

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ГЕНЕТИКИ И ЦИТОЛОГИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 631.527.5 : 635.64 : 547.973 : 547.979.8

ДРОЗД
Елизавета Валерьевна

**ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАРКЕР-АССОЦИИРОВАННОЙ
СЕЛЕКЦИИ ФОРМ ТОМАТА (*SOLANUM LYCOPERSICUM L.*)
С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ АНТОЦИАНОВ И
КАРОТИНОИДОВ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

по специальности 03.01.07 – молекулярная генетика

Минск, 2025

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларусь»

Научный руководитель: **Кильчевский Александр Владимирович**

доктор биологических наук, профессор, академик НАН Беларусь, заместитель Председателя Президиума НАН Беларусь

Официальные
оппоненты:

Падутов Владимир Евгеньевич
доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларусь, заведующий научно-исследовательским отделом генетики, селекции и биотехнологии Института леса НАН Беларусь

Лемеш Валентина Александровна
кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией прикладной геномики Института генетики и цитологии НАН Беларусь

Оппонирующая
организация:

Государственное научное учреждение «Центральный ботанический сад НАН Беларусь»

Защита состоится 24.12.2025 г. в 10³⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.31.01 при Государственном научном учреждении «Институт генетики и цитологии НАН Беларусь» по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 27.

Тел.: (+375 17) 305-34-10, факс (+375 17) 378-19-17, e-mail: O.Orlovskaya@igc.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института генетики и цитологии НАН Беларусь.

Автореферат разослан « 18 » ноября 2025 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат биологических наук, доцент

О.А. Орловская

ВВЕДЕНИЕ

Флавоноидные и каротиноидные соединения относятся к вторичным метаболитам растений терпеноидной и фенольной природы, которые выполняют сигнальные и защитные функции, обеспечивая широкую степень приспособленности к воздействию абиотических и биотических факторов среды. Изучение закономерности регулирования процессов биосинтеза флавоноидов и каротиноидов позволяет вести поиск и анализ генетических последовательностей, контролирующих данные процессы, а также подбор ДНК-маркеров для выявления фенотипических различий, связанных с накоплением флавоноидов и каротиноидов [Бабак и др., 2019; Shcherban, 2019; Southon, 2000].

Изучение особенностей накопления флавоноидов и каротиноидов в растениях является актуальным направлением в связи с потребностью создания продуктов питания с высокими антиоксидантными свойствами. Томат (*Solanum lycopersicum* L.) характеризуется высокой степенью изменчивости в накоплении флавоноидов и каротиноидов, которые относятся к группе биологически активных веществ. Кроме того, плоды томата характеризуются низкой калорийностью. Сочетание данных характеристик делает томат важной культурой для производства функциональных продуктов питания [Пугачева и др., 2020].

В связи с этим, изучение генетики взаимодействия различных групп генов, регулирующих биосинтез флавоноидов и каротиноидов у гибридов F₁, и поиск новых аллелей, определяющих биохимический состав плодов, а также подбор родительских форм с комбинациями аллелей, обеспечивающих максимальное накопление наиболее ценных форм флавоноидов и каротиноидов на фоне высокой урожайности и устойчивости к патогенам, представляет интерес и актуальность.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Диссертационное исследование выполнено в рамках задания 2.1.1 «Генетические основы взаимосвязи накопления каротиноидов и флавоноидов у пасленовых культур» государственной программы научных исследований «Биотехнологии–2» на 2021–2025 годы, подпрограммы «Геномика, эпигеномика, биоинформатика» (2021–2023 гг., № ГР 20210376); а также мероприятия 1 «Создать гибрид томата для защищенного грунта с высокими антиоксидантными свойствами, обусловленными накоплением антоцианов и каротиноидов» государственной программы «Наукомкие технологии и техника» на 2021–2025 годы подпрограммы «Иновационные биотехнологии» (2021–2023 гг.,

№ ГР 20213642); в рамках грантов НАН Беларуси «Генетические основы маркер-ассоциированной селекции форм *Solanum lycopersicum* с повышенным содержанием каротиноидов и антоцианов» (2023 г., № ГР 20230872); «Генетические основы маркер-ассоциированного отбора форм *Solanum lycopersicum* с повышенным содержанием каротиноидов и антоцианов» (2024 г., № ГР 20241226).

Диссертация соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, отраженным в пунктах 2 «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии и производства» и 5 «Агропромышленные и продовольственные технологии» Указа Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156.

Цель и задачи исследования. Цель диссертационного исследования – изучить изменчивость генов, определяющих накопление антоцианов и каротиноидов в плодах томата, и разработать методики молекулярного маркирования ценных аллелей качества плодов для подбора исходного материала и создания высокопродуктивных гибридов F₁ томата с высоким содержанием антоцианов и каротина.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить изменчивость последовательности генов, регулирующих накопление антоцианов (*Ant1*, *An2*, *Atv*), каротиноидов (*LCY-E*) и гена, определяющего характер распределения пигментов в плодах (*GLK2*) у форм томата с различным фенотипическим проявлением признаков накопления антоцианов и каротиноидов в вегетативных органах и плодах.

2. Отобрать родительские формы и создать гибриды F₁ томата с различным сочетанием аллелей генов, регулирующих биосинтез антоцианов: халконсингтазы (*SiMyb12*), R2R3Myb-активаторов (*Ant1*, *An2*) и R3Myb-активатора (*Atv*); структурных генов биосинтеза каротиноидов: каротиноидной изомеразы (CRTISO – аллель *t*) и ликопин-бета-циклизы (NSY – *B*, *b*, *og^c*), а также аллеля *hp-2^{dg}* гена *DET1* (увеличивающего общее количество пигментов), гена *GLK2* (определяющего характер распределения пигментов в плодах) и комплексом аллелей генов устойчивости к ряду возбудителей болезней.

3. Провести оценку созданных гибридов F₁ и статистическую обработку полученных данных по биометрическим признакам роста и развития растений, урожайности, содержанию антоцианов и каротина в плодах; установить закономерности проявления эффекта гетерозиса, характер наследования изучаемых признаков.

4. Отобрать из популяций F₂–F₃ методами маркер-ассоциированной селекции формы с комплексом интересуемых аллелей генов *Ant1*, *An2*, *Atv*, *GLK2* для создания нового селекционного материала и оценки влияния выявленных полиморфизмов изучаемых генов на фенотип.

Объект исследования. Линии и популяционный материал с различным фенотипическим проявлением признаков окраски вегетативных органов и плодов томата из коллекции Института генетики и цитологии НАН Беларуси, созданные на основе маркер-сопутствующей селекции и 40 гибридных комбинаций, полученных на основе трех схем гибридизации.

Предмет исследования. Полиморфизмы генов, определяющих биохимические качества плодов; особенности наследования признаков «общее накопление антоцианов» и «общее накопление каротина» в плодах в зависимости от комбинации различных аллелей генов.

Научная новизна работы заключается в разработке ДНК-маркеров для идентификации ряда аллелей структурных и регуляторных генов, определяющих накопление антоцианов и каротиноидов в плодах, в определении сочетаний аллелей этих генов, позволяющих создавать формы с различным (в том числе максимальным) накоплением изучаемых вторичных метаболитов у томата.

Впервые установлен характер наследования признаков «общее накопление антоцианов» и «общее накопление каротина» у гибридов F_1 , а также особенности проявления гетерозиса изучаемых признаков.

Выявлен ранее неописанный аллель *U-del52* гена *GLK2*, который зарегистрирован в международной базе данных GenBank (Регистрационный номер в GenBank: OQ411621).

Создан ценный исходный материал для селекции томата на повышение антиоксидантных и вкусовых качеств плодов. Получены высокоурожайные гетерозисные гибриды томата для закрытого грунта, обладающие различными комплексами ценных аллелей генов качества плодов и устойчивости к возбудителям болезней. Гибрид F_1 Спатканне включен в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений с 2025 года.

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленная изменчивость последовательностей генов *Ant1*, *An2*, *Atv* послужила основой для разработки молекулярных маркеров, обеспечивающих ДНК-типирование аллелей этих генов (SCAR маркеры *Ant1.1-FAM*, *An2-AFT* (ОМ), *An2-4*, *Atv2*, *Atv-Ins9*), что в совокупности с обнаруженным тесным сцеплением и совместным наследованием аллелей *Ant1* и *An2-Aft*, *ant1* и *Myb75* генов *Ant1* и *An2* позволяет идентифицировать образцы томата с наибольшим накоплением антоцианов в вегетативных органах и плодах.

2. Установленные особенности накопления антоцианов в зависимости от комплекса аллелей генов *Myb* транскрипционных факторов (*Ant1*, *An2*, *Atv*), а именно: комбинация аллелей *Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft//atv/atv* обеспечивает максимальное накопление антоцианов в вегетативных органах и в кожице плодов; *ant1/ant1//Myb75/Myb75//Atv/Atv* – минимальное накопление или отсутствие антоцианов в различных частях растения; *Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft //Atv/Atv* – слабое

накопление антоцианов в вегетативных органах, но высокое их накопление в плодах, открывают возможность целенаправленно создавать генотипы с желаемым уровнем накопления антоцианов в растениях томата.

3. Обнаруженный новый аллель гена *Golden 2-like 2 – U-del52*, обеспечивающий более равномерное распределение пигментов в плодах по сравнению с нормальным аллелем *U* гена *GLK2*, представляет интерес для выявления с помощью разработанного к нему молекулярного SCAR маркера *U-del52* образцов томата с оптимальным характером накопления пигментов в плодах.

4. Установленный характер наследования биохимических признаков «общее накопление антоцианов» и «общее накопление каротина» у гибридов F_1 , включающий неполное доминирование (44,7 и 42,1% соответственно) или доминирование в сторону уменьшения значения признака (39,5 и 42,1% соответственно), позволяет целенаправленно подбирать родительские формы для получения гибридов F_1 с повышенным содержанием антоцианов и каротина.

5. Созданные с применением разработанных молекулярных маркеров линии томатов с различным сочетанием аллелей генов качества и устойчивости к ряду возбудителей болезней, а также полученные гетерозисные гибриды F_1 , характеризующиеся высокой продуктивностью и высоким содержанием антоцианов и каротина в плодах, являются ценным материалом для селекции, направленной на улучшение качества плодов томата. Лучший из гибридов Спатканне F_1 включен в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений, что свидетельствует об эффективности разработанной технологии маркер-сопутствующего отбора.

Личный вклад соискателя ученой степени. Автор принимал непосредственное участие в проведении эксперимента в период 2021–2024 гг. лично автором осуществлены: секвенирование генов, детерминирующих накопление антоцианов, разработка ДНК-маркеров к выявленным полиморфизмам генов. Испытания созданных гибридов проводились совместно с сотрудниками кафедры селекции и биотехнологии растений УО БГСХА Пугачевой И. Г. и Добродъкиным М. М., которым автор выражает свою признательность. В публикациях, написанных в соавторстве [1–А–20–А], соискателю принадлежит участие в получении данных полевых экспериментов и молекулярных анализов, их статистической обработке, анализе результатов.

Подготовка рукописи кандидатской диссертации выполнена автором при консультации научного руководителя академика НАН Беларуси, доктора биологических наук, профессора Кильчевского А. В., которому выражается искренняя благодарность. Автор также благодарен за научные консультации, постоянную помощь и совместную работу сотрудникам лаборатории экологической генетики и биотехнологии Института генетики и цитологии НАН Беларуси Бабак О. Г., Мартиновской Н. А., Анисимовой Н. В., Яцевич К. К.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.

Результаты диссертационного исследования были представлены на следующих международных, региональных научных и научно-практических конференциях и конгрессах: III Международная научно-практическая конференция «Клеточная биология и биотехнология растений» (Минск, 2022), XIX Международная научная конференция «Молодежь в науке – 2022» (Минск, 2022), V Международная научная конференция «Генетика и биотехнология XXI века: проблемы, достижения, перспективы» (Минск, 2022), V Вавиловская международная конференция: к 135-летию со дня рождения Н. И. Вавилова (Санкт-Петербург, 2022), Международная научная конференция «Настоящее и будущее биотехнологии растений» (Минск, 2023), VII Международная научная конференция «Генетика, геномика, биоинформатика и биотехнология растений (PlantGen 2023)» (Казань, 2023), XX Международная научная конференция «Молодежь в науке – 2023» (Минск, 2023), Международная научная конференция «Селекция и генетика культурных растений» (Москва, 2023), XXIII Всероссийская конференция молодых ученых «Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии» (Москва, 2023), Международный Конгресс «VIII Съезд Вавиловского общества генетиков и селекционеров, посвященный 300-летию российской науки и высшей школы» (Саратов, 2024), XXIV Всероссийская конференция молодых ученых «Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии» (Москва, 2024), Конференция «ВИР-130: Генетические ресурсы растений» (Санкт-Петербург, 2024).

Созданные и апробированные молекулярные маркеры к генам качества плодов и устойчивости к возбудителям болезней были включены в методические рекомендации «Технология маркер-сопутствующего отбора форм томата с высокими биохимическими и технологическими свойствами плодов», которые используются в научно-исследовательском и образовательном процессе УО БГСХА (акты от 22.05.2024 г.; 14.06.2024 г.).

Образцы ДНК нового селекционного материала томата с комплексом ценных аллелей переданы в «Республиканский Банк ДНК человека, животных, растений и микроорганизмов» (акты передачи от 23.12.2022 г.; 22.12.2023 г.).

Создан гибрид F₁ Спатканне, внесенный в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений. Доля участия диссертанта 10% (свидетельство селекционера 0008494).

Опубликованность результатов диссертации. По теме диссертационного исследования опубликовано 20 научных работ, в том числе 5 статей, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (объемом 2,7 авторских листа), 1 публикация в сборнике материалов научных конференций, 13 публикаций в виде

тезисов докладов, 1 методические рекомендации. Общий объем опубликованных материалов составляет 3,9 авторских листа.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, списка использованных источников (в том числе 241 литературный источник и 20 публикаций соискателя) и 10 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 318 страниц, из которых 43 страницы – 38 таблиц и 42 рисунка, 25 страниц – список использованных источников, 154 страницы – приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Обзор литературы

В главе представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований, посвященных изучению процессов молекуларно-генетической регуляции биосинтеза антоцианов и каротиноидов у растений. Отражена значимость данных соединений для здоровья человека и необходимость включения в рацион продуктов питания с высокими антиоксидантными свойствами. Кроме того, рассмотрена роль маркер-ассоциированного отбора в селекции томата на высокое биохимическое качество плодов.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследований были линии (рисунок 1) и популяции F₂–F₃ с различным фенотипическим проявлением признаков окраски вегетативных органов и плодов томата из коллекции Института генетики и цитологии НАН Беларуси, полученные на основе маркер-ассоциированной селекции (МАС) и созданные на их основе 40 гибридов F₁. Для оценки продуктивности гибридов F₁ использовали стандартные формы: индетерминантные – Аламина, Старт; полудетерминантная, раннеспелая – Евро.



А – Дачный; Б – Линия №17-2020; В – Индиго; Г – Дзивосны; Д – Октябрята;
Е – Бурштын; Ж – Белесый ИСИ (SAI)

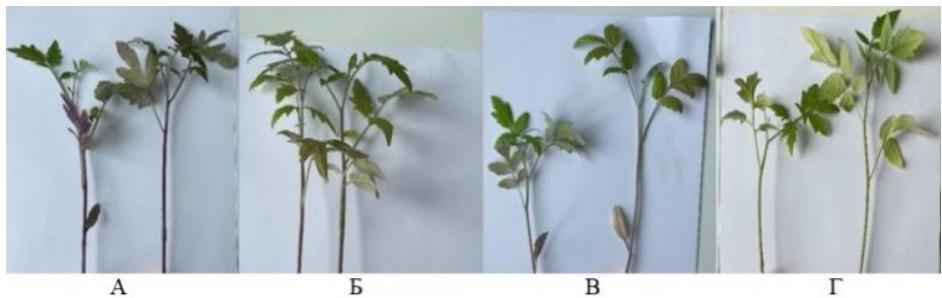
Рисунок 1 – Генотипы с различным фенотипическим проявлением признака «накопление антоцианов в плодах» на стадии технической и биологической спелости

При выполнении работы использованы полевой эксперимент в условиях защищенного грунта на биологической опытной станции Института генетики и цитологии НАН Беларуси и УО БГСХА в 2022–2024 гг., методы молекулярно-генетического анализа (секвенирование по Сэнгеру, разработка ДНК-маркеров, ПЦР-анализ). Для анализа биохимического состава плодов были применены метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (определение состава индивидуальных антоцианов) и метод спектрофотометрии (определение общего содержания антоцианов и каротина). Для статистической обработки результатов использовались дисперсионный анализ и метод χ^2 . Для оценки характера проявления биометрических признаков и признаков урожайности у гибридов F_1 определяли степень доминирования (Нр) и истинный гетерозис (Гист).

Изучение аллельного состава генов *Ant1*, *An2*, *Atv*, *GLK2* томата, регулирующих биосинтез пигментов, и разработка молекулярных маркеров для их ДНК-типирования

По результатам секвенирования генов *Ant1*, *An2* и *Atv* MYB ТФ на коллекции образцов томата с различным накоплением антоцианов в вегетативных органах и плодах было установлено наличие уже описанных ранее аллелей генов *Ant1* (*Ant1*, *ant1*), *An2* (*An2-Aft*, *Myb75*) и *Atv* (*atv*, *Atv*), а также выявлены ранее неизвестные аллели генов *An2* (*An2-Ins57*) и *Atv* (*Atv-Ins9*), характеризующиеся структурными изменениями в экзонно-инtronных областях. Ряд полиморфизмов затрагивают область ДНК-связывающих доменов, что влияет на функциональные особенности кодируемых белковых последовательностей. Разработаны новые молекулярные маркеры для ДНК-типирования аллелей генов *Ant1* (SCAR маркер *Ant1.1-FAM*), *An2* (SCAR маркеры *An2-AFT* (OM), *An2-4*), *Atv* (SCAR маркеры *Atv2*, *Atv-Ins9*), подтверждена их высокая эффективность. Показано тесное сцепление и совместное наследование аллелей *Ant1* и *An2-Aft*, *ant1* и *Myb75* генов *Ant1* и *An2*.

Для оценки характера накопления антоцианов на ранних стадиях развития из популяций F_3 отобраны генотипы с сочетанием различных гомозиготных аллелей регуляторных генов Myb-транскрипционных факторов *Ant1*, *An2* и *Atv*. В результате сравнительного анализа окраски вегетативных органов было установлено постепенное снижение уровня накопления антоцианов от форм с генотипом *Ant1/An2-Aft/atv*, которые характеризовались максимальной пурпурной окраской листовой пластинки, жилок листа, стеблей, к образцам с сочетанием аллелей *Ant1/An2-Aft/Atv* (слабое накопление антоцианов в вегетативных органах, но высокое накопление в кожице плодов) и *ant1/Myb75/atv* (среднее накоплением антоцианов в вегетативных органах), и затем к формам с генотипом *ant1/Myb75/Atv*, характеризующимся полным отсутствием накопления антоцианов в вегетативных органах, окраска которых оставалась зеленой (рисунок 2).



А – 45-19/2, 45-19/7 (*Ant1/An2-Aft/atv*); Б – 45-12/6, 45-12/7 (*Ant1/An2-Aft/Atv*);
В – 45-9/6, 45-6/9 (*ant1/Myb75/atv*); Г – 45-21/1, 45-21/2 (*ant1/Myb75/Atv*)

Рисунок 2 – Фенотип вегетативных органов растений с различным сочетанием аллелей генов *Ant1*, *An2* и *Atv*

Полученные данные позволили сделать вывод, что в присутствии локуса *Aft*, локус *atv* может усиливать антоциановую пигментацию и максимальное проявление антоциановой окраски вегетативных органов наблюдается при наличии в генотипе растения трех аллелей генов: *Ant1*, *An2-Aft*, *atv*.

По результатам секвенирования ДНК гена *Golden 2-like 2* форм томата с различным характером распределения пигментов в плодах выявлен новый аллель гена *GLK2*, отличающийся от дикого аллеля *U* следующими структурными изменениями: 4 SNP (1 в экзонной и 3 в инtronной области), 2 однонуклеотидные инсерции в инtronной области, делеция размером 52 п.н., затрагивающая область конца второго экзона – начала второго интрана.

Сравнительный анализ полученных последовательностей кДНК показал, что в отличие от контрольного сорта Индиго (*U*) в зрелой мРНК гена *GLK2* сорта Дачный полностью отсутствует второй экзон и, следовательно, не образуется функциональный белок.

Полученные результаты подтверждают выявление нового аллеля гена *GLK2*, который был назван *U-del52*. На основании выявленных полиморфизмов для идентификации нового аллеля разработан SCAR маркер *U-del52*, подтверждена высокая его эффективность.

В результате сопоставления данных молекулярного маркирования и фенотипических описаний изучаемых популяций F₂ установлено, что плоды форм с аллелем *U-del52* в гомозиготном состоянии имели на стадии технической спелости светло-зеленую окраску со слабым увеличением концентрации хлорофилла у плодоножки по сравнению с диким аллелем *U* гена *GLK2*, при этом накопление каротиноидов в плодах было промежуточным между таковым у образцов с *U* и *u* аллелями. Также показана более высокая концентрация антоцианов (насыщенно фиолетовое пятно) у плодоножки у форм с сочетанием

аллелей *U* и *Ant1* и равномерное распределение по поверхности плода (слабо фиолетовое пятно) у образцов с аллелями *U-del52* и *Ant1*, а также *u* и *Ant1*.

Генетический анализ исходного материала и создание гибридов F₁ томата

По результатам ДНК-анализа, оценки фенотипических признаков исходных форм для скрещиваний отобраны 29 родительских линий с различными комбинациями аллелей генов качества плодов: *SlMyb12*, *Ant1*, *An2*, *Atv*, *CRTISO*, *NSY*, *DET1*, *GLK2*; устойчивости к болезням: фузариозу (*I-2*, *I-3*, *I-7*), кладоспориозу (*Cf-2*, *Cf-4*, *Cf-5*, *Cf-9*), мелойдогинозу (*Mi-1.2*), фитофторозу (*Ph3*), вертициллезу (*Ve*), вирусу мозаики томата (*Tm-2*), вирусу желтой курчавости листьев (*Ty-2*, *Ty-3*); а также типа роста главного побега (*Sp*) и функциональной мужской стерильности (*Ps-2*).

Схема гибридизации 1 представляла собой топкросс 4×4. Особенностью гибридов схемы 1 было присутствие у материнских форм аллеля *Beta* (*B*) гена *NSY*, связанного с повышенным накоплением β-каротина, а также аллеля *hp-2^{dg}* гена *DET1*, связанного с повышенным накоплением пигментов в целом. Схемы гибридизации 2 и 3 представляли скрещивания индивидуально подобранных комбинаций. Особенностью гибридов схемы 2 было присутствие аллелей *beta* (*b*) гена *NSY*, связанного с преимущественным накоплением ликопина; *CRTISO* и *tangerine* гена *CRTISO*, связанного с накоплением транс- и цис- форм ликопина; а также аллелей генов *Ant1*, *An2* и *Atv*, связанных с регуляцией накопления антоцианов. Схема гибридизации 3 в отличие от схемы 2 включала линии с различными аллелями *U*, *u*, *U-del52* гена *GLK2* наряду с аллелями генов *Ant1*, *An2* и *Atv* в генотипе. Испытания гибридов F₁ схемы 1 и 2 проводились в условиях необогреваемых остекленных теплиц на БОС ИГЦ в 2022 г. и необогреваемых карбонатных теплиц УО БГСХА в 2023 г. Испытания гибридов схемы 3 проводились в условиях необогреваемых карбонатных теплиц УО БГСХА в 2023–2024 гг.

Анализ признаков урожайности и характера их наследования у гибридов F₁ томата с различным сочетанием аллелей генов биосинтеза антоцианов, каротиноидов и устойчивости к ряду возбудителей болезней

По результатам двухлетних испытаний установлено, что по признаку «ранняя урожайность» гибриды 8Б, 11Б, ИГЦ5 были на уровне раннеспелого контроля Евро (3,18 кг/м²) и сформировали от 3,28 до 3,68 кг/м² плодов за первые три сбора. Кроме того, в пределах НСР₀₅ по отношению к лучшему по признаку «ранняя урожайность» контролю Евро с высокой ранней урожайностью (2,50–2,82 кг/м²) были гибриды 10Б, ИГЦ14.

По величине товарной и общей урожайности испытываемые гибриды не превзошли контроль Старт. При этом гибриды ИГЦ8, ИГЦ10, ИГЦ3(2)

сформировали товарный урожай от 9,54 до 12,45 кг/м² в пределах НСР₀₅ по отношению к данному контролю. По общей урожайности гибриды ИГЦ8, ИГЦ10, 12Б достоверно превышали значение контроля Аламина (8,7 кг/м²) и сформировали от 9,98 до 10,25 кг/м² зрелых плодов.

Масса товарного плода достоверно превышала стандартную форму Старт (71,8 г) и Евро (72,1 г) у гибридов 1Б, 2Б, 11Б, ИГЦ2, ИГЦ11, ИГЦ12, ИГЦ13, ИГЦ19, плоды сформировались массой от 85,8 г до 117,7 г. Стандартную форму Аламина (93,5 г) достоверно превосходил один гибрид ИГЦ12 (117,7 г).

В результате проведенных исследований гибрид F₁ Спатканне (ИГЦ11) с комплексом аллелей генов качества *CRTISO/CRTISO//b/b//y/y//Ant1/ant1//Myb75/An2-Aft//Atv/atv//U-del52/u* и генов устойчивости (*Cf-4, Cf-4A, Cf-5, Cf-9, Tm-2, Ty-3, I-7, I-2, Ve*) в гетерозиготном состоянии был включен в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений с 2025 г., превзойдя при этом контрольный гибрид ГСИ (Азарт) без комплекса аллелей качества на 3,0 кг/м², показав товарную урожайность 17,6 кг/м². Также с показателями урожайности, близкими к гибридам Спатканне были гибридные: ИГЦ8, ИГЦ10, ИГЦ13, ИГЦ19, ИГЦ3(2), ИГЦ4(2), ИГЦ5(2), ранняя урожайность которых составила 1,45–2,41 кг/м², товарная урожайность 9,10–12,45 кг/м², общая урожайность 9,56–13,21 кг/м², масса товарного плода 47,67–89,17 г.

Ряд гибридов наряду с высокими показателями урожайности (ранняя урожайность 1,22–3,58 кг/м², товарная урожайность 6,73–12,45 кг/м², общая урожайность 7,94–13,21 кг/м², масса товарного плода 44,17–81,06 г) имели аллели устойчивости к ряду возбудителей болезней в гетерозиготном состоянии. Гибридные 8Б, 12Б, 16Б содержали аллели *Mi-1.2, Cf-4, Cf-4A, Ph3*; гибридные ИГЦ10, ИГЦ11 – аллели *Cf-4, Cf-4A, Cf-5, Cf-9, Tm-2², Ty-3, I-7, I-2, Ve*; ИГЦ9 (*Cf-4, Cf-4A, Cf-9, Tm-2², Ve, Ph3*); ИГЦ2(2) (*Ph3*); гибридные ИГЦ3(2), ИГЦ4(2) (*Cf-4, Cf-4A, Ve, I-2*); ИГЦ5(2) (*Cf-4, Cf-4A, Ve, I-2, Ph3*), ИГЦ6(2) (*Ph3, Ve*); гибрид ИГЦ7 (*Ph3/Ph3//Ve/ve//Cf-5/cf-5*); ИГЦ8 (*Ph3/Ph3//Cf-5/cf-5*). Наличие данных аллелей обеспечивает ценность указанных форм.

На основании анализа данных двухлетних испытаний гибридов F₁ также были определены ценные образцы, которые целесообразно использовать в качестве исходного материала при создании раннеспелых – 2,50–3,68 кг/м² (Линия 21-2, Линия 21-3, Линия 21-27, Линия 7), высокоурожайных с товарной и общей урожайностью 9,10–12,45 кг/м² и 9,56–13,21 кг/м² соответственно (Линия 20, Линия 21, Линия 11, Линия 13), крупноплодных – 89–117 г (Линия 21-22, Линия 14, Линия 1, Линия 13) гибридов F₁.

Анализ степени доминирования показал, что у большинства гибридных комбинаций наследование хозяйствственно-ценных признаков «количество кистей на главном побеге» (47,4%) и «масса товарного плода» (65,8%) происходит по типу неполного доминирования, а признаков «высота растения» (63,1%),

«завязываемость плодов на кистях» (от 81,6 до 92,1%), «ранняя урожайность» (73,7%), «товарная урожайность» (71,1%) и «общая урожайность» (65,8%) – по типу сверхдоминирования в сторону увеличения признака (рисунок 3). Истинный гетерозис признака «ранняя урожайность» характерен для 76,3% гибридов, а признака «товарная урожайность» – для 73,7%.



Признаки урожайности: А – ранняя; Б – товарная; В – общая;
Г – масса товарного плода

Рисунок 3 – Характер наследования признаков урожайности у гибридов F_1 томата

Анализ биохимических признаков и характера их наследования у гибридов F_1 томата с комплексом аллелей изучаемых генов

В результате биохимического анализа установлено, что при наличии у линий комплекса аллелей *Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft* наблюдается высокое накопление антоцианов в кожице плода от 1083,27 до 2979,26 мг/100 г сырой кожицы плода (скп). У линий с комплексом аллелей *ant1/ant1//Myb75/Myb75* наблюдалось низкое накопление антоцианов от 56,29 до 333,12 мг/100 г скп. При нахождении у образцов генов *Ant1*, *An2* в гетерозиготном состоянии, накопление антоцианов было преимущественно низким (84,44–371,09 мг/100 г скп) либо средним (465,35–953,53 мг/100 г скп) в зависимости от комбинации аллелей генов *GLK2* и *DET1*, определяющих общее накопление пигментов. Так у образцов 3Б, 5Б с сочетанием аллелей *B/b//DET1/hp-2^{dg}//Ant1/ant1//An2-Aft/Myb75//U/U-del52* и образцов ИГЦ7, ИГЦ9 с сочетанием аллелей *b/b//DET1/hp-2^{dg}//Ant1/ant1//An2-Aft/Myb75//U/u* в генотипе количество антоцианов было средним (465,35–761,03 мг/100 г скп). В свою очередь у образцов ИГЦ1, ИГЦ2 с сочетанием аллелей *Ant1/ant1//An2-Aft/Myb75//U/U-del52* и образцов ИГЦ3(2), ИГЦ4(2) с сочетанием аллелей *Ant1/ant1//An2-Aft/Myb75//U-del52/u* в генотипе количество антоцианов было низким (84,44–285,35 мг/100 г скп).

Биохимический анализ индивидуальных антоцианов показал, что у всех испытанных гибридов и их родительских форм преобладали три антоциана в различной комбинации: дельфинидин рутинозид глюкозид, петунидин рутинозид глюкозид, мальвидин рутинозид глюкозид.

В результате анализа общего содержания каротина было установлено, что максимальное их накопление наблюдалось у образцов с генотипом *CRTISO/CRTISO//B/B//hp-2^{dg}/hp-2^{dg}*. Количество каротина достигало 21,19 мг/100 г сырой массы плода (смп) у Линии 21-26 (*CRTISO/CRTISO//B/B//hp-2^{dg}/hp-2^{dg}//Y/Y//ant1/ant1//Myb75/Myb75//U/U*).

Изучено влияние аллелей *U*, *U-del52* и *u* гена *GLK2* на накопление каротина в плодах томата. Высокое накопление каротина наблюдалось у форм с генотипами *CRTISO/CRTISO//b/b//U-del52/U-del52* и *CRTISO/CRTISO//b/b//U/u*. Количество каротина варьировало от 4,09 у Линии 21-3 до 9,14 мг/100 г смп и у Линии 14. Увеличение количества каротина связано с наличием у Линии 14 аллеля *U*, повышающего общее количество пигментов, а также присутствием рецессивных аллелей генов R2R3 Myb ТФ, обеспечивающих низкий синтез антоцианов в плодах. Присутствие в генотипе аллеля *u* гена *GLK2* в гомозиготном состоянии (Линия 21 – 3,54 мг/100 г смп), а также гетерозиготы *u/U-del52* приводит к низкому накоплению пигментов в плодах (гибриды ИГЦ3(2) и ИГЦ4(2) – 4,10 и 3,49 мг/100 г смп соответственно). Эти данные подтверждают действие аллелей *U*, *U-del52* и *u* гена *GLK2* на общее накопление пигментов в плодах томата.

В результате наших исследований особый интерес представляют гибриды с достаточно высокими показателями продуктивности и комплексом аллелей, определяющих накопление антоцианов и каротиноидов. Гибриды F₁ 4Б, 5Б, 8Б, 13Б, 14Б, 16Б, ИГЦ8, ИГЦ19, ИГЦ2(2), ИГЦ6(2) характеризовались ранней урожайностью 1,22–3,58 кг/м², товарной урожайностью 6,73–9,52 кг/м², общей урожайностью 7,19–10,25 кг/м², массой товарного плода 45,14–89,17 г. При этом гибриды F₁ 4Б (*CRTISO/t//B/b//DET1/hp-2^{dg}*), 5Б (*CRTISO/CRTISO//B/b//DET1/hp-2^{dg}*), 8Б (*CRTISO/CRTISO//B/b//DET1/hp-2^{dg}*), ИГЦ8 (*CRTISO/CRTISO//b/b//Y/y//U/u*), ИГЦ2(2) (*t/t//b/b//Y/y//U-del52/U-del52*) характеризовались содержанием каротина от 5,94 до 12,06 мг/100 г смп; а гибриды F₁ 13Б (*Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft*), 14Б (*Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft*), 16Б (*Ant1/ant1//An2-Aft/Myb75*) характеризовались содержанием антоцианов от 1225,45 до 1489,18 мг/100 г скп. Гибрид ИГЦ19 с генотипом *CRTISO/CRTISO//b/b//y/y//Ant1/ant1//An2-Aft/Myb75//U-del52/u* содержал 6,73 мг каротина на 100 г смп, а антоцианов – 1580,32 мг/100 г скп. На основании этого вышеперечисленные гибриды являются перспективными для возделывания в качестве источников антиоксидантов.

Анализ степени доминирования показал, что у большинства гибридов F₁ происходит наследование биохимических признаков по типу неполного доминирования или доминирования в сторону уменьшения значения признака (44,7 и 39,5% для признака «общее накопление антоцианов» и 42,1 и 42,1% для признака «общее накопление каротина» соответственно) (рисунок 4), что нужно

учитывать при выборе родительских форм для получения гибридов с высоким содержанием антоцианов и каротина в плодах.



А – признак «общее накопление антоцианов»; Б – признак «общее накопление каротина»

Рисунок 4 – Характер наследования биохимических признаков у гибридов F_1 томата

В результате анализа данных двухлетних испытаний выделены образцы, с аллелями Y , $Ant1$, $An2-Aft$, atv , определяющими накопление антоцианов, (Линия 21-72, Линия 6, Линия 15, Линия 10, Линия 8) и с аллелями U , $hp-2^{dg}$, y , повышающими общее накопление каротина, наряду с основными аллелями генов NSY и $CRTISO$ (Линия 21-22, Линия 14, Линия 21-26, Линия 2, Линия 4, Линия 11, Линия 7), которые целесообразно использовать в селекции томатов. Лучшими гибридами по биохимическому составу были ИГЦ6(2), ИГЦ16, 16Б с общим количеством антоцианов 1180,24–1580,32 мг/100 г скп, а каротина 4,33–6,73 мг/100 г смп.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В коллекции образцов томата с различным накоплением антоцианов в вегетативных органах и кожице плодов по результатам секвенирования генов $Ant1$, $An2$ и Atv Myb транскрипционных факторов установлено наличие двух известных аллелей $Ant1$ и $ant1$ гена $Ant1$; двух известных ($An2-Aft$, $Myb75$) и ранее неизвестного ($An2-Ins57$) аллелей гена $An2$; двух известных (Atv , atv) и неизвестного ($Atv-Ins9$) аллелей гена Atv . Разработаны новые молекулярные маркеры для ДНК-типирования аллелей генов $Ant1$ (SCAR маркер $Ant1.1-FAM$), $An2$ (SCAR маркер $An2-AFT$ (OM), SCAR маркер $An2-4$), Atv (SCAR маркер $Atv2$, SCAR маркер $Atv-Ins9$), подтверждена их высокая эффективность [2–A; 4–A; 7–A; 9–A; 10–A; 12–A–14–A; 17–A; 20–A].

2. Показано тесное сцепление аллелей $Ant1$ и $An2-Aft$, $ant1$ и $Myb75$ генов $Ant1$ и $An2$. Выявлено максимальное накопление антоцианов в вегетативных органах и кожице плодов у образцов с аллелями $Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft//atv/atv$ в

генотипе. Сочетание аллелей *ant1/ant1//Myb75/Myb75//Atv/Atv* связано с минимальным накоплением или отсутствием антоцианов в различных частях растения. Комбинация аллелей *Ant1/Ant1//An2-Aft/An2-Aft//Atv/Atv* обеспечивает слабое накопление антоцианов в вегетативных органах, но высокое их накопление в кожице плодов [2–А; 15–А].

3. По результатам секвенирования ДНК гена *Golden 2-like 2* форм томата с различным характером распределения пигментов в плодах выявлен новый аллель гена *GLK2*, отличающийся от дикого аллеля *U* следующими структурными изменениями: 4 SNP (1 в экзонной и 3 в инtronной области), 2 однонуклеотидные инсерции в инtronной области, делеция размером 52 п.н., затрагивающая область конца второго экзона – начала второго интрана. Показано, что у нового *U-del52* аллеля происходит нарушение сплайсинга и выпадение второго экзона, что приводит к синтезу усеченной белковой последовательности [1–А; 2–А; 8–А; 10–А–14–А; 20–А]. Данные о последовательности нового выявленного аллеля *U-del52* гена *GLK2* внесены в базу NCBI. Определено его фенотипическое проявление: светло-зеленые плоды со слабым увеличением концентрации хлорофилла у плодоножки на стадии технической спелости, более равномерное распределение пигментов в плодах по сравнению с диким аллелем *U* гена *GLK2*. Разработан молекулярный SCAR маркер *U-del52* для выявления данного аллеля и подтверждена его эффективность [1–А; 4–А; 20–А].

4. Максимальное накопление каротина (21,19 мг/100 г спп) было установлено у образцов с генотипом *CRTISO/CRTISO//B/B//hp-2^{dg}/hp-2^{dg}//U/U*, сочетающим в себе аллели *CRTISO* и *Beta* структурных генов *CRTISO* и *NSY* соответственно, контролирующих содержание каротиноидов, а также аллели *hp-2^{dg}* гена *DET1* и *U* гена *GLK2*, связанных с повышенным накоплением пигментов в целом. Также высокое накопление каротина наблюдалось у форм с генотипом *CRTISO/CRTISO//b/b//U/U*. Увеличение количества каротина связано как с наличием аллеля *U* гена *GLK2*, повышающего общее количество пигментов, так и с присутствием рецессивных аллелей генов *Ant1*, *An2*, обеспечивающих низкий синтез антоцианов в плодах. Присутствие в генотипе аллеля *u* гена *GLK2* в гомозиготном состоянии, а также гетерозиготы *u/U-del52* приводило к низкому накоплению пигментов в плодах [3–А].

5. Создан новый селекционный материал (линии, а также образцы *F₂* и *F₃*) с различным комплексом аллелей генов качества плодов и устойчивости к болезням для дальнейшего изучения взаимодействия аллелей, определяющих накопление пигментов в плодах: *SlMyb12* (*Y*, *y*), *R2R3Myb* (*Ant1*, *An2*), *R3Myb* (*atv*), *CRTISO* (*t*), *NSY(og^c, b, B)*, *DET1* (*hp-2^{dg}*), *GLK2* (*U*, *u*, *U-del52*); устойчивость к болезням: фузариозу (*I-2*, *I-3*, *I-7*), кладоспориозу (*Cf-2*, *Cf-4*, *Cf-4A*, *Cf-5*, *Cf-9*, *DC9*), мелайдогинозу (*Mi-1.2*), фитофторозу (*Ph3*), вертициллезу (*Ve*), вирусу мозаики томата (*Tm-2*, *Tm-2²*), вирусу желтой курчавости листьев (*Ty-2*, *Ty-3*,

Ty-3a) и селекции, направленной на улучшение качества плодов [1–A; 3–A; 5–A; 6–A; 16–A; 18–A].

6. По результатам анализа гибридов F₁ и их родителей с комплексом аллелей, связанных с накоплением антоцианов и каротиноидов, установлено, что у большинства гибридных комбинаций происходит наследование биохимических признаков «общее накопление антоцианов» и «общее накопление каротина» по типу неполного доминирования и сверхдоминирования с сторону уменьшения значения признака. Наследование хозяйственно-ценных признаков «количество кистей на главном побеге» и «масса товарного плода» происходит по типу неполного доминирования, а признаков «высота растения», «завязываемость плодов на кистях», «ранняя урожайность», «товарная урожайность» и «общая урожайность» – по типу сверхдоминирования в сторону увеличения значения признака [3–A; 5–A; 6–A].

7. На основании анализа особенностей взаимодействия изучаемых аллелей генов качества плодов и характера наследования признаков продуктивности, накопления антоцианов и каротина определены ценные образцы, которые целесообразно использовать в качестве исходного материала при создании раннеспелых (Линия 21-2, Линия 21-3, Линия 21-27, Линия 7), высокоурожайных (Линия 20, Линия 21, Линия 11, Линия 13), крупноплодных (Линия 21-22, Линия 14, Линия 1, Линия 13) гибридов F₁. Отобраны гибриды F₁ с аллелями генов, детерминирующими качество плодов и устойчивость к ряду возбудителей болезней, характеризующиеся высокой завязываемостью плодов на первой (69,7–87,3%), второй (62,1–91,7%), третьей (55,6–76,5%) кистях, высокой ранней урожайностью от 1,3 до 3,7 кг/м², товарной урожайностью от 6,3 до 12,5 кг/м², общей урожайностью от 6,7 до 13,2 кг/м², средней массой товарного плода от 44,2 до 117,7 г и одновременно высоким содержанием антоцианов (от 112,7 до 1225,5 мг/100 г сырой кожицы плода) и каротина (от 1,3 до 12,0 мг/100 г сырой массы плода) в плодах [3–A; 5–A; 6–A; 16–A; 18–A; 19–A]. Гибрид Спатканне включен в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений с 2025 года как высокоурожайный, гетерозисный, характеризующийся генетической детерминацией ценных признаков качества плодов (*CRTISO/CRTISO//b/b//y/y//Ant1/ant1//Myb75/An2-Aft//Atv/atv//U-del52/u*) и устойчивости к болезням (*Cf-4/cf-4//Cf-4A/cf-4A//Cf-5/cf-5//Cf-9/cf-9//Tm-2/tm-2//Ty-3/ty-3//I-7/i-7//I-2/i-2//Ve/ve*) [5–A].

Рекомендации по практическому использованию

1. Разработанные молекулярные маркеры к генам качества плодов (SCAR маркеры Ant1.1-FAM, An2-AFT (OM), An2-4F/R, Atv2, Atv-Ins9, U-del52) включены в методические рекомендации «Технология маркер-сопутствующего отбора форм томата с высокими биохимическими и технологическими

свойствами плодов», которые внедрены в научно-исследовательский и образовательный процесс УО БГСХА (акт о внедрении 145 от 14.06.2024, акт о практическом использовании от 22.05.2024), а также рекомендуются к использованию для повышения эффективности селекционного процесса.

2. Коллекция образцов ДНК нового селекционного материала томата с комплексом ценных аллелей генов качества плодов и устойчивости к болезням передана в «Республиканский Банк ДНК человека, животных, растений и микроорганизмов» (акты передачи образцов ДНК от 23.12.2022 г.; 22.12.2023 г.) и рекомендуется к использованию для дальнейшего изучения взаимодействия аллелей генов хозяйственно полезных признаков.

3. Для возделывания в защищенном грунте рекомендуется гибрид томата Спатканне (свидетельство селекционера 0008494), включенный в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений с 2025 года, характеризующийся высокой урожайностью ($17,6 \text{ кг}/\text{м}^2$) и комплексом аллелей генов качества *CRTISO/CRTISO//b/b//y/y//Ant1/ant1//Myb75/An2-Aft//Atv/atv//U-del52/u* и устойчивости к болезням в гетерозиготном состоянии (*Cf-4/cf-4//Cf-4A/cf-4A//Cf-5/cf-5//Cf-9/cf-9//Tm-2/tm-2//Ty-3/ty-3//I-7/i-7//I-2/i-2//Ve/ve*).

4. Линии 21-72, 6, 15, 10, 8 с высоким содержанием антоцианов в плодах и Линии 21-26, 21-22, 14 с высоким содержанием каротина в плодах предлагается использовать в селекции томата на улучшенное биохимическое качество плодов.

В качестве исходного материала для селекции раннеспелых томатов целесообразно использовать Линии 21-2, 21-3, 7, 21-27; для селекции томатов с высокой товарной и общей урожайностью – Линии 11, 20, 21, 13, а для селекции крупноплодных томатов – Линии 21-22, 14, 1, 13.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Публикации, соответствующие пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1–А. Новый аллель гена *Golden 2-like*, его фенотипическое проявление и селекционное значение у *Solanum lycopersicum* / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // Молекулярная и прикладная генетика : сб. науч. тр. / Институт генетики и цитологии НАН Беларуси. – Минск, 2023. – Т. 34. – С. 6–16.

2–А. Разработка молекулярных маркеров накопления антоцианов в плодах и изучение особенностей взаимодействия генов *Ant1*, *An2* и *Atv* у *Solanum lycopersicum* / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // Молекулярная и прикладная генетика : сб. науч. тр. / Институт генетики и цитологии НАН Беларуси. – Минск, 2024. – Т. 36. – С. 7–23.

3–А. Биохимический анализ плодов гибридов F₁ *Solanum lycopersicum* L. с комплексом аллелей, определяющих высокое накопление каротиноидов и антоцианов / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. В. Анисимова, Н. А. Мартиновская, К. К. Яцевич, О. Г. Совастей, И. Г. Пугачева, М. М. Добродъкин, А. В. Кильчевский // Картофелеводство и овощеводство : сб. науч. тр. / РУП «Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по картофелеводству и плодовоовощеводству». – Минск, 2024. – Т. 2. – С. 11–24.

4–А. Использование молекулярных маркеров, связанных с устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам среды, при создании селекционного материала томата и перца в Беларуси / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, П. В. Шестерень, И. Е. Баева, Н. А. Невестенко, И. Г. Пугачева, М. М. Добродъкин, А. В. Кильчевский // Овощи России. – 2025. – № 1. – С. 5–13.

5–А. Анализ признаков продуктивности гибридов F₁ томата *Solanum lycopersicum* L. с комплексом аллелей, определяющих высокое накопление каротиноидов и антоцианов / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. А. Мартиновская, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, И. Г. Пугачева, М. М. Добродъкин, А. В. Кильчевский // Молекулярная и генетика : сб. науч. тр. / Институт генетики и цитологии НАН Беларуси. – Минск, 2025. – Т. 38. – С. 6–23.

Статьи в сборниках материалов конференций

6–А. Создание и оценка гибридов F₁ томата с комплексом аллелей высокого накопления каротиноидов, антоцианов и устойчивости к болезням / О. Г. Бабак,

Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, И. Г. Пугачева, М. М. Добролькин, С. И. Игнатова, А. В. Кильчевский // Селекция и генетика культурных растений – 2023 : материалы Международной научной конференции, посвященной 100-летию кафедры генетики, селекции и семеноводства РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 18 октября 2023 г. / Минсельхоз России, РГАУ-МСХА ; редкол.: В. В. Пыльнев [и др.]. – Москва, 2023. – С. 269–273.

Тезисы докладов

7–А. Полиморфизм генов *Myb2 Solanum melongena* и *An2 Solanum lycopersicum*, кодирующих R2R3MYB-активатор / Е. В. Дрозд, О. Г. Бабак, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // Клеточная биология и биотехнология растений : тезисы докладов III Международной научно-практической конференции, Минск, 24–27 мая 2022 г. / БГУ, Ин-т леса НАН Беларуси ; редкол.: В. В. Демидчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 28–29.

8–А. Изучение взаимосвязи генетической регуляции накопления флавоноидов и каротиноидов в зависимости от аллельного состава генов, определяющих качество плодов томата / О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич, Е. В. Дрозд, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, А. Е. Соловьева, А. Б. Курина, А. М. Артемьева, Д. А. Фатеев, А. В. Кильчевский // Клеточная биология и биотехнология растений : тезисы докладов III Международной научно-практической конференции, Минск, 24–27 мая 2022 г. / БГУ, Ин-т леса НАН Беларуси ; редкол.: В. В. Демидчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 47.

9–А. Дрозд, Е. В. Изучение генетики взаимодействия генов *Ant1* и *An2* у образцов томата / Е. В. Дрозд // Молодежь в науке – 2022 : тезисы докладов XIX Международной научной конференции молодых ученых, Минск, 25–28 октября 2022 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 134–137.

10–А. Создание нового селекционного материала томата с высокими антиоксидантными свойствами / Е. В. Дрозд, О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // Генетика и биотехнология XXI века: проблемы, достижения перспективы : материалы V Международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения Н. И. Вавилова, Минск, 21–25 ноября 2022 г. / Институт генетики и цитологии НАН Беларуси ; редкол.: А. В. Кильчевский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 32.

11–А. Новый полиморфизм гена транскрипционного фактора *Golden 2-like (GLK)*, детерминирующего синтез и распределение пигментов в плодах томата / К. К. Яцевич, Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич Н. В. Анисимова, О. Г. Бабак, А. В. Кильчевский // Генетика и биотехнология XXI века: проблемы, достижения перспективы : материалы V Международной научной конференции, посвященной

135-летию со дня рождения Н. И. Вавилова, Минск, 21–25 ноября 2022 г. / Институт генетики и цитологии НАН Беларуси ; редкол.: А. В. Кильчевский [и др.]. – Минск, 2022. – С. 86.

12–А. Гомология изменчивости генов как основа методов молекулярного маркирования признаков у овощных пасленовых культур / О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, Е. В. Дрозд, А. В. Кильчевский // V Вавиловская Международная конференция: к 135-летию со дня рождения Н.И. Вавилова : тезисы докладов, Санкт-Петербург, 21–25 ноября 2022 г. / ВИР ; редкол.: Е. К. Хлесткина [и др.]. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 168–169.

13–А. Новые молекулярные маркеры повышения антиоксидантных свойств плодов томата / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // Настоящее и будущее биотехнологии растений : материалы Международной научной конференции, посвященной 65-летию деятельности Отдела биохимии и биотехнологии растений ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси», Минск, 24–26 мая 2023 г. / НАН Беларуси, Центральный ботанический сад, Отделение биологических наук Беларуси, Совет ботанических садов СНГ при МААН ; редкол.: В. Н. Решетников [и др.]. – Минск, 2023. – С. 61.

14–А. New molecular markers to assist the breeding process aimed at improving the quality of fruits in the *Solanaceae* / O. G. Babak, Е. В. Drozd, N. A. Nekrashevich, N. V. Anisimova, K. K. Yatsevich, A. V. Kilchevsky // Plant Genetics, Genomics, Bioinformatics and Biotechnology (PlantGen2023) : abstracts of the 7th International scientific conference, Kazan, 10–15 July 2023 / Vavilov Society of Geneticists and Breeders, Russian Society of Plant Physiologists, FIC «Kazan Scientific Center» of RAS, Institute of Cytology and Genetics SB RAS ; ed.: A. A. Kalachev [et al.]. – Kazan, 2023. – P. 57.

15–А. Изучение особенностей взаимодействия генов *Ant1*, *Ant2* и *Atv* у *Solanum lycopersicum* / Е. В. Дрозд, О. Г. Бабак, Н. В. Анисимова Н. А. Некрашевич К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // Молодежь в науке – 2023 : тезисы докладов XX Международной научной конференции молодых ученых, Минск, 20–22 сентября 2023 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2023. – С. 132–134.

16–А. Создание гибридов F₁ томата с высоким содержанием антоцианов и каротиноидов для функционального питания / Е. В. Дрозд, О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, И. Г. Пугачева, М. М. Добролькин, С. И. Игнатова, А. В. Кильчевский // Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии : сборник тезисов докладов 23-ей Всероссийской конференции молодых учёных, Москва, 14–16 ноября 2023 г. / ФГБНУ ВНИИСБ. – Москва, 2023. – С. 19–21.

17–А. Генетические основы селекции овощных пасленовых культур на повышение антиоксидантных свойств плодов / О. Г. Бабак, Е. В. Дрозд, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, И. Г. Пугачева, И. Е. Баева, Т. В. Никонович, М. М. Добродъкин, А. В. Кильчевский // VIII Съезд Вавиловского общества генетиков и селекционеров, посвященный 300-летию российской науки и высшей школы : сборник тезисов Международного конгресса, Саратов, 14–19 июня 2024 г. / ВОГиС, СГУ. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 285.

18–А. Получение высокопродуктивных гибридов F₁ томата с комплексом аллелей, обеспечивающих повышенное накопление антоцианов и каротиноидов / Е. В. Дрозд, О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, И. Г. Пугачева, М. М. Добродъкин, А. В. Кильчевский // Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии : сборник тезисов докладов 24-ой Всероссийской конференции молодых учёных, Москва, 23–27 сентября 2024 г. / ФГБНУ ВНИИСБ. – Москва, 2024. – С. 23–25.

19–А. Биохимический анализ плодов гибридов F₁ томата с комплексом аллелей, определяющих высокое накопление каротиноидов и антоцианов / Е. В. Дрозд, О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский // ВИР-130: генетические ресурсы растений : материалы конференции к 130-летию со дня учреждения Бюро по прикладной ботанике при Ученом комитете Министерства земледелия и государственных имуществ Российской империи, Санкт-Петербург, 05–09 ноября 2024 г. / Минобрнауки России, ВИР ; под общей редакцией: Е. К. Хлесткиной. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 192–193.

Методические рекомендации

20–А. Технология маркер-сопутствующего отбора форм томата с высокими биохимическими и технологическими свойствами плодов : метод. рекомендации / О. Г. Бабак, Н. А. Некрашевич, Н. В. Анисимова, Е. В. Дрозд, К. К. Яцевич, А. В. Кильчевский. – Минск : Право и экономика, 2023. – 74 с.

РЭЗЮМЭ

Дрозд Лізавета Валер'еўна

Генетычныя асновы маркер-асацыяванай селекцыі формаў тамата (*Solanum lycopersicum* L.) з павышанай колькасцю антацыянаў і караціноідаў

Ключавыя слова: тамат, гібрыды F_1 , антацыяны, караціноіды, малекулярныя маркеры, біяхімічны склад, ураджайнасць.

Мэта працы: вывучыць змянлівасць генаў, якія вызначаюць назапашванне антацыянаў і караціноідаў у пладах тамата, і распрацаваць методыкі малекулярнага маркіравання каштоўных алеляў якасці пладоў для падбору зыходнага матэрыялу і стварэння высокапрадуктыўных, устойлівых да комплексу ўзбуджальнікаў хвароб гібрыдаў F_1 тамата з высокім утрыманнем антацыянаў і караціну.

Метады даследавання: палявыя эксперыменты, метады малекулярнагенетычнага, біяхімічнага, статыстычнага аналізу.

Вынікі даследавання і іх навізна: створаны ДНК-маркеры для ідэнтыфікацыі алеляў структурных і рэгULATORНЫХ генаў, якія вызначаюць назапашванне антацыянаў і караціноідаў. Выяўлены і зарэгістраваны ў міжнароднай базе дадзеных GenBank (Рэгістрацыйны нумар у GenBank: OQ411621) новы алель гена *GLK2 – U-del52*. Устаноўлены спалучэння алеляў структурных і рэгULATORНЫХ генаў біясінтэзу флаваноідаў і караціноідаў, якія дазваляюць ствараць формы з розным назапашваннем вывучаемых другасных метабалітаў у тамата і выкарыстоўваць іх для павышэння эфектыўнасці селекцыйных работ. Усталяваны характар атрымання ў спадчыну прыкмет «агульнае назапашванне антацыянаў» і «агульнае назапашванне караціну» у гібрыдаў F_1 . Атрыманы высокаураджайныя гетэразісныя гібрыды тамата для закрытага грунту, якія валодаюць каштоўнымі алелямі генаў якасці пладоў і устойлівасці да ўзбуджальнікаў хвароб. Створаны гібрыд Спатканне уключаны ў Дзяржаўны реестр сартоў сельскагаспадарчых раслін з 2025 года.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: створаныя малекулярныя маркеры да генаў якасці пладоў рэкамендуюцца выкарыстоўваць для павышэння эфектыўнасці селекцыйнага працэсу. Для вырошчвання ў абароненым грунце рэкамендуецца гібрыд тамата Спатканне, уключаны ў Дзяржаўны реестр сартоў сельскагаспадарчых раслін з 2025 года. Адабраны лініі, якія мэтазгодна выкарыстоўваць у якасці зыходнага матэрыялу для селекцыі таматаў на высокое значэнне прыкмет прадуктыўнасці, устойлівасць да шэрагу ўзбуджальнікаў хвароб і біяхімічную якасць пладоў.

Вобласть выкарыстання: малекулярная генетыка, біятэхнологія раслін, селекцыя таматаў для абароненага грунту, навучальны працэс.

РЕЗЮМЕ

Дрозд Елизавета Валерьевна

Генетические основы маркер-ассоциированной селекции форм томата (*Solanum lycopersicum* L.) с повышенным содержанием антоцианов и каротиноидов

Ключевые слова: томат, гибриды F₁, антоцианы, каротиноиды, молекулярные маркеры, биохимический состав, урожайность.

Цель работы: изучить изменчивость генов, определяющих накопление антоцианов и каротиноидов в плодах томата, и разработать методики молекулярного маркирования ценных аллелей качества плодов для подбора исходного материала и создания высокопродуктивных, устойчивых к комплексу возбудителей болезней гибридов F₁ томата с высоким содержанием антоцианов и каротина.

Методы исследования: полевые эксперименты, методы молекулярно-генетического, биохимического, статистического анализа.

Результаты и их новизна: созданы ДНК-маркеры для идентификации аллелей структурных и регуляторных генов, определяющих накопление антоцианов и каротиноидов. Выявлен и зарегистрирован в международной базе данных GenBank (Регистрационный номер в GenBank: OQ411621) новый аллель гена *GLK2 – U-del52*. Установлены сочетания аллелей структурных и регуляторных генов биосинтеза флавоноидов и каротиноидов, позволяющих создавать формы с различным накоплением изучаемых вторичных метаболитов у томата и использовать их для повышения эффективности селекционных работ. Установлен характер наследования признаков «общее накопление антоцианов» и «общее накопление каротина» у гибридов F₁. Получены высокоурожайные, гетерозисные гибриды томата для закрытого грунта, обладающие ценными аллелями генов качества плодов и устойчивости к возбудителям болезней. Созданный гибрид Спатканне включен в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений с 2025 года.

Рекомендации по использованию: созданные молекулярные маркеры к генам качества плодов рекомендуются использовать для повышения эффективности селекционного процесса. Для возделывания в защищенном грунте рекомендуется гибрид томата Спатканне, включенный в Государственный реестр сортов сельскохозяйственных растений с 2025 года. Отобраны линии, которые целесообразно использовать в качестве исходного материала для селекции томатов на высокое значение признаков продуктивности, устойчивость к ряду возбудителей болезней и биохимическое качество плодов.

Область применения: молекулярная генетика, биотехнология растений, селекция томатов для защищенного грунта, учебный процесс.

SUMMARY

Drozd Elizaveta Valерьевна

Genetic basis for the marker-assisted selection of tomato forms (*Solanum lycopersicum* L.) with increased anthocyanin and carotenoid content

Key words: tomato, F₁ hybrids, anthocyanins, carotenoids, molecular markers, biochemical composition, yield.

Aim of the study: to study the variability of genes that determine anthocyanin and carotenoid accumulation in tomato fruits and to develop molecular labeling methods for valuable fruit quality alleles to select a starting material and to obtain highly productive F₁ tomato hybrids with a high anthocyanin and carotene content resistant to a complex of pathogens.

Methods of the study: field experiments, molecular genetic, biochemical and statistical analysis methods.

Results and their novelty: DNA markers to identify the alleles of structural and regulatory genes that determine anthocyanin and carotenoid accumulation have been developed. A new allele of the *GLK2 – U-del52* gene has been identified and registered in the International GenBank database (Registration number in GenBank: OQ411621). The allelic combinations of structural and regulatory genes of flavonoid and carotenoid biosynthesis have been established, which makes it possible to develop forms with various accumulations of the studied secondary metabolites in tomatoes and use them to increase breeding efficiency. The nature of the inheritance of the traits “the total accumulation of anthocyanins” and “the total accumulation of carotene” in F₁ hybrids has been established. High-yielding heterotic tomato hybrids for indoor use with the valuable alleles of fruit quality and pathogen resistance genes have been obtained. The created hybrid *Spatkanne* was included in the State Register of Agricultural Plant Varieties in 2025.

Recommendations for application: the designed molecular markers for fruit quality genes are recommended for use to increase breeding efficiency. For cultivation in protected soil, the *Spatkanne* tomato hybrid, which was included in the State Register of Agricultural Plant Varieties in 2025, is recommended. The lines advisable for use as a starting material in tomato breeding for high productivity traits, resistance to a number of pathogens and the biochemical quality of fruits have been selected.

Field of application: molecular genetics, plant biotechnology, protected ground tomato breeding, the learning process.