению состава крахмала и размера крахмальных гранул, содержанию гликоалкалоидов, а также улучшению ряда послеуборочных признаков, таких как побурение или холодовое пожелтение, уделялось особое внимание (Табл. 1). Целый ряд исследований посвящен редактированию генов, вовлеченных в биосинтез крахмала, в частности гранул связанной синтазы GBSS и крахмал-ветвящего фермента SBE. Так, нокаут генов GBSS в ряде исследований [5], [9], [21], [24] позволил получить картофель, не содержащий амилозу (разновидность крахмала) в клубнях. Такой картофель, содержащий только разновидность крахмала амилопектин, может найти промышленное применение для производства бумаги, клея, текстиля и биопластиков, а также позволит получать больше этанола без дополнительных затрат. Размер крахмальных зерен имеет значение при переработке и хранении клубней. Показано, что гранулы крахмала меньшего размера разлагаются быстрее, тогда как клубни с большими гранулами крахмала, более подходят для длительного хранения. В работе [25] путем индуцирования мутаций в гене тубулиноподобной ГТФазы *FtsZ1*, контролирующего деление пластид, из-за нарушения деления и образования «макропластид», были получены растения, содержащие в клубнях крахмальные гранулы большего размера.

Поскольку картофель относится к семейству Пасленовых, в большинстве его тканей накапливаются стероидные гликоалкалоиды α -соланин и α -чаконин, которые придают горький вкус и токсичны для человека при больших концентрациях. Одной из групп исследователей удалось снизить в клетках картофеля содержание гликоалкалоидов благодаря нокауту 2-оксоглутарат-зависимой диоксигеназы (*16DOX*), которая катализирует 16 α -гидроксилирование (22S)-22,26-дигидроксихолестерина на более поздней стадии биосинтеза гликоалкалоидов [26]. В другом исследовании уровень токсичных метаболитов (соланин и чаконин) был значительно понижен в клубнях картофеля благодаря нокауту гена редуктазы боковой цепи стерола *SSR2* [27], [28].

Клубни растений, у которых были внесены мутации в последовательность гена вакуолярной инвертазы (*VInv*, *Pain-1*), демонстрировали низкий уровень редуцирующих сахаров, образующихся в результате длительного холодового хранения, что позволяет снизить потемнение картофельных чипсов во время жарки и понизить содержание в них акриламида [12], [29], [30], [31]. С этой же целью были внесены мутации в ген вакуолярной амилазы (*VAM1*), однако данные об улучшении качества клубней пока не были представлены [32]. Недавнее мультиплексное редактирование генов, кодирующих аспарагинсинтазу 1 (*AS1*) также продемонстрировало возможность существенно снизить окрашивание картофельных чипсов и содержание акриламида после жарки благодаря значительному уменьшению содержания глюкозы и фруктозы в длительно хранящихся клубнях [30].

Серьезной проблемой, как для производителей, так и для потребителей картофеля является ферментативное потемнение тканей, которое происходит при разрезании клубней, а также при их повреждении во время сбора урожая, и послеуборочных операций, таких как транспортировка, хранение и сортировка. Сейчас этот нежелательный процесс контролируется на производстве с помощью химических или физических агентов. В настоящий момент опубликованы работы, в которых с помощью системы CRISPR/Cas9 внесли мутации в гены, кодирующие ферменты полифенолоксидазы (*PPO1* и *PPO2*), участвующие в потемнении тканей картофеля [32]. Благодаря индукции нокаутных мутаций во всех четырех аллелях гена *PPO2* удалось снизить ферментативное потемнение клубней на 73% [33].

В работах, направленных на улучшение агрономических свойств растений картофеля, повышение устойчивости к различным абиотическим и биотическим стрессам также является важной темой для исследований. Существует ряд публикаций, в которых различные инструменты редактирования генов использовали для повышения устойчивости растений к вирусам, раннему и позднему фитофторозу картофеля, а также устойчивости к солевому и осмотическому стрессу (Табл. 1).

Вирус *Y* картофеля (PVY), относящийся к семейству Потивирусов, распространен по всему миру, имеет широкий круг хозяев, включающий культивируемые виды пасленовых и множество сорняков, и является одним из самых вредоносных патогенов картофеля, наносящих серьезный ущерб при возделывании, а также в семеноводческих хозяйствах [34]. Известно, что данный РНК-геномный фитовирус использует для репликации и размножения эукариотический комплекс инициации трансляции клеточного хозяина 4F (eIF4F), поэтому индукция мутаций во всех аллелях гена *eIF4E*, входящего в этот комплекс, позволила предотвратить распространение инфекции и существенно повысить устойчивость растений к штаммам PVY^O и PVY^{NTN} [35], [36]. Помимо внесения мутаций в гены картофеля, предложена стратегия внесения в геном картофеля CRISPR/Cas13 инструментов, направленных на нокаут нескольких генов вируса *Y*, что позволило получить трансгенные растения, устойчивые к заражению штаммами PVY^N, PVY^O, и PVY^{NTN} [37]. Также, было показано, что внесение мутаций в белок коэлин, может повысить устойчивость [10].

Фитофтороз – самое серьезное грибное заболевание картофеля во всем мире, вызываемое оомицетом *Phytophthora infestans*. В одном из исследований функциональный нокаут двух из семи предполагаемых генов чувствительности к патогену *StDMR6-1* и *StCHL1* привел к уменьшению очагов поражения листьев картофеля фитофторозом [38]. В другом исследовании получены неоднозначные результаты, поскольку мутантные линии с четырехаллельным нокаутом гена *StNRL1*, демонстрируя повышение устойчивости к *P. infestans*, оказались восприимчивы к другому патогену, *Alternaria alternata* [39].

Что касается исследований связанных с устойчивостью растений картофеля к абиотическому стрессам, то еще в одной из первых работ по геномному редактированию картофеля была предпринята попытка нокаутировать ген транскрипционного фактора *MYB44*, регулирующего транспорт фосфатов, подавляя экспрессию *PHOSPHATE1* в

картофеле [40]. В недавней работе, растения картофеля у которых были индуцированы мутации в гене *DMR6-1* проявляли большую толерантность к засоленным условиям и поддерживали более высокую скорость роста по сравнению с контрольным генотипом [41].

Заключение

Исследования, связанные с геномным редактированием картофеля, проводятся всего десять лет. За этот короткий срок выявлены и исследованы факторы, влияющие на эффективность геномного редактирования картофеля, а также продемонстрирована возможность получения растений с измененными генами, не несущими вставки последовательностей инструментов геномного редактирования. Уже получены экспериментальные линии картофеля с повышенной устойчивостью к действию биотических и абиотических стрессовых факторов, а также с улучшенными свойствами клубней. С каждым годом растет число новых работ, адресованных методологическим и практическим аспектам применения систем геномного редактирования картофеля. Их дальнейшее развитие открывает широкие перспективы совершенствования картофеля с целью получения высокопродуктивных сортов обладающих востребованными качествами клубней.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-14-00118.

Funding

Supported by the Russian Science Foundation, project № 22-14-00118.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Dolničar P. Importance of Potato as a Crop and Practical Approaches to Potato Breeding / P. Dolničar // *Methods in Molecular Biology*. — 2021. — № 2354. — P. 3–20. — DOI: 10.1007/978-1-0716-1609-3_1.
2. Lahlali R. Editorial: Perspective challenges for applied research in potato pathogens: From molecular biology to bioinformatics / R. Lahlali, G. Gachara, G. Özer [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. — 2023. — № 14. — DOI: 10.3389/fmicb.2023.1140107.
3. Мирошниченко Д.Н. Достижения, проблемы и перспективы получения нетрансгенных растений с отредактированным геномом / Д.Н. Мирошниченко, О.А. Шульга, В.Р. Тимербаев [и др.] // *Биотехнология*. — 2019. — № 35. — DOI: 10.21519/0234-2758-2019-35-1-3-26.
4. Sawai S. Sterol Side Chain Reductase 2 Is a Key Enzyme in the Biosynthesis of Cholesterol, the Common Precursor of Toxic Steroidal Glycoalkaloids in Potato / S. Sawai, K. Ohyama, S. Yasumoto [et al.] // *The Plant Cell*. — 2014. — № 26. — P. 3763–3774. — DOI: 10.1105/tpc.114.130096.
5. Abeuova L. CRISPR/Cas9-mediated multiple guide RNA-targeted mutagenesis in the potato / L. Abeuova, B. Kali, D. Tussipkan [et al.] // *Transgenic Res.* — 2023. — № 32. — P. 383–397. — DOI: 10.1007/s11248-023-00356-8.
6. Alok A. Rapid and efficient CRISPR/Cas9-mediated genome editing in potato via hairy root induction / A. Alok, H. Chauhan, N. Kaushal [et al.] // *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. — 2023. — № 59. — P. 83–94. — DOI: 0.1007/s11627-022-10318-0.
7. Veillet F. Transgene-Free Genome Editing in Tomato and Potato Plants Using Agrobacterium-Mediated Delivery of a CRISPR/Cas9 Cytidine Base Editor / F. Veillet, L. Perrot, L. Chauvin [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2019. — № 20. — DOI: 10.3390/ijms20020402.
8. Nicolia A. Targeted gene mutation in tetraploid potato through transient TALEN expression in protoplasts / A. Nicolia, E. Proux-Wéra, I. Åhman [et al.] // *Journal of Biotechnology*. — 2015. — № 204. — P. 17–24. — DOI: 10.1016/j.jbiotec.2015.03.021.
9. Andersson M. Genome editing in potato via CRISPR-Cas9 ribonucleoprotein delivery / M. Andersson, H. Turesson, N. Olsson [et al.] // *Physiologia Plantarum*. — 2018. — № 164. — P. 378–384. — DOI: 10.1111/pp1.12731.
10. Makhotenko A. Functional Analysis of Coilin in Virus Resistance and Stress Tolerance of Potato *Solanum tuberosum* using CRISPR-Cas9 Editing / A. Makhotenko, A. Khromov, E. Snigir [et al.] // *Reports on Biochemistry and Biophysics*. — 2019. — № 484. — P. 88–91. — DOI: 10.1134/S1607672919010241.
11. Wang S. Efficient targeted mutagenesis in potato by the CRISPR/Cas9 system / S. Wang, S. Zhang, W. Wang [et al.] // *Plant Cell Reports*. — 2015. — № 34. — P. 1473–1476. — DOI: 10.1007/s00299-015-1816-7.
12. Clasen B. Improving cold storage and processing traits in potato through targeted gene knockout / B. Clasen, T. Stoddard, S. Luo [et al.] // *Plant Biotechnology Journal*. — 2016. — № 14. — P. 169–176. — DOI: 10.1111/pbi.12370.
13. Butler N. Generation and Inheritance of Targeted Mutations in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Using the CRISPR/Cas System / N. Butler, P. Atkins, D. Voytas [et al.] // *PloS One*. — 2015. — № 10. — DOI: 10.1371/journal.pone.0144591.
14. Butler N. Geminivirus-Mediated Genome Editing in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Using Sequence-Specific Nucleases / N. Butler, N. Baltes, D. Voytas [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. — 2016. — № 7. — DOI: 10.3389/fpls.2016.01045.

15. Forsyth A. Transcription Activator-Like Effector Nucleases (TALEN)-Mediated Targeted DNA Insertion in Potato Plants / A. Forsyth, T. Weeks, C. Richael [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. — 2016. — № 7. — DOI: 10.3389/fpls.2016.01572.
16. Toinga-Villafuerte S. Green fluorescent protein gene as a tool to examine the efficacy of Agrobacterium-delivered CRISPR/Cas9 reagents to generate targeted mutations in the potato genome / S. Toinga-Villafuerte, M. Janga, M. Isabel Vales [et al.] // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. — 2022. — № 150. — P. 587–598. — DOI: 10.1007/s11240-022-02310-8.
17. Wulff-Vester A. Colour change in potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers by disruption of the anthocyanin pathway via ribonucleoprotein complex delivery of the CRISPR/Cas9 system / A. Wulff-Vester, M. Andersson, M. Brurberg [et al.] // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. — 2024. — № 157. — DOI: 10.1007/s11240-024-02743-3.
18. Khromov A. Delivery of CRISPR/Cas9 Ribonucleoprotein Complex into Plant Apical Meristem Cells Leads to Large Deletions in an Editing Gene / A. Khromov, A. Makhotenko, S. Makarova [et al.] // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. — 2020. — № 46. — P. 1242–1249. — DOI: 10.1134/s1068162020060138.
19. Siddappa S. CRISPR/Cas9-mediated editing of phytoene desaturase (PDS) gene in an important staple crop, potato / S. Siddappa, N. Sharma, N. Salaria [et al.] // *3 Biotech*. — 2023. — № 13. — DOI: 10.1007/s13205-023-03543-w.
20. Ye M. Salt and osmotic stress can improve the editing efficiency of CRISPR/Cas9-mediated genome editing system in potato / M. Ye, M. Yao, C. Li [et al.] // *PeerJ*. — 2023. — № 11. — DOI: 10.7717/peerj.15771.
21. Andersson M. Efficient targeted multiallelic mutagenesis in tetraploid potato (*Solanum tuberosum*) by transient CRISPR-Cas9 expression in protoplasts / M. Andersson, H. Turesson, A. Nicolai [et al.] // *Plant Cell Reports*. — 2017. — № 36. — P. 117–128. — DOI: 10.1007/s00299-016-2062-3.
22. Kusano H. Establishment of a modified CRISPR/Cas9 system with increased mutagenesis frequency using the translational enhancer dMac3 and multiple guide RNAs in potato / H. Kusano, M. Ohnuma, H. Mutsuro-Aoki [et al.] // *Scientific Reports*. — 2018. — № 8. — DOI: 10.1038/s41598-018-32049-2.
23. Johansen I. High efficacy full allelic CRISPR/Cas9 gene editing in tetraploid potato / I. Johansen, Y. Liu, B. Jørgensen [et al.] // *Scientific Reports*. — 2019. — № 9. — DOI: 10.1038/s41598-019-54126-w.
24. Kusano H. Efficiency of potato genome editing: Targeted mutation on the genes involved in starch biosynthesis using the CRISPR/dMac3-Cas9 system / H. Kusano, A. Takeuchi, H. Shimada // *Plant Biotechnology*. — 2023. — № 40. — P. 201–209. — DOI: 10.5511/plantbiotechnology.23.0611a.
25. Pfothenhauer A. Genome-Editing of FtsZ1 for Alteration of Starch Granule Size in Potato Tubers / A. Pfothenhauer, A. Occhialini, S. Harbison [et al.] // *Plants*. — 2023. — № 12. — DOI: 10.3390/plants12091878.
26. Nakayasu M. Generation of α -solanine-free hairy roots of potato by CRISPR/Cas9 mediated genome editing of the St16DOX gene / M. Nakayasu, R. Akiyama, H. Lee [et al.] // *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*. — 2018. — № 131. — P. 70–77. — DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.04.026.
27. Yasumoto S. Efficient genome engineering using Platinum TALEN in potato / S. Yasumoto, N. Umemoto, H. Lee [et al.] // *Plant Biotechnology (Tokyo, Japan)*. — 2023. — № 40. — P. 211–218. — DOI: 10.5511/plantbiotechnology.19.0805a.
28. Umemoto N. Integrated gene-free potato genome editing using transient transcription activator-like effector nucleases and regeneration-promoting gene expression by Agrobacterium infection / N. Umemoto, S. Yasumoto, M. Yamazaki [et al.] // *Plant Biotechnology (Tokyo, Japan)*. — 2023. — № 40. — P. 211–218. — DOI: 10.5511/plantbiotechnology.23.0530a.
29. Egorova A. Reduction in Cold-Induced Sweetening by Cas9 Endonuclease-Mediated Knockout of the POTATO VACUOLAR INVERTASE 1 Gene in the Cultivar ‘Symfonia’ / A. Egorova, T. Zykova, N. Kostina [et al.] // *Potato Research*. — 2024. — DOI: 10.1007/s11540-024-09800-6.
30. Ly D. Multiplex CRISPR-Cas9 Gene-Editing Can Deliver Potato Cultivars with Reduced Browning and Acrylamide / D. Ly, S. Iqbal, J. Fosu-Nyarko [et al.] // *Plants*. — 2023. — № 12. — DOI: 10.3390/plants12020379.
31. Ma J. Genome editing in potato plants by agrobacterium-mediated transient expression of transcription activator-like effector nucleases / J. Ma, H. Xiang, D. Donnelly [et al.] // *Plant Biotechnology Reports*. — 2017. — № 11. — P. 249–258. — DOI: 10.1007/s11816-017-0448-5.
32. Acha G. A Traceable DNA-Replicon Derived Vector to Speed Up Gene Editing in Potato: Interrupting Genes Related to Undesirable Postharvest Tuber Traits as an Example / G. Acha, R. Vergara, M. Muñoz [et al.] // *Plants*. — 2021. — № 10. — DOI: 10.3390/plants10091882.
33. González M. Reduced Enzymatic Browning in Potato Tubers by Specific Editing of a Polyphenol Oxidase Gene via Ribonucleoprotein Complexes Delivery of the CRISPR/Cas9 System / M. González, G. Massa, M. Andersson [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. — 2020. — № 10. — DOI: 10.3389/fpls.2019.01649.
34. Quenouille J. Potato virus Y : a major crop pathogen that has provided major insights into the evolution of viral pathogenicity / J. Quenouille, N. Vassilakos, B. Moury // *Molecular Plant Pathology*. — 2013. — № 14. — P. 439–452. — DOI: 10.1111/mpp.12024.
35. Lucioli A. CRISPR-Cas9 Targeting of the eIF4E1 Gene Extends the Potato Virus Y Resistance Spectrum of the *Solanum tuberosum* L. cv. Désirée / A. Lucioli, R. Tavazza, S. Baima [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. — 2022. — № 13. — DOI: 10.3389/fmicb.2022.873930.
36. Noureen A. CRISPR/Cas9-Mediated Targeting of Susceptibility Factor eIF4E-Enhanced Resistance Against Potato Virus Y / A. Noureen, M. Khan, I. Amin [et al.] // *Frontiers in Genetics*. — 2022. — № 13. — DOI: 10.3389/fgene.2022.922019.
37. Noureen A. Broad-spectrum resistance against multiple PVY-strains by CRISPR/Cas13 system in *Solanum tuberosum* crop / A. Noureen, M. Khan, I. Amin [et al.] // *GM Crops & Food*. — 2022. — № 13. — P. 97–111. — DOI: 10.1080/21645698.2022.2080481.

38. Kieu N. Mutations introduced in susceptibility genes through CRISPR/Cas9 genome editing confer increased late blight resistance in potatoes / N. Kieu, M. Lenman, E. Wang [et al.] // *Scientific Reports*. — 2021. — № 11. — DOI: 10.1038/s41598-021-83972-w.
39. Norouzi M. CRISPR/Cas StNRL1 gene knockout increases resistance to late blight and susceptibility to early blight in potato / M. Norouzi, F. Nazarain-Firouzabadi, A. Ismaili [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. — 2024. — № 14. — DOI: 10.3389/fpls.2023.1278127.
40. Zhou X. StMYB44 negatively regulates phosphate transport by suppressing expression of PHOSPHATE1 in potato / X. Zhou, M. Zha, J. Huang [et al.] // *Journal of Experimental Botany*. — 2017. — № 68. — P. 1265–1281. — DOI: 10.1093/jxb/erx026.
41. Karlsson M. CRISPR/Cas9 genome editing of potato St DMR6-1 results in plants less affected by different stress conditions / M. Karlsson, N. Kieu, M. Lenman [et al.] // *Horticulture Research*. — 2024. — № 11. — DOI: 10.1093/hr/uhae130.

Список литературы на английском языке / References in English

- Dolničar P. Importance of Potato as a Crop and Practical Approaches to Potato Breeding / P. Dolničar // *Methods in Molecular Biology*. — 2021. — № 2354. — P. 3–20. — DOI: 10.1007/978-1-0716-1609-3_1.
- Lahlali R. Editorial: Perspective challenges for applied research in potato pathogens: From molecular biology to bioinformatics / R. Lahlali, G. Gachara, G. Özer [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. — 2023. — № 14. — DOI: 10.3389/fmicb.2023.1140107.
- Miroshnichenko D.N. Dostizhenija, problemy i perspektivy poluchenija netransgennyh rastenij s otredaktirovannym genomom [Achievements, problems and prospects of obtaining nontransgenic plants with edited genome] / D.N. Miroshnichenko, O.A. Shul'ga, V.R. Timerbaev [et al.] // *Biotechnology*. — 2019. — № 35. — DOI: 10.21519/0234-2758-2019-35-1-3-26. [in Russian]
- Sawai S. Sterol Side Chain Reductase 2 Is a Key Enzyme in the Biosynthesis of Cholesterol, the Common Precursor of Toxic Steroidal Glycoalkaloids in Potato / S. Sawai, K. Ohyama, S. Yasumoto [et al.] // *The Plant Cell*. — 2014. — № 26. — P. 3763–3774. — DOI: 10.1105/tpc.114.130096.
- Abeuova L. CRISPR/Cas9-mediated multiple guide RNA-targeted mutagenesis in the potato / L. Abeuova, B. Kali, D. Tussipkan [et al.] // *Transgenic Res*. — 2023. — № 32. — P. 383–397. — DOI: 10.1007/s11248-023-00356-8.
- Alok A. Rapid and efficient CRISPR/Cas9-mediated genome editing in potato via hairy root induction / A. Alok, H. Chauhan, N. Kaushal [et al.] // *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. — 2023. — № 59. — P. 83–94. — DOI: 10.1007/s11627-022-10318-0.
- Veillet F. Transgene-Free Genome Editing in Tomato and Potato Plants Using Agrobacterium-Mediated Delivery of a CRISPR/Cas9 Cytidine Base Editor / F. Veillet, L. Perrot, L. Chauvin [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. — 2019. — № 20. — DOI: 10.3390/ijms20020402.
- Nicolia A. Targeted gene mutation in tetraploid potato through transient TALEN expression in protoplasts / A. Nicolia, E. Proux-Wéra, I. Åhman [et al.] // *Journal of Biotechnology*. — 2015. — № 204. — P. 17–24. — DOI: 10.1016/j.jbiotec.2015.03.021.
- Andersson M. Genome editing in potato via CRISPR-Cas9 ribonucleoprotein delivery / M. Andersson, H. Turesson, N. Olsson [et al.] // *Physiologia Plantarum*. — 2018. — № 164. — P. 378–384. — DOI: 10.1111/ppl.12731.
- Makhotenko A. Functional Analysis of Coilin in Virus Resistance and Stress Tolerance of Potato *Solanum tuberosum* using CRISPR-Cas9 Editing / A. Makhotenko, A. Khromov, E. Snigir [et al.] // *Reports on Biochemistry and Biophysics*. — 2019. — № 484. — P. 88–91. — DOI: 10.1134/S1607672919010241.
- Wang S. Efficient targeted mutagenesis in potato by the CRISPR/Cas9 system / S. Wang, S. Zhang, W. Wang [et al.] // *Plant Cell Reports*. — 2015. — № 34. — P. 1473–1476. — DOI: 10.1007/s00299-015-1816-7.
- Clasen B. Improving cold storage and processing traits in potato through targeted gene knockout / B. Clasen, T. Stoddard, S. Luo [et al.] // *Plant Biotechnology Journal*. — 2016. — № 14. — P. 169–176. — DOI: 10.1111/pbi.12370.
- Butler N. Generation and Inheritance of Targeted Mutations in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Using the CRISPR/Cas System / N. Butler, P. Atkins, D. Voytas [et al.] // *PloS One*. — 2015. — № 10. — DOI: 10.1371/journal.pone.0144591.
- Butler N. Geminivirus-Mediated Genome Editing in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Using Sequence-Specific Nucleases / N. Butler, N. Baltes, D. Voytas [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. — 2016. — № 7. — DOI: 10.3389/fpls.2016.01045.
- Forsyth A. Transcription Activator-Like Effector Nucleases (TALEN)-Mediated Targeted DNA Insertion in Potato Plants / A. Forsyth, T. Weeks, C. Richael [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. — 2016. — № 7. — DOI: 10.3389/fpls.2016.01572.
- Toinga-Villafuerte S. Green fluorescent protein gene as a tool to examine the efficacy of Agrobacterium-delivered CRISPR/Cas9 reagents to generate targeted mutations in the potato genome / S. Toinga-Villafuerte, M. Janga, M. Isabel Vales [et al.] // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. — 2022. — № 150. — P. 587–598. — DOI: 10.1007/s11240-022-02310-8.
- Wulff-Vester A. Colour change in potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers by disruption of the anthocyanin pathway via ribonucleoprotein complex delivery of the CRISPR/Cas9 system / A. Wulff-Vester, M. Andersson, M. Brurberg [et al.] // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. — 2024. — № 157. — DOI: 10.1007/s11240-024-02743-3.
- Khromov A. Delivery of CRISPR/Cas9 Ribonucleoprotein Complex into Plant Apical Meristem Cells Leads to Large Deletions in an Editing Gene / A. Khromov, A. Makhotenko, S. Makarova [et al.] // *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. — 2020. — № 46. — P. 1242–1249. — DOI: 10.1134/s1068162020060138.
- Siddappa S. CRISPR/Cas9-mediated editing of phytoene desaturase (PDS) gene in an important staple crop, potato / S. Siddappa, N. Sharma, N. Salaria [et al.] // *3 Biotech*. — 2023. — № 13. — DOI: 10.1007/s13205-023-03543-w.

20. Ye M. Salt and osmotic stress can improve the editing efficiency of CRISPR/Cas9-mediated genome editing system in potato / M. Ye, M. Yao, C. Li [et al.] // PeerJ. — 2023. — № 11. — DOI: 10.7717/peerj.15771.
21. Andersson M. Efficient targeted multiallelic mutagenesis in tetraploid potato (*Solanum tuberosum*) by transient CRISPR-Cas9 expression in protoplasts / M. Andersson, H. Turesson, A. Nicolai [et al.] // Plant Cell Reports. — 2017. — № 36. — P. 117–128. — DOI: 10.1007/s00299-016-2062-3.
22. Kusano H. Establishment of a modified CRISPR/Cas9 system with increased mutagenesis frequency using the translational enhancer dMac3 and multiple guide RNAs in potato / H. Kusano, M. Ohnuma, H. Mutsuro-Aoki [et al.] // Scientific Reports. — 2018. — № 8. — DOI: 10.1038/s41598-018-32049-2.
23. Johansen I. High efficacy full allelic CRISPR/Cas9 gene editing in tetraploid potato / I. Johansen, Y. Liu, B. Jørgensen [et al.] // Scientific Reports. — 2019. — № 9. — DOI: 10.1038/s41598-019-54126-w.
24. Kusano H. Efficiency of potato genome editing: Targeted mutation on the genes involved in starch biosynthesis using the CRISPR/dMac3-Cas9 system / H. Kusano, A. Takeuchi, H. Shimada // Plant Biotechnology. — 2023. — № 40. — P. 201–209. — DOI: 10.5511/plantbiotechnology.23.0611a.
25. Pfothenhauer A. Genome-Editing of FtsZ1 for Alteration of Starch Granule Size in Potato Tubers / A. Pfothenhauer, A. Occhialini, S. Harbison [et al.] // Plants. — 2023. — № 12. — DOI: 10.3390/plants12091878.
26. Nakayasu M. Generation of α -solanine-free hairy roots of potato by CRISPR/Cas9 mediated genome editing of the St16DOX gene / M. Nakayasu, R. Akiyama, H. Lee [et al.] // Plant Physiology and Biochemistry: PPB. — 2018. — № 131. — P. 70–77. — DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.04.026.
27. Yasumoto S. Efficient genome engineering using Platinum TALEN in potato / S. Yasumoto, N. Umemoto, H. Lee [et al.] // Plant Biotechnology (Tokyo, Japan). — 2023. — № 40. — P. 211–218. — DOI: 10.5511/plantbiotechnology.19.0805a.
28. Umemoto N. Integrated gene-free potato genome editing using transient transcription activator-like effector nucleases and regeneration-promoting gene expression by *Agrobacterium* infection / N. Umemoto, S. Yasumoto, M. Yamazaki [et al.] // Plant Biotechnology (Tokyo, Japan). — 2023. — № 40. — P. 211–218. — DOI: 10.5511/plantbiotechnology.23.0530a.
29. Egorova A. Reduction in Cold-Induced Sweetening by Cas9 Endonuclease-Mediated Knockout of the POTATO VACUOLAR INVERTASE 1 Gene in the Cultivar ‘Symfonia’ / A. Egorova, T. Zykova, N. Kostina [et al.] // Potato Research. — 2024. — DOI: 10.1007/s11540-024-09800-6.
30. Ly D. Multiplex CRISPR-Cas9 Gene-Editing Can Deliver Potato Cultivars with Reduced Browning and Acrylamide / D. Ly, S. Iqbal, J. Fosu-Nyarko [et al.] // Plants. — 2023. — № 12. — DOI: 10.3390/plants12020379.
31. Ma J. Genome editing in potato plants by *agrobacterium*-mediated transient expression of transcription activator-like effector nucleases / J. Ma, H. Xiang, D. Donnelly [et al.] // Plant Biotechnology Reports. — 2017. — № 11. — P. 249–258. — DOI: 10.1007/s11816-017-0448-5.
32. Acha G. A Traceable DNA-Replicon Derived Vector to Speed Up Gene Editing in Potato: Interrupting Genes Related to Undesirable Postharvest Tuber Traits as an Example / G. Acha, R. Vergara, M. Muñoz [et al.] // Plants. — 2021. — № 10. — DOI: 10.3390/plants10091882.
33. González M. Reduced Enzymatic Browning in Potato Tubers by Specific Editing of a Polyphenol Oxidase Gene via Ribonucleoprotein Complexes Delivery of the CRISPR/Cas9 System / M. González, G. Massa, M. Andersson [et al.] // Frontiers in Plant Science. — 2020. — № 10. — DOI: 10.3389/fpls.2019.01649.
34. Quenouille J. Potato virus Y : a major crop pathogen that has provided major insights into the evolution of viral pathogenicity / J. Quenouille, N. Vassilakos, B. Moury // Molecular Plant Pathology. — 2013. — № 14. — P. 439–452. — DOI: 10.1111/mpp.12024.
35. Lucioli A. CRISPR-Cas9 Targeting of the eIF4E1 Gene Extends the Potato Virus Y Resistance Spectrum of the *Solanum tuberosum* L. cv. Désirée / A. Lucioli, R. Tavazza, S. Baima [et al.] // Frontiers in Microbiology. — 2022. — № 13. — DOI: 10.3389/fmicb.2022.873930.
36. Noureen A. CRISPR/Cas9-Mediated Targeting of Susceptibility Factor eIF4E-Enhanced Resistance Against Potato Virus Y / A. Noureen, M. Khan, I. Amin [et al.] // Frontiers in Genetics. — 2022. — № 13. — DOI: 10.3389/fgene.2022.922019.
37. Noureen A. Broad-spectrum resistance against multiple PVY-strains by CRISPR/Cas13 system in *Solanum tuberosum* crop / A. Noureen, M. Khan, I. Amin [et al.] // GM Crops & Food. — 2022. — № 13. — P. 97–111. — DOI: 10.1080/21645698.2022.2080481.
38. Kieu N. Mutations introduced in susceptibility genes through CRISPR/Cas9 genome editing confer increased late blight resistance in potatoes / N. Kieu, M. Lenman, E. Wang [et al.] // Scientific Reports. — 2021. — № 11. — DOI: 10.1038/s41598-021-83972-w.
39. Norouzi M. CRISPR/Cas StNRL1 gene knockout increases resistance to late blight and susceptibility to early blight in potato / M. Norouzi, F. Nazarin-Firouzabadi, A. Ismaili [et al.] // Frontiers in Plant Science. — 2024. — № 14. — DOI: 10.3389/fpls.2023.1278127.
40. Zhou X. StMYB44 negatively regulates phosphate transport by suppressing expression of PHOSPHATE1 in potato / X. Zhou, M. Zha, J. Huang [et al.] // Journal of Experimental Botany. — 2017. — № 68. — P. 1265–1281. — DOI: 10.1093/jxb/erx026.
41. Karlsson M. CRISPR/Cas9 genome editing of potato St DMR6-1 results in plants less affected by different stress conditions / M. Karlsson, N. Kieu, M. Lenman [et al.] // Horticulture Research. — 2024. — № 11. — DOI: 10.1093/hr/uhae130.