

## Оригинальная статья / Original article

https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-5-13  
 УДК: (635.64+635.649):631.52.85(476)

О.Г. Бабак<sup>1</sup>, Е.В. Дрозд<sup>1</sup>, Н.А. Некрашевич<sup>1</sup>,  
 Н.В. Анисимова<sup>1</sup>, К.К. Яцевич<sup>1</sup>,  
 П.В. Шестерень<sup>1</sup>, И.Е. Баева<sup>2</sup>,  
 Н.А. Невестенко<sup>2</sup>, И.Г. Пугачева<sup>2</sup>,  
 М.М. Добродзькин<sup>2</sup>, А.В. Кильчевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Государственное научное учреждение «Институт генетики и цитологии»

Национальной академии наук Беларуси)  
 Республика Беларусь, 220072,  
 г. Минск, ул. Академическая, 27

<sup>2</sup> Учреждение образования  
 «Белорусская государственная академия  
 Октябровой революции и Трудового  
 Красного Знамени сельскохозяйственной  
 академии»  
 Республика Беларусь, 213410,  
 Могилевская обл., г. Горки, ул. Мичурина, 5

## \*Автор для переписки:

O.Babak@igc.by, babak\_olga@mail.ru

**Благодарности.** Данные исследования выполнялись при поддержке задания в «Генетически идентифицировать коллекционные образцы сельскохозяйственных культур для формирования нового генофонда доноров хозяйственно ценных признаков в целях использования в селекции» государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» и проекта Б23КУБ-009 «Изучение генетического полиморфизма генов устойчивости к болезням у форм томата кубинской и белорусской селекции для повышения эффективности селекционных программ» Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

**Вклад авторов:** Кильчевский А.В.: научное руководство исследованием, ресурсы; Бабак О.Г.: проведение исследования, концептуализация, методология, верификация и администрирование данных, создание рукописи и ее редактирование; Анисимова Н.В.: проведение молекулярных и полевых исследований, создание рукописи; Некрашевич Н.А.: проведение молекулярных и полевых исследований; Яцевич К.К.: проведение молекулярных исследований; Дрозд Е.В.: проведение молекулярных и полевых исследований, создание рукописи; Шестерень П.В.: проведение молекулярных исследований; Добродзькин М.М.: проведение полевых исследований, ресурсы; Пугачева И.Г.: проведение полевых и молекулярных исследований, верификация данных; Баева И.Е.: проведение полевых и молекулярных исследований; Невестенко Н.А.: проведение полевых исследований.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Бабак О.Г., Дрозд Е.В., Некрашевич Н.А., Анисимова Н.В., Яцевич К.К., Шестерень П.В., Баева И.Е., Невестенко Н.А., Пугачева И.Г., Добродзькин М.М., Кильчевский А.В. Использование молекулярных маркеров, связанных с устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам среды, при создании селекционного материала томата и перца в Беларуси. *Овощи России*. 2025;(1):5-13. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-5-13>

Поступила в редакцию: 29.09.2024

Принята к печати: 25.10.2024

Опубликована: 28.12.2024

Olga G. Babak<sup>1</sup>, Elizaveta V. Drozd<sup>1</sup>,  
 Natalya A. Nekrashevich<sup>1</sup>, Natalya V. Anisimova<sup>1</sup>,  
 Kanstantsiya K. Yatsевич<sup>1</sup>, Pavel V. Shesteren<sup>1</sup>,  
 Iryna E. Bayeva<sup>2</sup>, Natalya A. Nevestenko<sup>2</sup>,  
 Iryna G. Puhachova<sup>2</sup>, Mikhail M. Dobrodzkin<sup>2</sup>,  
 Alexander V. Kilchevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Scientific Institution "Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus" 27, Akademicheskaya St., Minsk, 220072, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and the Order of the Labour Red Banner Agricultural Academy" 5, Michurin St., Gorki, Mogilev Region, 213410, Republic of Belarus

## \*Correspondence Author:

O.Babak@igc.by, babak\_olga@mail.ru

**Funding.** The study was supported as part of Project 8 "Genetically identify the collection samples of agricultural crops to form a new gene pool of donors of economically valuable traits for use in breeding" of the State program "Scientific and innovative activities of the National Academy of Sciences of Belarus" and grant No. B23CUB-009 "Study of genetic polymorphism of disease resistance genes in the tomato forms of Cuban and Belarusian origin to improve the efficiency of breeding programs" of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research.

**Authors' Contribution:** Kilchevsky A.V.: scientific supervision of the study, resources; Babak O.G.: study implementation, conceptualization, methodology, data verification and administration, manuscript preparation and editing; Anisimova N.V.: molecular and field studies, manuscript preparation; Nekrashevich N.A.: molecular and field studies; Yatsевич K.K.: molecular studies; Drozd E.V.: molecular and field studies, manuscript preparation; Shesteren P.V.: molecular studies; Dobrodzkin M.M.: field studies, resources; Puhachova I.G.: field and molecular studies, data verification; Bayeva I.E.: field and molecular studies; Nevestenko N.A.: field studies.

**Conflict of interest.** The authors declare that there are no conflicts of interest.

**For citation:** Babak O.G., Drozd E.V., Nekrashevich N.A., Anisimova N.V., Yatsевич K.K., Shesteren P.V., Bayeva I.E., Nevestenko N.A., Puhachova I.G., Dobrodzkin M.M., Kilchevsky A.V. Use of molecular markers associated with resistance to biotic and abiotic environmental factors in developing breeding material for tomato and pepper in Belarus. *Vegetable crops of Russia*. 2025;(1):5-13. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-5-13>

Received: 29.09.2024

Accepted for publication: 25.10.2024

Published: 28.12.2024

# Использование молекулярных маркеров, связанных с устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам среды, при создании селекционного материала томата и перца в Беларуси



## РЕЗЮМЕ

**Актуальность.** Разработка системы молекулярных маркеров, позволяющих выявлять генетические детерминанты устойчивости к возбудителям болезней, а также типировать аллели, участвующие в регуляции накопления антоцианов, является важнейшим условием повышения эффективности селекционного процесса, направленного на повышение устойчивости возделываемых культур к биотическим и абиотическим стрессам.

**Материал и методика.** В работе использовались молекулярно-генетические методы выделения ДНК, ПЦР-анализ, рестрикция, оценка продуктов амплификации и рестрикции в агарозном или полиакриламидном геле. В качестве материала использовались широкие коллекции *Solanum lycopersicum* и *Capsicum annuum*, а также образцы близкородственных диких видов.

**Результаты.** В работе дана оценка эффективности представленных в литературе 25 молекулярных маркеров, связанных с устойчивостью к болезням томата и перца, вызываемым грибными, бактериальными, вирусными патогенами, а также нематодой. Представлены маркеры к аллелям генов MYB-транскрипционных факторов, связанных с регуляцией накопления антоцианов у томата (*SIMyb12*, *Anthocyanin1*, *Anthocyanin2*, *An-2-like*, *Atrviolacium*) и перца (*Myb113-like1*, *Myb113-like2*, *ETC3-2*), которые рекомендуется использовать для сопровождения селекционного процесса, направленного на повышение устойчивости к стрессовым биотическим и абиотическим факторам среды.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

*S. lycopersicum*, *C. annuum*, ДНК-маркеры, устойчивость к болезням, гены, регулирующие биосинтез антоцианов

## Use of molecular markers associated with resistance to biotic and abiotic environmental factors in developing breeding material for tomato and pepper in Belarus

## ABSTRACT

**Relevance.** The development of a system of molecular markers that allows identifying the genetic determinants of resistance to pathogens, as well as the typing of alleles involved in the regulation of anthocyanin accumulation, is the most important condition for increasing the efficiency of the breeding process aimed at enhancing the resistance of cultivated crops to biotic and abiotic stresses.

**Methodology.** The work involved molecular genetic methods of DNA isolation, PCR analysis, restriction, and evaluation of amplification and restriction products in agarose or polyacrylamide gels. The material used included the diverse collections of *Solanum lycopersicum* and *Capsicum annuum*, as well as the specimens of closely related wild species.

**Results.** The paper evaluates the effectiveness of 25 molecular markers presented in the literature associated with resistance to tomato and pepper diseases caused by fungal, bacterial, viral pathogens, as well as nematodes. Markers to the alleles of MYB transcription factor genes associated with the regulation of anthocyanin accumulation in tomato (*SIMyb12*, *Anthocyanin1*, *Anthocyanin2*, *An-2-like* and *Atrviolacium*) and pepper (*Myb113-like1*, *Myb113-like2* and *ETC3-2*), recommended for the breeding process aimed at increasing resistance to stressful biotic and abiotic environmental factors, are presented.

## KEYWORDS:

*S. lycopersicum*, *C. annuum*, DNA-markers, disease resistance, genes regulating anthocyanin biosynthesis

## Введение

Устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов – необходимое условие успешного возделывания культурных растений. Способность растительного организма к эффективной защите от негативных воздействий среды является важнейшим резервом повышения урожайности, поскольку обеспечивает возможность максимальной реализации потенциала продуктивности. В этой связи повышение устойчивости сельскохозяйственных растений к неблагоприятным факторам среды биотической и абиотической природы неизменно остается важной и актуальной задачей генетико-селекционных исследований [1].

Серьезный экономический ущерб возделыванию овощных культур наносят патогены, которые вызывают многочисленные болезни растений. Применение химических методов борьбы с инфекциями не всегда дает желаемые результаты и снижает качество продукции, нанося вред окружающей среде и здоровью человека. Перспективным способом защиты растений является создание и выращивание устойчивых форм, которые невосприимчивы к воздействию патогенов. Поиск генетических детерминант устойчивости и ДНК-маркеров к ним позволяет с применением инструментов маркер-ассоциированной селекции (МАС) создавать генотипы, способные противостоять разнообразным негативным воздействиям. В литературе опубликованы сведения о идентификации генов, связанных с сопротивляемостью биотическим стрессам у томата и перца, и о разработанных к ним молекулярных маркерах. Выявлены гены, контролирующие устойчивость к ряду экономически значимых заболеваний, вызываемых возбудителями грибной, бактериальной, вирусной природы и нематодой [2-12].

В Институте генетики и цитологии НАН Беларуси проводится работа с ДНК-маркерами генов устойчивости к болезням и вредителям пасленовых, которая направлена на апробацию, адаптацию, верификацию представленных в литературе маркеров. С применением методов ДНК-маркирования ведется скрининг коллекционного и селекционного материала для выявления источников целевых аллелей и создания новых устойчивых генотипов [13-15].

Не менее важна для сельскохозяйственных культур, особенно выращиваемых в зонах рискованного земледелия, устойчивость к негативным абиотическим факторам. К генетическим детерминантам, ассоциированным с неспецифической устойчивостью к стрессам, относят гены, связанные с регуляцией синтеза антоциановых пигментов. Имеются сведения, что растительные организмы с повышенным содержанием флавоноидов в тканях более устойчивы к неблагоприятным воздействиям среды [16-18].

В литературе и генетических базах данных представлены сведения по идентификации генов, кодирующих *Myb* транскрипционные факторы (ТФ), участвующие в регуляции биосинтеза антоцианов у томата: *Anthocyanin1*, доминантный аллель которого *Ant1* из *S. chilense* увеличивает количество флавоноидов в плодах, *An2* и *An2-like*, которые тесно сцеплены с *Ant1*. [16, 19]. Ген *Atroviolacea (ATV)*, рецессивный аллель которого (*atv*) из *S. cheesmaniae* связан с

активным накоплением антоциана как в плодах (наряду с *Ant1*, *An2*), так и в вегетативных органах [20]. Для идентификации указанных генов предложены ДНК-маркеры, позволяющие дифференцировать аллели *Ant1/ant1*, *Atv/atv*. [19-20].

В Институте генетики и цитологии НАН Беларуси разработаны новый SCAR *Ant1.1 (FAM)* маркер для выявления аллелей *Ant1* и *ant1*, SCAR маркеры *An2-AFT(OM)* и *An2-4F/R* для генотипирования аллелей гена *An2*: *An2-Aft*, *An2-Ins57* и *Myb75*, SCAR маркер *Atv2* для дифференциации аллелей гена *Atv (Atv/atv)*. Выполнены исследования по изучению накопления антоцианов в различных частях растений томата в зависимости от комбинации аллелей [21].

У *Capsicum annuum* выявлены наиболее схожие по нуклеотидному составу и функциям с геном *Ant1 S. lycopersicum* последовательности генов *Myb113-like 1* и *Myb113-like 2*, установлены генетические полиморфизмы этих генов, приводящие к изменению структуры кодируемого белка и нарушению процесса биосинтеза антоцианов в плодах и вегетативных органах, разработаны молекулярные маркеры для типирования выявленных аллелей (*Myb113-like1-delT*, *Myb113-like1-promIns148*, *Myb113-like1-promIns2*, *Myb113-like2-(C/A)*) [22-23].

В данной работе дана характеристика используемых молекулярных маркеров, представлены результаты ДНК-типирования с их применением на коллекциях образцов томата и перца для использования в генетических исследованиях, а также для сопровождения селекционного процесса, направленного на повышение устойчивости к неблагоприятным биотическим и абиотическим факторам.

## Материалы и методы

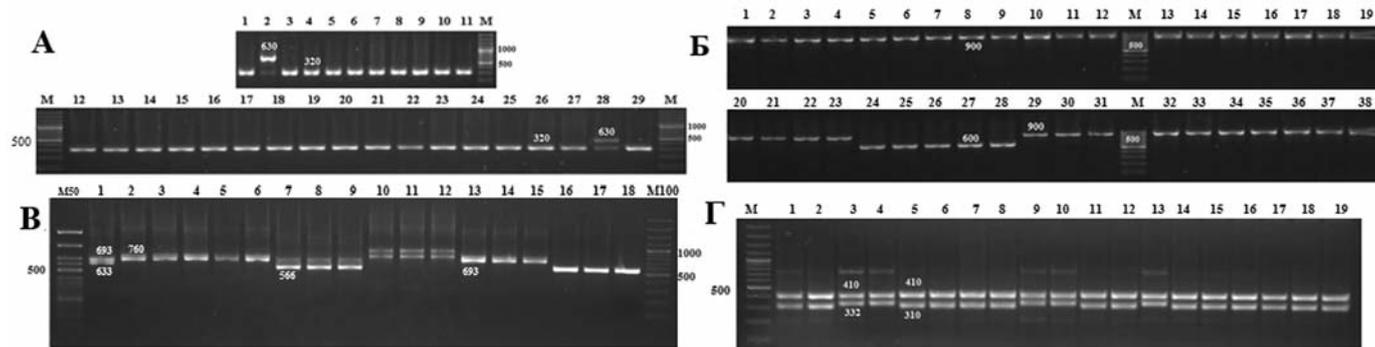
Материалом для исследований на различных этапах были формы томата и перца для защищенного и открытого грунта коллекций Института генетики и цитологии НАН Беларуси, Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, а также коллекции, используемые при выполнении совместных проектов с Федеральным научным центром овощеводства, Всероссийским институтом генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Научно-исследовательским институтом плодовоовощеводства., Научно-исследовательского института плодовоовощеводства им. Л. Димитровой (Республика Куба). В работе использовались молекулярно-генетические методы выделения ДНК, ПЦР-анализ, рестрикция, оценка продуктов амплификации и рестрикции в агарозном или полиакриламидном гелях [13].

## Результаты и обсуждение

На основании литературных данных проведены исследования по апробации, адаптации и верификации имеющихся маркеров, связанных с устойчивостью к болезням и вредителям у томата и перца. В таблицах 1 и 2 представлены данные о используемых маркерах по литературным источникам и выполненной верификации. При апробации указанных в таблице 1 маркеров устойчивости к болезням томата были использованы коллекционные образцы, а также близкородственные дикие виды.

Таблица 1. Наименование и характеристика маркеров, используемых для ДНК-типирования образцов *S. lycopersicum*  
 Table 1. Name and characteristics of markers used for the DNA typing of *S. lycopersicum* samples

Ген	Тип и название маркера	Праймеры для ПЦР	Т отжига, °С	Размер ПЦР продукта, п.н.	Литературный источник
Mi-1	SCAR, Mi-1.2	Mi23F: TGGAAAAATGTTGAATTTCTTTTG Mi23R: GCATACTATATGGCTTGTACCC	55	R - 380; S - 430	Seah S. et al., 2007
Mi-9	SCAR, C8B-Mi9	F: ACCCACGCCCATCAATG R: TGCAAGAGGGTGAATATTGAGTGC	59	R - 400; S - 360	El-Sappah A. H., 2019
Ve	CAPS, Ve ( <i>Xba</i> I)	F: CGAAGTTGAC TACATTGACC CTG R: CAGTCTTGAAAGGTTGCTCAGCC	59	R - 410, 332; S - 410, 310, 22	Je Min Lee et al., 2015
I-2	SCAR, I-2	I-2/5F: CAAGGAAGTGCCTGTCTGTG I-2/5R: ATGAGCAATTTGTGGCCAGT	55	R (I-2) - 633; R (I-2C) - 566; S - 693, 760	Davis R.M. et al., 2010
I-3	SCAR, P7-43D	F: GGTAAGAGATGCGATGATTATGTGGAG R: GTCTTTACCACAGGAACCTTATCACC	60	R - 875; S - 650	Je Min Lee. et al., 2015
I-7	CAPS, I-7 ( <i>Age</i> I)	F: AAGAAGTTCCTTCTCCCTTA R: GGAATAACCAAGGGGGTGT	56	R - 608, 200; S - 808	Je Min Lee. et al., 2015
Cf2, Cf5	SCAR, 2-5Cf	F: GCTATCTTTGGGTATCAACTT R: AGATGACATCGACAAAATGTG	58	R (Cf-2) - 1600; R (Cf-5) - 1163, 880; S - нет продукта	Kanwar J.S. et al., 1980
Cf5	SCAR, CF5	F: GTAATATCAGTGACCTTCACA R: ATTTCCAAACTGAAAAG	55	R - 1600; S - нет продукта	Dixon M.S. et al., 1998
Cf4	SCAR, Cf4/4A	F: TTACGACAGAAGAACTCTTTCTTGG R: AGTCCGCTTACGTTGGATGG	55	R (Cf-4) - 816; R (Cf-4A) - 965; S - нет продукта	Parniske M. et al., 1997 Takken F.L. et al., 1998
Cf9	SCAR, Cf9/9DC	CS5: TTTCCAACTTACAATCCCTTC DS1: GAGAGCTCAACCTTTACGAA CS1: GCCGTTCAAGTTGGGTGT	55	R (Cf-9) - 378; R (9DC) - 507; S - нет продукта	Van der Hoorn R.A. et al., 2001
Ph-2	CAPS, dTG63 ( <i>Hinf</i> I)	F: CТАCTCTTTCTATGCAATTTGAATTG R: AATAATTTTCAACCATAGAATGATT	55	R - 246; S - 220	Panthee D.R. et al., 2012
Ph-3	SCAR, NC-LB-9-6678	F: CCTTAATGCAATAGGCAAT R: ATTTGAATGTTCTGGATTGG	52	R - 600; S - 900	Panthee D.R. et al., 2012
Pto	CAPS, Pto_RsaI	F: ATCTACCCACAATGAGCATGAGCTC R: GTGCATACTCCAGTTTCCAC	56	R - 552; S - 113, 439	Je Min Lee. et al., 2015 Yang W. et al., 2005
Rx4	SCAR, pcc12 InDel	F: TCCACATCAAATGCGTTTCT R: TTCCAATCCTTTCCATTTCCG	60	R - 113; S - 119	Yang W. et al., 2005
Tm1	SCAR, Tm1:8por	F: CCACTGTATGATTTCTGCTAGTGAA R1: AGCTTTAAACAAATATAAGAATAAAGAC R2: GCAAGCTAAGGTTTACATATATGCC	56	R - 131; S - 212	Je Min Lee. et al., 2015
Tm-2	CAPS, Tm2RS-f3/r3_HpaI	F: TGGAGGGGAATATTTGTGGA R: ACTTCAGACAACCCATTCCGG	61	R (Tm2) - 458, 245; S - 703	Shi A. et al., 2011
Tm-2 <sup>2</sup>	CAPS, Tm2RS-f3/r3_BsiHKAI	F: TGGAGGGGAATATTTGTGGA R: ACTTCAGACAACCCATTCCGG	61	R (Tm2 <sup>2</sup> ) - 358, 353; R (Tm2) - 703	Shi A. et al., 2011
Sw-5	SCAR, Sw5-2	F: CGGAACCTGTAAGTTGACTG R: GAGCTCTCATCCATTTCCG	60	R (Sw-5b) - 541; S - нет продукта	Shi A. et al., 2011
Ty2	SCAR, Ty-2	F: TGGCTCATCCTGAAGCTGATAGCGC R: AGTGTACATCCTTGCCATTGACT	50	R - 900; S - 790	Je Min Lee. et al., 2015
Ty3	SCAR, Ty-3	F: GGTAGTGAAAATGATGCTGCTC R: GCTCTGCCTATTGTCCCATATATAACC	50	R (Ty-3) - 450; R (Ty-3a) - 630; S - 320	Je Min Lee. et al., 2015



**Рис. 1. ДНК-типирование аллелей устойчивости к болезням у форм томата: гена *Ty-3* (А), гена *Ph-3* (Б) гена *I-2* (В), гена *Ve* (Г)**  
**Fig. 1. DNA typing of disease resistance alleles in tomato varieties: *Ty-3* gene (A), *Ph-3* gene (B), *I-2* gene (C), *Ve* gene (D)**

По большинству апробированных маркеров были подтверждены размеры ожидаемых фрагментов, подобраны оптимальные температуры отжига, выполнена адаптация под используемые наборы реагентов. На рис. 1 показаны результаты электрофоретической разгонки продуктов ПЦР при оценке материала по аллелям устойчивости к вирусу желтой курчавости листьев (А), фитофторе (Б), фузариозу (В) и вертициллезу (Г).

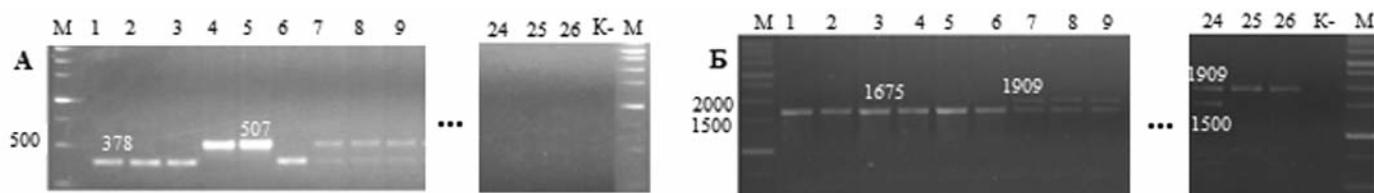
Анализ коллекций томата на устойчивость к мелойдогинозу, позволил выявить образцы с аллелями устойчивости гена *Mi-1* у различных форм для защищенного и открытого грунта. При этом устойчивые образцы с R-аллелем гена *Mi-9* чаще были характерны для детерминантных форм, используемых для возделывания в открытом грунте.

Фитофтороз (*late blight*), вызываемый грибами класса *Oomycetes* рода *Phytophthora*, является наиболее опасной болезнью для томата в условиях Беларуси. В связи с этим выполнен анализ широких коллекций томата на наличие источников устойчивости по генам *Ph-2* и *Ph-3*, дана оценка эффективности представленных в литературе маркеров [15], рис. 1 Б.

Устойчивость к фузариозному увяданию томата, вызываемому *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*, оценивалась с помощью маркеров *I-2*, *P7-43D*, *I-7\_Agel* (табл.1), связанных с резистентностью к определенным расам возбудителя. Анализ образцов белорусской и российской селекции с помощью маркера *I-2* в наших исследованиях позволил идентифицировать два R-аллеля *I-2* (633 п.н.) и *I-2C* (566 п.н.), причем аллель *I-2C*, как правило, был характерен для индетерминантных форм томата черри.

Исследования образцов кубинской коллекции выявили наличие отличного, не описанного авторами фрагмента около 900 п.н. (рис. 1 В, номера образцов 10-12, Lyto).

Бурая пятнистость листьев томата, или кладоспориоз, вызываемая грибом *Cladosporium fulvum* Ске., является одним из наиболее вредоносных заболеваний томата защищенного грунта. Устойчивость к кладоспориозу является неременным требованием при создании современных сортов и гибридов. В наших исследованиях широко использованы доминантные маркеры к генам *Cf2*, *Cf4*, *Cf5*, *Cf9*. Кроме того, нами апробирован кодоминантный маркер *Cf8/CR12* [3] к аллелям гена *Cf-9*. При сопоставлении результатов, полученных с помощью доминантных маркеров и кодоминантного, выявилось несоответствие размеров ПЦР продуктов, заявляемых авторами по кодоминантному маркеру. Согласно авторам, размеры фрагментов у устойчивых / восприимчивых образцов составляют 1500/1600 п.н. [3], согласно нашим полученным данным – 1675/1909 п.н. соответственно. На рис. 2 представлены результаты ДНК-типирования форм томата с применением SCAR маркеров *Cf9/9DC* (А) и *Cf8/CR12* (Б). Использование широких коллекций форм позволило показать, что по большинству образцов результаты типирования обоими маркерами совпадают, однако ряд образцов показали различные результаты. Так у образца кубинской коллекции №24 (L33/1) наряду с фрагментом, характеризующим наличие восприимчивого аллеля, маркер *Cf8/CR12* позволил выявить фрагмент размером 1500 п.н., нехарактерный для других образцов.



**Рис. 2. ДНК-типирование аллелей гена *CF9* у форм томата белорусской и кубинской селекции маркерами *Cf9/9DC* (А) и *Cf8/CR12* (Б)**  
**Fig. 2. DNA typing of *CF9* gene alleles in the tomato varieties of Belarusian and Cuban selection using markers *Cf9/9DC* (A) and *Cf8/CR12* (B)**

Таблица 2. Наименование и характеристика маркеров, используемых для ДНК-типирования образцов рода *Capsicum*  
 Table 2. Name and characteristics of markers used for the DNA typing of *Capsicum* genus specimens

Ген	Тип и название маркера	Праймеры для ПЦР	Т отжига, °С	Размер ПЦР продукта, п.н.	Литературный источник
<i>Me1</i>	CAPS, C2At2g06530-F/R_ HpyCH4IV	F: TTGGTGTCTGAAGGGACTAAA R: TCTTAATCAATCATTACACAGCA	55	R - 119; S - 55, 59	Uncu A.T. et al., 2015
Phyto.9 QTL	CAPS, F/R_Mval	F: CCAACCCTATTGAACGTCTT R: CTGATTCTTGATGCCTCTTG	55	R - 700, 150; S - 850	Kim H. et al., 2008
Phyto.5.2 QTL	SCAR, OpD04.717-F/R	F: CCATAAGGGTTGGTAAATTTACAAG R: TCGAGAGATAATTCAGATAGTATAATC	55	R - 717; S - нет продукта	Quirin E.A. et al., 2005
Xp.5, QTL	STS, InDel_F/R	F: GGTATCTTATTTTCATAGGACCAGGCA R: TTTCGCGGTAGTGACAACAACCTTACAGCCA	55	R - 100; S - 90	ChunYing S. et al., 2015
<i>pvr1</i>	CAPS, PVRL-F/R_BseNI	F: TGAGGCAGATGATGAAGTTGA R: CAACCATAAATATACCCCGAG	60	R - 710; S - 580, 130	Paran I. et al., 2009
<i>Cvr1</i>	CAPS, CVMV3-F/R_EcoRI	F: GAACCTCAATCATCTTAGCA R: ACATCAAATTGTTGCATTATAC	55	R - 311, 466; S - 762	Lee H.R. et al., 2013
<i>Cmr1</i>	CAPS, CaTm-int1-F/R_HinfI	F: TCAGCAAAGAAAGATTTCACGAAC R: ACGTACACTTGATGATGCCTTGT	58	R - 336, 160; S - 496	Kang W. Et al., 2010
<i>Tsw</i>	CAPS, SCAC568-F/R_XbaI	F: GTGCCAGAGGAGGATTTAT R: GCGAGGTGGACACTGATACT	55	R - 300, 268; S - 568	Özkaynak E. et al., 2014
<i>Bs3</i>	PR-Bs3-F/R	F: GCACACCCTGGTTAAACAATGAACACG R: GATGATAACTTGAAGTTGTGAGGATGG	58	R - 97; S - 110	Römer P. et al., 2010

В таблице 2 представлены данные по 9 маркерам, которые были успешно апробированы, а также по которым найдены источники устойчивости среди образцов изучаемых коллекций: к корневым нематодам (*Meloidogyne spp.*: *M. incognita*, *M. javanica*, *M. arenaria*) – *Me1*; к корневым и плодовым гнилям, вызываемым *Phytophthora capsici* – Phyto.9, Phyto.5.2, QTLs; к антракнозу, вызываемому *Colletotrichum acutatum* – хромосома 5, QTL; к Y вирусу картофеля – *pvr1*; к вирусу огуречной мозаики – *Cmr1*; к вирусу пятнистого увядания TSWV – *Tsw*; к вирусу крапчатости сосудов чили – *Cvr1*; к бактериальной пятнистости – *Bs3*.

По результатам оценки материала выявлены образцы с маркерами устойчивости к корневым нематодам (к мелойдогинозу): *C. annuum* Л-97, Златозар, Шоколадная красавица, Л-160-10, Фиолетовый красавец и др., к фитофторе плодов: *C. annuum* Златозар, *C. chinense* Хабанеро, *C. baccatum*

Маленький принц; к корневым гнилям, вызываемым *Phytophthora capsici* – *C. annuum* МТПЕ053, МТПЕ137, МТПЕ154, МТПЕ204, МТПЕ209, *C. chinense* Огненная дева, Хабанеро; к антракнозу: *C. chinense* Огненная дева, Хабанеро; к Y вирусу картофеля: *C. annuum* ZongKao, F<sub>2</sub> Премьер, F<sub>2</sub> Валентина, F<sub>2</sub> Корнелия, к вирусу огуречной мозаики: *C. chinense* Огненная дева; к вирусу пятнистого увядания TSWV: *C. chinense* Хабанеро; к вирусу крапчатости сосудов чили: *C. annuum* Златозар, ZongKao, Требия F<sub>2</sub>, Джемини F<sub>2</sub>, МТПЕ 006, МТПЕ 196, *C. baccatum* Маленький принц, *C. chinense* Огненная дева, Хабанеро; к бактериальной пятнистости: образцы европейской селекции EVA\_Ca\_№20, 26, 111, 128 и др. На рис. 3 представлены примеры ДНК-типирования образцов по генам, связанным с устойчивостью к Y вирусу картофеля (А), вирусу крапчатости сосудов чили (Б), мелойдогинозу (В), вирусу огуречной мозаики (Г).

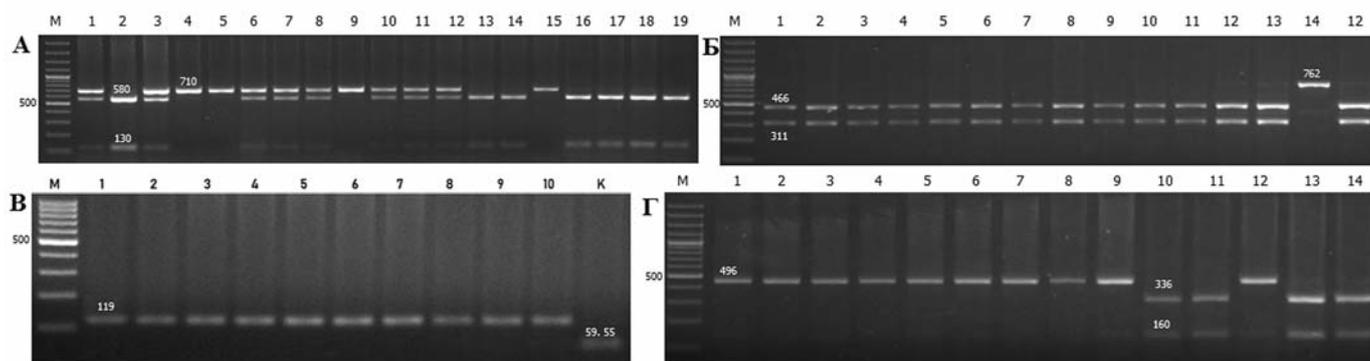


Рис. 3. ДНК-типирование аллелей устойчивости к болезням у форм перца: гена *pvr1* (А), гена *Cvr1* (Б), гена *Me1* (В), гена *Cmr1* (Г)  
 Fig. 3. DNA typing of disease resistance alleles in pepper varieties: *pvr1* gene (A), *Cvr1* gene (B), *Me1* gene (C), *Cmr1* gene (D)

Второй группой маркеров, связанной с общей устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам, являются маркеры аллелей, участвующих в регуляции накопления антоцианов в растениях. В таблице 3 представлены апробированные и разработанные маркеры, позволяющие выделять формы с накоплением / отсутствием халкон-нарингенина (SCAR MYB12-603del) и антоцианов (CAPS и SCAR маркеры к генам *Ant1*, *An2*, *ATV*, *An2-like*) в плодах.

В представленных ранее наших исследованиях на основе данных молекулярного маркирования аллелей генов *Ant1*, *An2*, *atv* в популяциях F<sub>2</sub>-F<sub>3</sub> изучаемых гибридов и оценки фенотипического проявления признаков на различных этапах онтогенеза, связанных с накоплением антоцианов в растениях, показаны высокая эффективность разработанных молекулярных маркеров, тесное сцепление аллелей генов *Ant1* и *An2* (*Ant1* и *An2-Aft*, *ant1* и *Myb75*). Подтверждено повышение накопления антоцианов в плодах и вегетативных органах при усилении потока солнечного света, а также при понижении температуры в конце вегетационного периода. Выявлены особенности накопления антоцианов в растениях томата в зависимости от аллелей генов *Ant1*, *An2*, *Atv*. Показано максимальное накопление антоцианов в вегетативных органах и плодах у образцов с аллелями *Ant1/An2-Aft/atv* в генотипе [21].

Наряду с описанными ранее, в таблице 3 представлены маркеры к аллелям гена *An2-like*, разработанные по результатам секвенирования данного гена у форм с различным накоплением антоцианов в кожице плодов, которые позволяют разделить образцы с высоким и низким накоплением антоцианов. Данный ген входит в комплекс генов R2R3Myb транскрипционных факторов и тесно сцеплен с геном *Ant1*. На рис. 4 показаны результаты ДНК-типирования форм томата с высоким (Октябрьята, Бурштын, Дзівосны: №1-6), и низким накоплением антоцианов (ИСИ63, Дачный: №7-10) в плодах с помощью SCAR маркера S1An2-like и dCAPS S1An2-like-Aval маркера. SCAR маркер подобран к области гена, охватывающей делеции 3 и 6 п.н. в четвертом экзоне, приводящие к выпадению трех аминокислот в белке. Маркер dCAPS S1An2-like-Aval подобран к SNP-замене C/A в третьем экзоне, приводящей к аминокислотной замене лейцина у диких форм (без накопления антоциана) на метионин у форм с фенотипом Aft. Данная замена расположена в области второго ДНК-связывающего домена синтезируемого белка. Считаем, что данная замена, а также выпадение трех аминокислот вносят вклад в функциональность синтезируемого протеина и, как следствие, в регуляцию накопления антоцианов в плодах.

Таблица 3. Наименование и характеристика маркеров, связанных с накоплением антоцианов, используемых для ДНК-типирования образцов *S. lycopersicum*

Table 3. Name and characteristics of markers associated with anthocyanin accumulation, used for the DNA typing of *S. lycopersicum* samples

Ген	Тип и название маркера	Праймеры для ПЦР	Т отжига, °C	Размер ПЦР продукта, п.н.	Литературный источник
<i>SlMyb12</i>	SCAR, MYB12-603del -aF1/aR6 и MYB12-603del -aF1/aR5	F1: GTGACGAACAACCGAACCTAGAAATAA R5: ATTCTAGCGTTATCAGTCGGCATACA R6: GCGGACAAAGTTAATTGGTCACTCA	60	Y - 950, 614; y - 347	Veerappan K. et al., 2016
<i>Ant1</i>	CAPS, Ant1-NcoI	F: GGAAGGACAGCTAACGATGTG; R: GTTGCATGGGTGTTAAATTAAG	55	<i>Ant1</i> - 478; <i>ant1</i> - 271, 207	Sapir M. et al., 2008
<i>Ant1</i>	SCAR, Ant1.1(FAM)	F: TTCATTGGGAGTGAGAAAAGGTT R(FAM): AACCTGCATGCCTGTTGCCTA	58	<i>Ant1</i> - 340; <i>ant1</i> - 344	Babak O.G. et al., 2024
<i>An2-Aft</i>	SCAR, An2-AFT	F: ATTACAAGTGTCAATTTGTGGAAAG R (FAM): AAACCTTTGAATGAAATAATTGC	51	<i>An-Aft</i> - 661; <i>Myb75</i> - 647; <i>Ant-Ins</i> - 659	Бабак. О.Г. и др., 2024
<i>An2-Aft</i>	SCAR, An2-4	F: ACTTCACAAACTCTTAGGCAATAG R: AGTCTACCAGCAATAAGTGACCAC	61	<i>An-Aft</i> - 186; <i>Myb75</i> - 580; <i>Ant-Ins</i> - 647	Бабак. О.Г. и др., 2024
<i>An2-Like</i>	SCAR, S1An2-like	F: ACACACACCTACACAAGAAGTT R: GTTGTTCGTCATCTTTGTCTAAT	58	<i>Aft</i> - 204 <i>wt</i> - 213	
	dCAPS, S1An2-like-Aval	F: CGTTCACCCACAAATCCCC R: AAGTCTCAAAATGAGATCTATTTTCATCCC	59	<i>Aft</i> - 161 <i>wt</i> - 131	
<i>ATV</i>	SCAR, ATV-In	F(FAM): GAGGTTTCTCGTTGGTAGTC R: CTAATAAAAAGTTATTGAGTTCACG	53	<i>Atv</i> - 81; <i>atv</i> - 85	Сяо Х. et al., 2017
	SCAR, Atv2	F: GTTGGATAAGTAAGAATGTTGTAGA R: CTTCTGAAAGTACATAAAACCACA	55	<i>Atv</i> - 460; <i>atv</i> - 852	Бабак. О.Г. и др., 2024

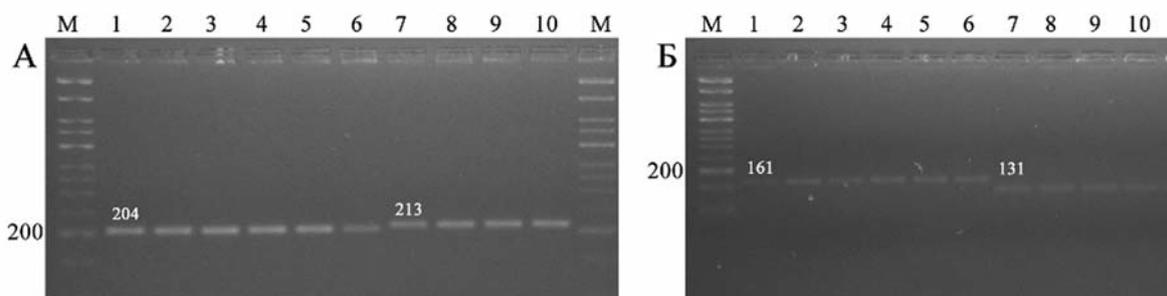


Рис. 4. ДНК-типирование аллелей гена *An2-like* с помощью маркеров *S1An2-like* и *S1An2-like-Aval* у форм томата  
Fig. 4. DNA typing of *An2-like* gene alleles using *S1An2-like* and *S1An2-like-Aval* markers in tomato forms

Таблица 4. Наименование и характеристика маркеров, используемых для ДНК-типирования образцов *C. annuum*  
 Table 4. Name and characteristics of markers used for the DNA typing of *C. annuum* samples

Ген, полиморфизм	Тип и название маркера	Праймеры для ПЦР	Т отжига, °С	Размер ПЦР продукта, п.н.	Литературный источник
<i>Myb113-like1</i> , delT	CAPS, Myb113-Accl F / R	F: ATGCAGATGGTCACTTATGGCT R: ATGAATTTTTGAACCCCTACAGCAA	60	<i>Aft</i> - 589, 25; <i>delT</i> - 393, 195, 25	Бабак О.Г. и др., 2019
<i>Myb113-like1</i> , prom <i>Ins148</i>	SCAR, Myb113-like1-prom <i>Ins148</i> F / R	F: TCCGCCCTCGTTAATTT R: AGCAGGAACAAGATGCCACT	55	<i>Aft</i> - 700; <i>Ins 148</i> - 848	Бабак О.Г. и др., 2022
<i>Myb113-like1</i> , prom <i>Ins2</i>	SCAR, Prom <i>Ins2</i> -F(FAM)/R,	F: TTTTAATATTACGTTAATTTGGGAACG FAM R: AATTAGCCGGTTAGCCTCA	59	<i>promIns 2</i> - 241; без вставки - 239	Бабак О.Г. и др., 2022
<i>Myb113-like2</i> , SNP C/A	dCAPS, Myb113-Acic F / R	F(FAM): AAAGTACAATACTGCCCTCAAGATCACCG R: GACGACGTTTCACTTGTGAGC	60	<i>Aft</i> (C) - 170, 28; <i>wt</i> (A) - 198	Бабак О.Г. и др., 2019
<i>MYB-like ETC3-2</i> , del C и SNP C/G	CAPS, OGF_Pagl	F: AGCTATGCTTCACTAGCTCACC R: TCACTGCCTCTTTCGCATCT	60	<i>Aft</i> - 284 и 61; <i>wt</i> - 345	

В таблице 4 представлены маркеры, разработанные к генам *Myb113-like1* и *Myb113-like2* перца, являющимся аналогами томатному гену *Ant1*. Ранее представлено описание полиморфизма данных генов, выявленно по результатам секвенирования, и его связи с фенотипом *Aft* (накопление антоцианов в плодах на стадии технической спелости, а также в вегетативных органах, чаще всего в междоузлиях стебля и жилках листьев) [22, 23]. Как правило, фенотип *Aft* характерен для форм со следующими размерами маркируемых областей у гена *Myb113-like1*: 589 п.н. и 25 п.н. (CAPS маркер *Myb113-Accl*), а также 700 п.н. (SCAR, *Myb113-like1-promIns148*); у гена *Myb113-like2* – 170 п.н. и 28 п.н. (dCAPS маркер *Myb113-Acic*) [22-24], рис.5 А, Б, В.

В настоящее время основное количество возделываемых сортов перца не накапливают антоцианы в плодах, при этом у большинства из них наблюдается накопление антоцианов в междоузлиях стебля. В нашей изучаемой коллекции накопление антоцианов в междоузлиях стебля не зависело от описанных выше полиморфизмов генов *Myb113-like1* и *Myb113-like2*. При этом в последовательности гена *Myb113-like1* сорта

Златозар, фенотип которого характеризовался полным отсутствием антоцианов в плодах и вегетативных органах, обнаружена наряду с описанными выше маркируемыми полиморфизмами, нарушающими синтез антоцианов, инсерция размером 2 п.н. в промоторной области [24]. Для типирования данной инсерции разработан ДНК-маркер *MYB113-like1-promIns2*, для чего были подобраны праймеры *PromIns2-F(FAM)/R* (табл.4). Отличным от других образцов в изучаемой коллекции был сорт *Блондин*, который по разработанным маркерам характеризовался наличием аллелей генов *Myb113-like1* и *Myb113-like2* без нарушения синтеза антоцианов и, предположительно, мог проявлять фенотип *Aft*, при этом он характеризовался полным отсутствием синтеза антоцианов во всех частях растения. Данный сорт также характеризовался бледно-зеленой окраской вегетативных органов и светлой оранжево-красной окраской плодов. Такие фенотипические признаки могут говорить о возможных нарушениях в генотипе, связанных с синтезом пигментов в целом.

Наряду с поиском генов-гомологов *Ant1* томата, у перца был осуществлен поиск гена-гомолога *ATV*

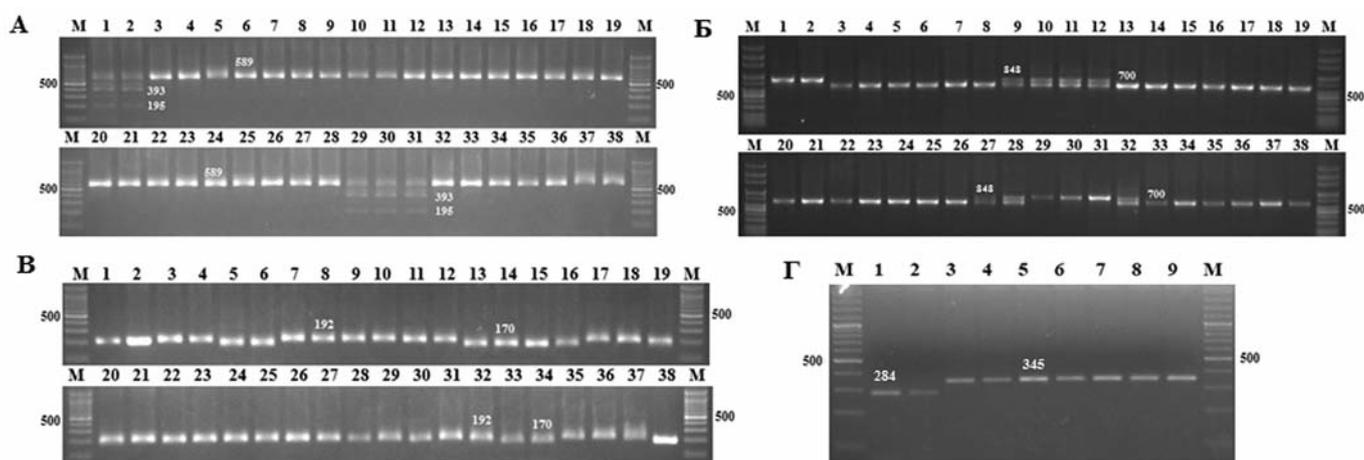


Рис. 5. ДНК-типирование аллелей генов, связанных с накоплением антоцианов у перца: *Myb113-like1-delT/TT*(А), *Myb113-like1-promIns148*(Б), *Myb113-like2-(C/A)* (В), *ETC3-2* (Г)  
 Fig. 5. DNA typing of gene alleles associated with anthocyanin accumulation in pepper: *Myb113-like1-delT/TT* (A), *Myb113-like1-promIns148* (B), *Myb113-like2-(C/A)* (C), *ETC3-2* (D)

(*Atroviolaceae*). Одним из выделенных генов - кандидатов является ген *ETC3-2 MYB-like* ТФ *ETC3-2* (GenBank - XM\_016723933). По результатам секвенирования последовательностей данного гена у представителей рода *Capsicum* у формы с максимальным накоплением антоцианов в вегетативных органах, венчике цветка и плодах (OGF) выявлены отличные от других образцов изменения в структуре гена *ETC3-2*: однонуклеотидная делеция (*del C*) и SNP-замена C/G перед стартом кодоном в первом экзоне гена (м-РНК XM\_016723933), приводящие к образованию более раннего стартового кодона, а также однонуклеотидная делеция в первом экзоне (*del T*), приводящая к сдвигу рамки считывания и образованию раннего стоп-кодона во втором экзоне. Данные изменения приводят к формированию новой короткой белковой последовательности и нарушению функций гена, в результате чего возможно активное накопление антоцианов во всех частях растения. Для выявления полиморфизма, связанного с высоким накоплением антоцианов в вегетативных и генеративных органах к *del C* и SNP C/G разработан CAPS маркер OGF\_PagI (табл. 4). На рис. 5 Г показаны размеры маркируемых фрагментов: у образца OGF – 284 п.н., у форм с ненарушенной последовательностью гена – 345 п.н.

### Заключение

По результатам апробации и верификации выделен комплекс наиболее эффективных представленных в литературе ДНК-маркеров, связанных с устойчивостью к возбудителям грибных, бактериальных, вирусных инфекций и нематодам у томата и перца. Отобраны образцы, являющиеся донорами аллелей резистентности к возбудителям болезней.

На основании оценки полиморфизма генов MYB транскрипционных факторов, связанных с регуляцией накопления флавоноидов (халкон-нарингенина, антоцианов), разработаны молекулярные маркеры, позволяющие дифференцировать образцы томата и перца по накоплению антоцианов в плодах и вегетативных органах. Представлены результаты разработки новых молекулярных маркеров, связанных с накоплением антоцианов у томата к аллелям гена *An2-like* и у перца к аллелям гена *ETC3-2*. С применением системы разработанных ДНК-маркеров выделены образцы для использования в селекционном процессе, направленном на повышение устойчивости к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды.

### Литература

1. Biotechnology and plant disease management / ed. by Z.K.Punja, S.H.De Boer, H.Sanfaçon / Biddles Ltd, King's Lynn, UK. 2007. 574 p
2. Lee J.M., Oh C., Yeom I. Molecular Markers for Selecting Diverse Disease Resistances in Tomato Breeding Programs. *Plant Breeding and Biotechnology*. 2015;(3):308-322. <https://doi.org/10.9787/PBB.2015.3.4.308>
3. Truong H.T.H., Choi H., Cho M.C., Lee H.E., Kim J.H. Use of Cf-9 gene-based markers in marker-assisted selection to screen tomato cultivars with resistance to *Cladosporium fulvum*. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 2011;(52):204–210. <https://doi.org/10.1007/s13580-011-0164-y>
4. Kang W., Hoang N., Yang H., Kwon J., Jo S., Seo J., Kim K., Choi D., Kang B. Molecular mapping and characterization of a single dominant gene controlling CMV resistance in peppers (*Capsicum annuum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 2010;(120):1587–1596. <https://doi.org/10.1007/s00122-010-1278-9>
5. Uncu A.T., Celik I., Devran Z., Ozkaynak E., Frary A., Frary A., Doganla S. Development of SNP-based CAPS assay for the Me1 gene conferring resistance to root knot nematode in pepper. *Euphytica*. 2015;(206):393–399. <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1489-x>
6. Kim H., Nahm S., Lee H., Yoon G., Kim K., Kang B., Choi D., Kweon O.Y., Cho M., Kwon J., Han J., Kim J., Park M., Ahn J.H., Choi S.H., Her N.H., Sung J., Kim B. BAC-derived markers converted from RFLP linked to *Phytophthora capsici* resistance in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Theor. Appl. Genet.* 2008;(118):15–27.
7. ChunYing S., Li M., Hai Z., Alainb P., Haoa W., Xi Z. Resistances to anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) of Capsicum mature green and ripe fruit are controlled by a major dominant cluster of QTLs on chromosome P5. *Scientia Horticulturae*. 2015;(181):81-88. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.033>
8. Paran I., Benarous S., Ashkenazi V. Disease resistant pepper plants. Hazera Genetics Ltd, The Agricultural Research Organization. Volcani Center, 2009. Patent WO2009098685 A2
9. Lee H.R., An H.J., You Y.G., Lee J., Kim H.J., Kang B.C., Harn C.H. Development of a novel codominant molecular marker for Chili vein mottle virus resistance in *Capsicum annuum* L. *Euphytica*. 2013;(193):197–205.
10. Quirin E.A., Ogundiwon E.A., Prince J.P., Mazourek M., Briggs M.O., Chlanda T.S., Kim K., Falise M., Kang B., Jahn M.M. Development of sequence characterized amplified region (SCAR) primers for the detection of Phyto.5.2, a major QTL for resistance to *Phytophthora capsici* Leon. in pepper. *Theor. Appl. Genet.* 2005;(110):605–612. <https://doi.org/10.1007/s00122-004-1874-7>
11. Özkaynak E., Devran Z., Kahveci E., Doğanlar S., Başköylü B., Doğan F., İşleyen M., Yüksel A., Yüksel M. Pyramiding Multiple Genes for Resistance to PVY, TSWV and PMMoV in Pepper Using Molecular Markers. *Euro. J. Hort. Sci.* 2014;79(4):233–239.

12. Römer P., Jordan T., Lahaye T. Identification and application of a DNA-based marker that is diagnostic for the pepper (*Capsicum annuum*) bacterial spot resistance gene Bs3. *Plant Breed.* 2010;(129):737–740. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2009.01750.x>
13. Бабак О.Г., Некрашевич Н.А., Анисимова Н.В., Дрозд Е.В., Яцевич К.К., Кильчевский А.В. Технология маркер-сопутствующего отбора форм томата с высокими биохимическими и технологическими свойствами плодов: методические рекомендации. Минск: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь; Национальная академия наук Беларуси; Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси Право и экономика, 2023. 74 с.
14. Игнатова С.И., Бабак О.Г., Багирова С.Ф. Создание высококопиновых гибридов томата для теплиц с использованием традиционных методов селекции и молекулярных маркеров. *Овощи России*. 2020;(5):22-28. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-5-22-28> <https://elibrary.ru/avqfuj>
15. Бабак О.Г., Дрозд Е.В., Некрашевич Н.А., Анисимова Н.В., Яцевич К.К., Баева И.Е., Пугачева И.Г., Французенок А.В., Добродькин М.М., Кильчевский А.В. Оценка и применение молекулярных маркеров в селекции на устойчивость томата (*Solanum lycopersicum* L.) к фитофторе (*Phytophthora infestans*). *Молекулярная и прикладная генетика*. 2021;(31):22-30. <https://doi.org/10.47612/1999-9127-2021-31-22-30> <https://elibrary.ru/kgdhdp>
16. Liu Y., Tikonov Y., Schouten R.E., Marcelis L., Visser R., Bovy A. Anthocyanin biosynthesis and degradation mechanisms in Solanaceous Vegetables: a review. *Frontiers in Chemistry*. 2018;6(52):1–17. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00052>
17. Bassolino L., Zhang Y., Schoonbeek H.J., Kiferle C., Perata P., Martin C. Accumulation of anthocyanins in tomato skin extends shelf life. *New Phytol.* 2013;200(3):650-655. <https://doi.org/10.1111/nph.12524>
18. Zhang Y., Butelli E., De Stefano R., Schoonbeek H.J., Magusin A., Pagliarani C., Wellner N., Hill L., Orzaez D., Granell A., Jones J.D., Martin C. Anthocyanins double the shelf life of tomatoes by delaying overripening and reducing susceptibility to gray mold. *Curr. Biol.* 2013;23(12):1094-100. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.072>
19. Sapir M., Oren-Shamir M., Ovadia R., Reuveni M., Evenor D., Tadmor Y., Nahon S., Shlomo H., Chen L., Meir A., Levin I. Molecular Aspects of Anthocyanin fruit Tomato in Relation to high pigment-1. *Journal of Heredity*. 2008;99(3):292–303. <https://doi.org/10.1093/jhered/esm128>
20. Cao X., Qiu Z., Wang X., Van Giang T., Liu X., Wang J., Wang X., Gao J., Guo Y., Du Y., Wang G., Huang Z. A putative R3 MYB repressor is the candidate gene underlying atroviolacium, a locus for anthocyanin pigmentation in tomato fruit. *J. Exp. Bot.* 2017;68(21-22):5745-5758. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx382>
21. Бабак О.Г., Дрозд Е.В., Некрашевич Н.А., Анисимова Н.В., Яцевич

К.К., Кильчевский А.В. Разработка молекулярных маркеров накопления антоцианов в плодах и изучение особенностей взаимодействия генов *Ant1*, *An2* и *Atv* у *Solanum lycopersicum*. *Молекулярная и прикладная генетика*. 2024;(36):7-23. <https://elibrary.ru/gdbfhn>

22. Бабак О.Г., Некрашевич Н.А., Никитинская Т.В., Яцевич К.К., Кильчевский А.В. Изучение полиморфизма генов Myb-факторов на основе сравнительной геномики овощных пасленовых культур (томат, перец, баклажан) для поиска ДНК-маркеров, дифференцирующих образцы по накоплению антоцианов. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2019;63(6):721-729. – <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-721-729> <https://elibrary.ru/bmbsqh>

23. Babak O., Nikitinskaya T., Nekrashevich N., Yatsevich K., Kilchevsky A. Identification of DNA Markers of Anthocyanin Biosynthesis Disorders Based on the Polymorphism of Anthocyanin 1 Tomato Ortholog Genes in Pepper and Eggplant. *Crop Breed Genet Genom*. 2020;2(3):e200011. <https://doi.org/10.20900/cbagg20200011>

24. Бабак О.Г., Никитинская Т.В., Некрашевич Н.А., Яцевич К.К., Дрозд Е.В., Фатеев Д.А., Беренсен Ф.А., Артемьева А.М., Кильчевский А.В. Изучение полиморфизма генов R2R3MYB транскрипционных факторов культур семейства Solanaceae и гена Myb114 рода *Brassica* в связи с регуляцией биосинтеза антоцианов. *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2022;66(4):414-424. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-4-414-424> <https://elibrary.ru/fuwvcwf>

#### • References

13. Babak O.G., Nekrashevich N.A., Anisimova N.V., Drozd E.V., Yatsevich K.K., Kilchevsky A.V. Technology of marker-assisted selection of tomato forms with high biochemical and technological properties of fruits: methodological recommendations. Minsk: Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus; National Academy of Sciences of Belarus; Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus Law and Economics, 2023. 74 p. (In Russ.)

14. Ignatova S.I., Babak O.G., Bagirova S.F. Development of high-lycopene tomato hybrids using conventional breeding techniques and molecular markers. *Vegetable crops of Russia*. 2020;(5):22-28. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2020-5-22-28> <https://elibrary.ru/avqfuj> (In Russ.)

15. Babak O.G., Drozd E.V., Nekrashevich N.A., Anisimova N.V., Yatsevich K.K., Bayeva I.E., Pugachova I.G., Frantsuzionak A.V., Dobrodkin M.M., Kilchevsky A.V. Assessment and application of molecular markers in breeding for the resistance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to late blight (*Phytophthora infestans*). *Molecular and Applied Genetics*. 2021;(31):22-30. <https://doi.org/10.47612/1999-9127-2021-31-22-30> <https://elibrary.ru/kgdhdp> (In Russ.)

21. Babak O.G., Drozd E.V., Nekrashevich N.A., Anisimova N.V., Yatsevich K.K., Kilchevsky A.V. Development of molecular markers for the accumulation of anthocyanins in fruits and studying the specifics of *Ant1*, *An2* and *Atv* gene interaction in *Solanum lycopersicum*. *Molecular and Applied Genetics*. 2024;(36):7-23. <https://elibrary.ru/gdbfhn> (In Russ.)

22. Babak O.G., Nekrashevich N.A., Nikitinskaya T.V., Yatsevich K.K., Kilchevsky A.V. Study of the Myb-factor polymorphism based on comparative genomics of vegetable Solanaceae crops (tomato, pepper, eggplant) to search for DNA markers that differentiate samples by the anthocyanins accumulation. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2019;63(6):721-729. – <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-721-729> <https://elibrary.ru/bmbsqh> (In Russ.)

24. Babak O.G., Anisimova N.A., Nikitinskaya T.V., Nekrashevich N.A., Yatsevich K.K., Drozd L.V., Fateev D.A., Berensen F.A., Artemyeva A.M., Kilchevsky A.V. Investigating of the polymorphism of Solanaceae R2R3 Myb and Brassica Myb114 genes of transcription factors in connection with the anthocyanin biosynthesis regulation. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022;66(4):414-424. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-4-414-424> <https://elibrary.ru/fuwvcwf> (In Russ.)

#### Об авторах:

**Ольга Геннадьевна Бабак** – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, SPIN-код: 8702-4355, <https://orcid.org/0000-0002-1087-9472>,

автор для переписки, O.Babak@igc.by, babak\_olga@mail.ru

**Елизавета Валерьевна Дрозд** – младший научный сотрудник лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0005-7208-0809>, E.drozd@igc.by

**Наталья Александровна Некрашевич** – научный сотрудник лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, SPIN-код: 8288-8067, <https://orcid.org/0000-0002-4707-6497>, n.nekrashevich@igc.by

**Наталья Владимировна Анисимова** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, SPIN-код: 3000-1523, <https://orcid.org/0009-0007-6790-8864>, n.anisimova@igc.by

**Констанция Константиновна Яцевич** – научный сотрудник лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, k.yatsevich@igc.by, <https://orcid.org/0009-0001-7040-4671>

**Павел Владимирович Шестерень** – студент магистратуры Университета Национальной академии наук Беларуси, <https://orcid.org/0009-0003-6022-8285>, Shesteren.P@yandex.by

**Ирина Евгеньевна Баева** – кандидат с.-х. наук, зав. учебно-научно-исследовательской генетической лабораторией Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 8736-7550, <https://orcid.org/0000-0003-1933-5591>, irynabayeva27@mail.ru

**Наталья Александровна Невестенко** – кандидат с.-х. наук, старший преподаватель кафедры сельскохозяйственной биотехнологии, экологии и радиологии Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 1917-9851, <https://orcid.org/0000-0002-8278-9804>, natallia.nevestenko@gmail.com

**Ирина Геннадьевна Пугачёва** – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры сельскохозяйственной биотехнологии, экологии и радиологии Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 3875-8999, <https://orcid.org/0000-0001-8329-7468>, puhachova.irina@gmail.com

**Михаил Михайлович Добродькин** – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры сельскохозяйственной биотехнологии, экологии и радиологии Белорусской государственной сельскохозяйственной академии, SPIN-код: 2238-2173, <https://orcid.org/0000-0003-2702-1226>, dobro\_1962@mail.ru

**Александр Владимирович Кильчевский** – академик НАН Беларуси, доктор биологических наук, профессор, научный руководитель лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, SPIN-код: 2496-4294, <https://orcid.org/0000-0002-0175-9786>, kilchev@presidium.bas-net.by

#### About the Authors:

**Olga G. Babak** – Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Ecological Genetics and Biotechnology, Institute of Genetics and Cytology of National Academy of Science of Belarus, SPIN-code: 8702-4355,

<https://orcid.org/0000-0002-1087-9472>,

Corresponding Author, babak\_olga@mail.ru, o.babak@igc.by

**Elizaveta V. Drozd** – Junior Researcher of the Laboratory of Ecological Genetics and Biotechnology, Institute of Genetics and Cytology of National Academy of Science of Belarus, <https://orcid.org/0009-0005-7208-0809>, e.drozd@igc.by

**Natalya A. Nekrashevich** – Researcher of the Laboratory of Ecological Genetics and Biotechnology, Institute of Genetics and Cytology of National Academy of Science of Belarus, SPIN-code: 8288-8067, <https://orcid.org/0000-0002-4707-6497>, n.nekrashevich@igc.by

**Natalya V. Anisimova** – Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Laboratory of Ecological Genetics and Biotechnology, Institute of Genetics and Cytology of National Academy of Science of Belarus, SPIN-code: 3000-1523, <https://orcid.org/0009-0007-6790-8864>

**Kanstantsiya K. Yatsevich** – Researcher of the Laboratory of Ecological Genetics and Biotechnology, Institute of Genetics and Cytology of National Academy of Science of Belarus, <https://orcid.org/0009-0001-7040-4671>, k.yatsevich@igc.by

**Pavel V. Shesteren** – Master's degree student, University of the National Academy of Sciences of Belarus, <https://orcid.org/0009-0003-6022-8285>, Shesteren.P@yandex.by

**Iryna E. Bayeva** – Cand. Sci. (Agriculture), Chief of the Academic-scientific-investigation Genetics Laboratory, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 8736-7550, <https://orcid.org/0000-0003-1933-5591>, irynabayeva27@mail.ru

**Natalya A. Nevestenko** – Cand. Sci. (Agriculture), Senior Lecturer of the Department of the Agricultural Biotechnology, Ecology and Radiology, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 1917-9851, <https://orcid.org/0000-0002-8278-9804>, natallia.nevestenko@gmail.com

**Iryna G. Puhachova** – Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Department of the Agricultural Biotechnology, Ecology and Radiology, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 3875-8999, <https://orcid.org/0000-0001-8329-7468>, puhachova.irina@gmail.com

**Mihail M. Dobrodin** – Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Belarusian State Agricultural Academy, SPIN-code: 2238-2173, <https://orcid.org/0000-0003-2702-1226>, dobro\_1962@mail.ru

**Alexander V. Kilchevsky** – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Biology), Professor, Scientific Director of the Laboratory of Environmental Genetics and Biotechnology, Institute of Genetics and Cytology of National Academy of Science of Belarus, SPIN-code: 2496-4294, <https://orcid.org/0000-0002-0175-9786>, kilchev@presidium.bas-net.by