



УДК: 634.11:577.21:631.52

**ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ КАЧЕСТВА ПЛОДОВ И
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАНДИДАТНЫХ ГЕНОВ У
ГЕНОТИПОВ ЯБЛОНИ И ГРУШИ****З.А. Турлибаева, Ж.Ш. Шавкиев.**

*Институт генетики и экспериментальной биологии растений Академии наук
Республики Узбекистан, Кибрай, Ташкентская область, Узбекистан
E-mail для корреспонденции: zarinaturlibaeva@gmail.com*

Аннотация. В статье обобщены современные представления о физиолого-биохимических и молекулярно-генетических основах формирования качества плодов яблони (*Malus domestica* Borkh.) и груши (*Pyrus* spp.). Рассмотрены основные биохимические показатели, определяющие пищевую и потребительскую ценность плодов, включая содержание растворимых сухих веществ и сахаров, органических кислот, фенольных соединений, аскорбиновой кислоты, пектиновых веществ и ароматических соединений. Показана роль физиологических процессов роста и созревания, дыхания и этиленового обмена в формировании качественных характеристик плодов. Обобщены сведения о кандидатных генах, участвующих в регуляции углеводного и органического кислотного обмена, биосинтезе фенольных соединений и антоцианов, изменении клеточной стенки, созревании и формировании аромата. Особое внимание уделено взаимосвязи генетических факторов с биохимическими признаками качества. Отмечена перспективность комплексного использования биохимического фенотипирования, молекулярных маркеров и анализа экспрессии кандидатных генов для оценки генотипов яблони и груши. Рассмотрены перспективы применения данного подхода при изучении местных и интродуцированных генотипов в условиях Узбекистана для выявления форм, сочетающих высокое качество плодов и адаптацию к неблагоприятным факторам среды.

Ключевые слова: яблоня, груша, качество плодов, биохимические показатели, сахара, органические кислоты, фенольные соединения, кандидатные гены, молекулярные маркеры, созревание, Узбекистан.

Abstract. The article summarizes current knowledge on the physiological, biochemical, and molecular genetic basis of fruit quality formation in apple (*Malus domestica* Borkh.) and pear (*Pyrus* spp.). The main biochemical characteristics determining

the nutritional and consumer value of fruits are considered, including soluble solids and sugars, organic acids, phenolic compounds, ascorbic acid, pectin substances, and volatile aromatic compounds. The role of physiological processes associated with fruit growth and ripening, respiration, and ethylene metabolism in the formation of quality traits is discussed. Information on candidate genes involved in carbohydrate and organic acid metabolism, phenolic and anthocyanin biosynthesis, cell wall modification, fruit ripening, and aroma formation is summarized. Particular attention is paid to the relationship between genetic factors and biochemical quality traits. The potential of combining biochemical phenotyping, molecular markers, and candidate gene expression analysis for the evaluation of apple and pear genotypes is emphasized. The prospects of applying this integrated approach to the study of local and introduced genotypes under the environmental conditions of Uzbekistan are discussed, with the aim of identifying genotypes combining high fruit quality with adaptation to unfavorable environmental factors.

Keywords: apple, pear, fruit quality, biochemical traits, sugars, organic acids, phenolic compounds, candidate genes, molecular markers, fruit ripening, Uzbekistan.

Введение. Яблоня (*Malus domestica* Borkh.) и груша (*Pyrus* spp.) относятся к важнейшим плодовым культурам, ценность которых определяется не только урожайностью и адаптивностью, но и качеством плодов. Современное понятие качества включает комплекс внешних, органолептических, пищевых и биохимических характеристик, среди которых важное значение имеют вкус, аромат, окраска, консистенция мякоти, содержание сахаров, органических кислот, витаминов и биологически активных соединений. Именно сочетание этих признаков определяет потребительскую и пищевую ценность плодов (Седов и др., 2018; Макаренко, 2021). Особое место в оценке качества занимает биохимический состав плодов. Содержание растворимых сухих веществ, сахаров и органических кислот непосредственно связано с формированием вкуса, тогда как фенольные соединения, аскорбиновая кислота и другие антиоксиданты определяют значительную часть биологической ценности плодов. Пектиновые вещества участвуют в формировании структуры и текстуры мякоти, а летучие соединения обуславливают характерный аромат. Многолетние исследования сортов яблони показали значительную изменчивость этих показателей между генотипами, что создаёт возможности для использования биохимических признаков в селекции (Седов и др., 2018; Макаркина, Седов, 2023). Биохимические характеристики плодов формируются под совместным влиянием генотипа и условий среды. Температура, водообеспеченность, освещённость, минеральное питание и сроки созревания могут изменять интенсивность накопления отдельных метаболитов. Однако способность генотипа к синтезу, транспорту и накоплению сахаров, органических кислот, фенольных веществ и других соединений определяется системой генов, регулирующих соответствующие метаболические процессы. Поэтому для понимания механизмов формирования качества необходимо рассматривать биохимические признаки во взаимосвязи с их генетической основой. В последние годы развитие геномных и молекулярных методов значительно расширило возможности

изучения качества плодов. Для яблони выявлены количественные локусы признаков (QTL), молекулярные маркеры и кандидатные гены, связанные с содержанием сахаров и органических кислот, окраской, ароматом, созреванием и хранением плодов (Liu et al., 2022). У груши получение геномных последовательностей и развитие транскриптомных и метаболомных исследований также позволили выявлять гены и метаболические пути, связанные с сахарным обменом, окраской, ароматическими веществами и другими характеристиками качества (Li 2022).

Таким образом, сочетание биохимического фенотипирования и молекулярно-генетического анализа позволяет более полно оценивать генотипы яблони и груши и выявлять перспективные формы с улучшенными показателями качества. Для условий Узбекистана такое направление представляет особый интерес в связи с необходимостью подбора генотипов, сочетающих высокую пищевую и биологическую ценность плодов с адаптацией к местным условиям выращивания. В связи с этим целью настоящего обзора является обобщение современных представлений о физиолого-биохимических признаках качества плодов яблони и груши и анализ кандидатных генов, участвующих в формировании этих признаков, с учётом перспектив их изучения и использования в селекции в условиях Узбекистана.

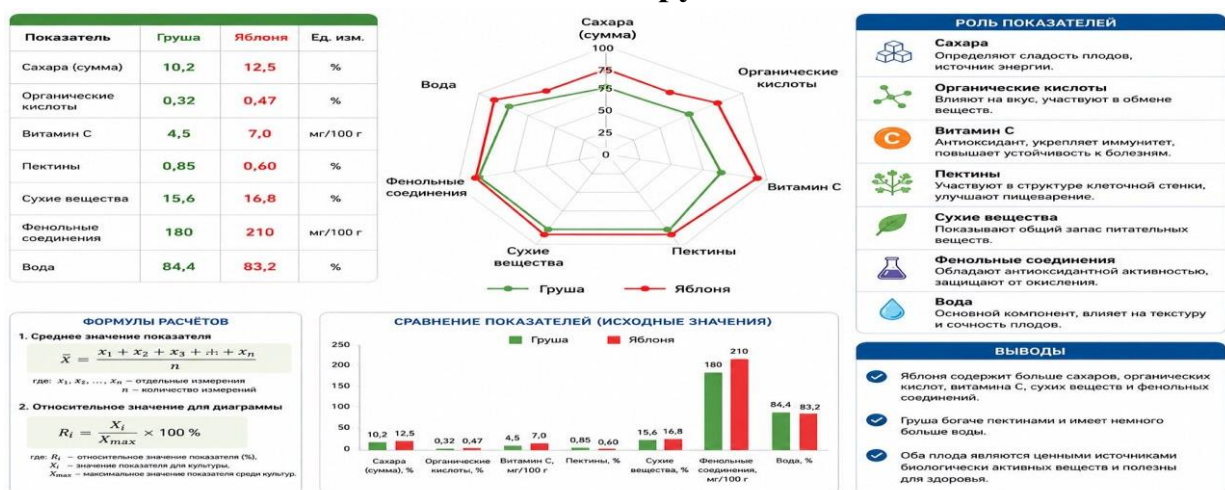
2. Биохимические показатели качества плодов яблони и груши. Биохимический состав плодов является одним из основных критериев их пищевой и потребительской ценности. У яблони и груши качество плодов определяется комплексом взаимосвязанных метаболических признаков, среди которых наиболее важными являются содержание растворимых сухих веществ и сахаров, органических кислот, фенольных соединений, аскорбиновой кислоты, пектиновых веществ и летучих ароматических компонентов. Уровень и соотношение этих соединений зависят как от генотипа, так и от стадии созревания и условий выращивания (Седов и др., 2018; Макаренко, 2021).

2.1 Сахара и растворимые сухие вещества. Сахара относятся к основным компонентам, определяющим вкусовые качества плодов яблони и груши. Основными растворимыми сахарами в плодах являются фруктоза, глюкоза и сахароза. Их количественное соотношение может существенно различаться между сортами, что обуславливает различия во вкусовом восприятии плодов. В грушах, кроме того, значительную роль в углеводном обмене играет сорбитол, который является характерным транспортным углеводом представителей семейства Rosaceae (Седов и др., 2018; Wu et al., 2022). Обобщённым показателем содержания растворимых компонентов плодов является содержание растворимых сухих веществ (TSS), обычно выражаемое в °Brix. Этот показатель широко применяется при сортовой оценке, поскольку в значительной степени отражает накопление растворимых углеводов. Однако TSS не является прямым показателем содержания только сахаров, поскольку включает также органические кислоты, растворимые пектиновые вещества и другие компоненты. Поэтому для более точной характеристики вкусовых свойств целесообразно учитывать TSS совместно с содержанием отдельных сахаров и органических кислот (Макаренко, 2021). Накопление сахаров связано с активностью

ферментов углеводного обмена, а также с транспортом и перераспределением фотоассимилятов в процессе роста и созревания плода. Генетическая регуляция этих процессов включает семейства генов, кодирующих сахарные транспортеры и ферменты метаболизма углеводов. В яблоне и груше выявлены генетические различия, связанные с накоплением растворимых сахаров, что делает данный признак перспективным для молекулярно-генетического изучения (Liu et al., 2022; Wu et al., 2022).

2.2 Органические кислоты и кислотность. Органические кислоты являются второй важной группой соединений, определяющей вкусовые свойства плодов. Для яблони характерно преобладание яблочной кислоты, тогда как у груши также наблюдаются значительные различия в составе и концентрации органических кислот между генотипами. Кислотность плодов определяется не только абсолютным содержанием кислот, но и их соотношением с сахарами, поэтому именно баланс «сахара — кислоты» во многом формирует гармоничность вкуса (Седов и др., 2018). Для практической оценки используют показатели титруемой кислотности и pH. При созревании содержание отдельных органических кислот может изменяться, что сопровождается снижением общей кислотности и изменением вкусового профиля плода. Однако характер и интенсивность этих изменений имеют выраженную сортовую специфику. Метаболизм органических кислот тесно связан с процессами дыхания и функционированием центрального обмена веществ. Генетические исследования яблони показали участие определённых локусов и генов в регуляции накопления яблочной кислоты. Особое внимание уделяется генам, кодирующим транспортёры органических кислот и ферменты их метаболизма, поскольку их активность может определять различия между генотипами по кислотности плодов (Liu et al., 2022).

Рисунок 1. Сравнительная характеристика основных биохимических показателей плодов груши и яблони.



Примечание: показатели представлены в виде средних значений. Содержание биохимических компонентов может варьироваться в зависимости от сорта, степени зрелости плодов, условий выращивания и хранения.

2.3. Фенольные соединения и флавоноиды

Фенольные соединения представляют одну из наиболее разнообразных групп вторичных метаболитов плодов яблони и груши. Они включают фенольные кислоты, флавонолы, флаван-3-олы, антоцианы и проантоцианидины. Эти вещества участвуют в формировании окраски, вкуса и антиоксидантных свойств плодов, а их содержание значительно зависит от генотипа и ткани плода (Feng et al., 2021). Особенно большое значение фенольные соединения имеют для яблони, поскольку в кожице и мякоти различных сортов обнаруживается широкий спектр полифенолов. Их концентрация может значительно различаться между сортами и изменяться в процессе созревания. Более высокое содержание фенольных соединений обычно характерно для кожицы по сравнению с мякотью, что связано с её защитной функцией и воздействием солнечного излучения (Feng et al., 2021). Флавоноиды одновременно участвуют в формировании цвета и защите растительных тканей от неблагоприятных факторов окружающей среды. Синтез этих соединений регулируется сложной системой структурных и регуляторных генов, включая семейства MYB, bHLH и WD40. Поэтому фенольный профиль плодов представляет интерес не только с точки зрения пищевой ценности, но и как признак, который может быть связан с определёнными молекулярными маркерами и генами-кандидатами (Liu et al., 2022).

2.4. Аскорбиновая кислота и антиоксидантные соединения.

Аскорбиновая кислота является важным компонентом пищевой ценности плодов и одновременно выполняет антиоксидантную функцию. Её содержание варьирует между сортами яблони и груши и зависит от генотипа, степени зрелости и условий выращивания. Наряду с аскорбиновой кислотой антиоксидантный потенциал плодов определяется фенольными соединениями и другими веществами, способными участвовать в нейтрализации активных форм кислорода (Макаренко, 2021). Содержание антиоксидантов имеет значение не только для пищевой ценности, но и для устойчивости тканей плода к окислительным процессам во время созревания и хранения. Поэтому изучение антиоксидантного комплекса может рассматриваться как часть комплексной оценки качества и лёжкости плодов.

2.5. Пектиновые вещества и компоненты клеточной стенки.

Пектиновые вещества являются важными структурными компонентами клеточной стенки и непосредственно связаны с консистенцией и плотностью мякоти. В процессе созревания происходят изменения структуры клеточной стенки и состава пектинового комплекса, что приводит к постепенному изменению текстуры плода. Степень этих изменений определяется особенностями генотипа и скоростью созревания (Седов и др., 2018). Размягчение плодов связано с активностью ферментов, участвующих в модификации и распаде компонентов клеточной стенки. Среди наиболее изученных генов-кандидатов выделяют PG, PME, PL и XTH, продукты которых участвуют в изменении структуры пектинов и других компонентов клеточной стенки. Различия в активности этих генов могут быть связаны с сортовыми особенностями плотности мякоти и скоростью размягчения плодов (Liu et al., 2022; Wu et al., 2022).

2.6. Летучие соединения и формирование аромата.

Аромат яблок и груш формируется сложным сочетанием летучих органических соединений. К ним относятся прежде всего эфиры, спирты, альдегиды и некоторые другие соединения. Их состав и концентрация существенно различаются между генотипами и изменяются в процессе созревания. Именно поэтому аромат рассматривается как самостоятельный важный компонент качества плодов наряду со вкусом и текстурой. Формирование летучих веществ связано с несколькими метаболическими путями, включая превращения жирных кислот и аминокислот. В генетическом контроле этих процессов участвуют гены, кодирующие ферменты семейства LOX, ADH и AAT, которые рассматриваются как потенциальные кандидаты при изучении сортовых различий по ароматическому профилю (Liu et al., 2022; Wu et al., 2022).

3. Физиологические процессы, связанные с формированием качества плодов.

Формирование качества плодов яблони и груши представляет собой последовательный процесс, включающий рост, накопление органических веществ, созревание и последующие изменения при хранении. В этот период изменяются содержание сахаров и органических кислот, состояние клеточных стенок, окраска, аромат и консистенция мякоти. Интенсивность и сроки прохождения этих процессов зависят от сортовых особенностей и условий выращивания (Братилова и др., 2012). В период роста плода происходит увеличение размеров клеток и накопление воды и продуктов ассимиляции. По мере приближения к зрелости изменяется направление обменных процессов: возрастает значение накопления растворимых углеводов и других метаболитов, изменяется содержание органических кислот, а также постепенно формируются характерные для сорта вкус, аромат и консистенция. Поэтому календарные сроки созревания и наступления потребительской зрелости являются важными характеристиками генотипа. Исследования различных сортов яблони показывают, что сроки съёма и продолжительность хранения существенно различаются даже при выращивании в сходных условиях (Братилова и др., 2012). Одним из важнейших физиологических процессов при созревании является изменение интенсивности дыхания. Яблоня и груша относятся к климактерическим плодам, поэтому переход к зрелости сопровождается характерными изменениями дыхательного обмена и образованием этилена. Интенсивность этих процессов зависит от генотипа и может быть связана с продолжительностью хранения плодов. Для различных сортов яблони установлены существенные различия по срокам достижения максимума выделения этилена, что отражается на скорости созревания и лёжкости (Гудковский и др., 2012). Этилен является одним из основных регуляторов перехода плода от созревания к старению. Его действие связано с изменением целого комплекса признаков качества, включая размягчение мякоти, изменение окраски, формирование аромата и преобразование химического состава. Практическое значение этилен-зависимых процессов особенно хорошо проявляется при хранении. Исследования плодов груши показали, что подавление действия этилена позволяет замедлять

процессы созревания и старения, дольше сохранять плотность мякоти и товарные качества плодов (Исаев, 2007).

Изменение текстуры плода в процессе созревания связано с преобразованием клеточных стенок и пектиновых веществ. По мере созревания происходит снижение прочности тканей, что приводит к размягчению мякоти. Скорость этого процесса существенно различается между сортами и является одним из важных признаков, определяющих продолжительность потребительского периода и пригодность плодов к хранению. У груши сроки наступления потребительской зрелости также могут значительно отличаться от сроков съёмной зрелости, что отражает особенности физиологии созревания данной культуры (Исаев, 2007). Условия окружающей среды способны существенно модифицировать физиологические процессы плода. Температура, водообеспеченность и условия хранения влияют на дыхание, скорость созревания и сохранение биохимических компонентов. В частности, изменение условий хранения позволяет замедлять метаболические процессы и тем самым продлевать период сохранения потребительских качеств плодов (Медеяева и др., 2024).

Таким образом, физиологические процессы роста, дыхания и созревания создают основу для формирования биохимического и органолептического качества плодов. При этом генотип определяет особенности протекания этих процессов, а условия среды могут существенно изменять их интенсивность. Поэтому дальнейшее изучение генов, регулирующих метаболизм сахаров, органических кислот, этилена, пектиновых веществ и других компонентов качества, позволяет связать физиологические особенности созревания с их молекулярной основой.

4. Кандидатные гены, связанные с биохимическими признаками качества плодов.

Формирование биохимических признаков качества плодов яблони и груши определяется сложной системой генетической регуляции. Содержание сахаров, органических кислот, фенольных соединений, ароматических веществ и структурных компонентов клеточной стенки имеет количественную природу и обычно контролируется не одним геном, а совокупностью генов, взаимодействующих между собой и с условиями среды. Поэтому при изучении качества плодов особое значение приобретают гены-кандидаты, функции которых непосредственно связаны с соответствующими метаболическими путями (Liu et al., 2022).

4.1. Гены, связанные с накоплением сахаров.

Содержание сахаров является одним из основных показателей вкусового качества плодов. У яблони основными растворимыми сахарами являются фруктоза, глюкоза и сахароза; значительную роль также играет сорбитол. Их накопление определяется балансом синтеза, транспорта, расщепления и перераспределения углеводов. В этих процессах участвуют гены семейств SWEET, SUT/SUC, SPS, SUS и INV. Белки SWEET и SUT/SUC участвуют в транспорте сахаров, тогда как SPS и SUS связаны с их синтезом и превращением. Генетические исследования яблони показывают наличие QTL, ассоциированных с содержанием отдельных сахаров, что

подтверждает перспективность данных генов для дальнейшего молекулярного анализа (Liu et al., 2022). Для груши сахарный обмен также имеет выраженную генетическую основу. Особое значение имеет сорбитол, характерный для плодовых культур семейства Rosaceae. Изменения активности генов, регулирующих его синтез, транспорт и превращение, могут отражаться на общем содержании растворимых углеводов и вкусовых характеристиках плодов (Li et al., 2022).

4.2. Гены, регулирующие органические кислоты.

Органические кислоты определяют кислотность плодов и вместе с сахарами формируют один из важнейших показателей вкуса — сахарокислотный баланс. У яблони основную роль играет яблочная кислота. Наиболее изученным генетическим фактором её накопления является локус Ma, связанный с геном MdALMT1 (Ma1). Данный ген кодирует транспортер малата и участвует в его накоплении в вакуолях клеток плода. Различия в аллелях Ma1 связаны с различиями по кислотности яблок. Кроме того, в регуляции вкуса участвуют MdTDT и MdSOT2, связанные соответственно с транспортом органических кислот и обменом сорбитола (Zhao et al., 2021). Таким образом, изучение Ma1, MdTDT и MdSOT2 представляет интерес для определения генетических причин различий между генотипами яблони по вкусовым характеристикам.

4.3. Гены фенольного и антоцианового обмена.

Фенольные соединения участвуют в формировании окраски, вкуса и антиоксидантных свойств плодов. Их биосинтез начинается с фенилаланина и включает последовательную работу ряда ферментов. Среди основных структурных генов выделяют PAL, CHS, CHI, F3H, DFR и UFGT. Особое значение для регуляции накопления флавоноидов имеют транскрипционные факторы семейства MYB, взаимодействующие с белками bHLH и WD40. Формируется регуляторный комплекс MYB-bHLH-WD40, который контролирует экспрессию генов биосинтеза флавоноидов и антоцианов. Поэтому изменение активности регуляторных генов может приводить к различиям в окраске кожицы и содержании фенольных соединений между генотипами яблони и груши (Liu et al., 2022).

4.4. Гены, связанные с размягчением плодов.

Изменение текстуры при созревании связано с перестройкой клеточной стенки и пектинового комплекса. В этом процессе участвуют ферменты полигалактуроназа (PG), пектинметилэстераза (PME), пектатлиаза (PL) и ксилоглюкан-эндотрансглюкозилаза/гидролаза (XTH).

Гены PG, PME, PL и XTH рассматриваются как важные кандидаты при изучении различий между сортами по плотности мякоти и скорости размягчения. Их активность изменяется в процессе созревания и связана с преобразованием компонентов клеточной стенки. Таким образом, анализ экспрессии этих генов может использоваться совместно с биохимической оценкой пектинового комплекса и инструментальным определением твёрдости плодов (Liu et al., 2022; Li et al., 2022).

4.5. Гены этиленового обмена и созревания.

Созревание яблоны и груши тесно связано с этиленом. Ключевыми генами его биосинтеза являются ACS и ACO, кодирующие ферменты последовательных этапов образования этилена. В передаче этиленового сигнала участвуют ETR, EIN и ERF, которые обеспечивают дальнейшую регуляцию экспрессии генов, связанных с созреванием. Особый интерес для яблоны представляет MdACS1. Различия в его активности и аллельном состоянии связаны с интенсивностью образования этилена и особенностями созревания плодов. Поэтому данный ген может рассматриваться как перспективный маркер при оценке сроков созревания и лёжкости сортов.

4.6. Гены формирования аромата.

Аромат яблоны и груши определяется комплексом летучих соединений, среди которых важное место занимают эфиры, спирты и альдегиды. В их образовании участвуют несколько взаимосвязанных метаболических путей. К числу наиболее перспективных генов-кандидатов относятся LOX, ADH и AAT. LOX участвует в превращении жирных кислот, ADH — в метаболизме альдегидов и спиртов, а AAT — в образовании сложных эфиров, многие из которых непосредственно связаны с фруктовым ароматом. У груши транскриптомные исследования выявили значительное количество генов, экспрессия которых связана с различиями в образовании ароматических метаболитов, что подтверждает сложную генетическую природу данного признака (Li et al., 2016). Таким образом, кандидатные гены качества плодов можно условно объединить в несколько функциональных групп: гены сахарного обмена, органических кислот, фенольного метаболизма, клеточной стенки, этиленового обмена и образования ароматических веществ. Их совместное изучение позволяет связать конкретный биохимический признак с его возможной молекулярной основой и создаёт предпосылки для использования молекулярных маркеров в селекции яблоны и груши.

5. Связь кандидатных генов с биохимическими признаками и качеством плодов.

Качество плодов яблоны и груши определяется совокупностью взаимосвязанных признаков, поэтому оценка только одного биохимического показателя не позволяет полностью охарактеризовать генотип. Более информативным является комплексное рассмотрение биохимического состава, фенотипических признаков и генетических факторов, определяющих особенности накопления и преобразования метаболитов. Межсортовая изменчивость содержания сахаров, органических кислот, аскорбиновой кислоты и других соединений подтверждает возможность использования этих показателей при генетической и селекционной оценке плодовых культур (Репях, 2017; Наумова и др., 2023). Особенно показательна связь генетических факторов с углеводным обменом. Различия между генотипами по содержанию растворимых сухих веществ и отдельных сахаров отражают особенности поступления, транспорта и накопления углеводов в плодах. Гены семейств SWEET, SUT/SUC, SPS и SUS участвуют в транспорте и метаболизме сахаров, поэтому изменение их активности потенциально может сопровождаться различиями в сахаристости плодов. При этом содержание сахаров является количественным признаком и формируется в результате

действия нескольких генов и условий среды. Не менее важна связь генетической регуляции с органическими кислотами. Для яблони содержание яблочной кислоты существенно влияет на кислотность и общий сахарокислотный баланс плода. Поэтому при изучении генотипов целесообразно сопоставлять молекулярные характеристики генов, участвующих в транспорте и обмене органических кислот, с титруемой кислотностью и содержанием отдельных кислот. Такой подход позволяет перейти от простой констатации различий между сортами к поиску их генетической основы. Связь генотипа с биохимическими признаками особенно хорошо прослеживается при изучении фенольных соединений и антиоксидантов. Исследования районированных сортов яблони показывают значительную изменчивость содержания биологически активных веществ между генотипами и в разных агроэкологических условиях (Наумова и др., 2023). При этом на накопление фенольных соединений одновременно воздействуют наследственные особенности и факторы среды, поэтому для выявления устойчивых генетических закономерностей необходимо изучать несколько генотипов в сопоставимых условиях. Для текстуры плодов предполагается связь между генами, регулирующими состояние клеточной стенки, и изменением содержания пектиновых веществ. Гены PG, PME, PL и XTH участвуют в процессах модификации компонентов клеточной стенки. Изменение их активности в период созревания может отражаться на размягчении плодов и продолжительности сохранения плотности мякоти. Следовательно, молекулярные показатели целесообразно сопоставлять с инструментальной оценкой твёрдости и содержанием пектиновых веществ. Отдельное значение имеет связь этиленового обмена с биохимическим качеством. Гены ACS и ACO, участвующие в биосинтезе этилена, регулируют процессы, сопровождающие созревание плодов. Через этилен-зависимые механизмы изменяются текстура, интенсивность дыхания, аромат и ряд компонентов химического состава. Поэтому генетические различия по активности этих генов могут быть связаны с различиями между сортами по срокам созревания и лёжкости. Формирование аромата также является результатом взаимодействия генетических и биохимических процессов. Гены LOX, ADH и AAT участвуют в образовании летучих веществ, включая спирты, альдегиды и эфиры. Изменение активности соответствующих метаболических путей способно приводить к различиям в составе летучих соединений и формировать специфический аромат отдельных генотипов.

Таким образом, наиболее перспективной является схема комплексной оценки:

генотип → экспрессия или аллельный вариант гена → метаболический процесс → содержание биохимического компонента → фенотипический признак качества.

Например, активность генов сахарного обмена может быть связана с накоплением сахаров и TSS; гены обмена органических кислот — с кислотностью; регуляторы фенольного пути — с содержанием флавоноидов и окраской; гены клеточной стенки — с пектиновым комплексом и твёрдостью; а гены этиленового и ароматического обмена — со сроками созревания, лёжкостью и ароматом. Такой подход особенно важен для селекции, поскольку позволяет оценивать не только конечный фенотип, но и возможные механизмы его формирования. При этом

выявление устойчивой связи между определённым генетическим вариантом и биохимическим признаком создаёт предпосылки для дальнейшего использования молекулярных маркеров при отборе перспективных генотипов.

6. Перспективы изучения качества плодов яблони и груши в условиях Узбекистана.

Условия Узбекистана характеризуются высокой солнечной радиацией, повышенными температурами в период вегетации, значительными колебаниями водообеспеченности и разнообразием почвенных условий. Эти факторы способны оказывать существенное влияние на рост и развитие плодовых культур, интенсивность обменных процессов и накопление биохимических компонентов в плодах (Ветрова и др., 2025; Наумова и др., 2023). Особое значение представляет изучение сахаров, органических кислот, фенольных соединений, аскорбиновой кислоты, пектиновых веществ и растворимых сухих веществ. Сравнение различных генотипов по данным показателям позволяет выявлять формы, сочетающие высокую пищевую ценность с адаптацией к конкретным условиям выращивания. При этом биохимическая оценка должна проводиться с учётом фазы развития и сроков созревания, поскольку содержание отдельных компонентов изменяется в процессе формирования и созревания плода (Наумова и др., 2023; Тютюма и др., 2021). Перспективным направлением является сопоставление биохимических показателей с молекулярными характеристиками генотипов. Для отобранных форм могут исследоваться кандидатные гены, связанные с накоплением сахаров, органических кислот, фенольных соединений, ароматических веществ и изменением текстуры плодов. Такой комплексный подход позволяет связывать проявление хозяйственно ценных признаков с их генетической основой и повышать эффективность отбора в селекционном процессе (Савельева и др., 2024). Особенно актуально изучение генотипов, способных сохранять высокое содержание биологически активных веществ при повышенных температурах и недостатке влаги. В условиях изменения климата сочетание качества плодов и адаптивности становится одним из перспективных направлений селекции. Поэтому для условий Узбекистана целесообразно оценивать не только абсолютное содержание отдельных биохимических компонентов, но и стабильность их накопления при различных условиях выращивания (Ветрова и др., 2025).

Для Узбекистана перспективной является комплексная система оценки по схеме: генотип → условия выращивания → биохимический профиль → экспрессия кандидатных генов → качество плодов. Такой подход позволит выявлять наиболее ценные генотипы яблони и груши и определять особенности формирования их качества в конкретных экологических условиях. Полученные данные могут использоваться при подборе родительских форм и создании исходного материала для селекции (Савельева и др., 2024).

7. Заключение.

Качество плодов яблони и груши представляет собой комплексный признак, формирующийся в результате взаимодействия генетических особенностей генотипа и условий выращивания. Наиболее значимыми компонентами качества являются

содержание сахаров и органических кислот, растворимых сухих веществ, фенольных соединений, аскорбиновой кислоты, пектиновых веществ и летучих ароматических соединений. Их соотношение определяет вкусовые, пищевые, биологические и технологические свойства плодов (Седов и др., 2018; Наумова и др., 2023). Проведённый анализ показывает, что биохимические признаки являются важной основой дифференциации генотипов яблони и груши. Содержание сахаров и органических кислот определяет вкусовой баланс, фенольные соединения и аскорбиновая кислота характеризуют антиоксидантный потенциал, пектиновые вещества связаны с текстурой и твёрдостью мякоти, а летучие соединения — с формированием аромата. При этом выраженность большинства признаков зависит не только от генотипа, но и от температуры, водообеспеченности, условий питания и сроков созревания (Макаренко, 2021; Тютюма и др., 2021).

Современные молекулярно-генетические исследования позволяют связать данные биохимического фенотипирования с функционированием конкретных генов-кандидатов. Гены SWEET, SPS и SUS связаны с углеводным обменом; ALMT/Ma1 — с метаболизмом органических кислот; PAL, CHS, DFR, UFGT и MYB — с формированием фенольных соединений и окраски; PG, PME, PL и XTH — с изменением клеточной стенки и текстуры; ACS и ACO — с биосинтезом этилена и процессами созревания; LOX, ADH и AAT — с формированием ароматических соединений (Zhao et al., 2021; Liu et al., 2022).

Таким образом, перспективным направлением является объединение биохимического фенотипирования, анализа кандидатных генов и оценки их экспрессии. Такой подход позволяет перейти от простой характеристики сортов к выявлению механизмов формирования отдельных признаков качества и может использоваться для более эффективного отбора перспективных генотипов. Для условий Узбекистана особенно важным является поиск генотипов, которые одновременно характеризуются высоким содержанием ценных биохимических компонентов и способны сохранять качество плодов при повышенных температурах, недостатке влаги и других абиотических стрессах. Комплексная оценка местных и интродуцированных генотипов с использованием биохимических и молекулярных методов может стать основой для формирования селекционного материала, адаптированного к местным условиям. В целом сочетание физиолого-биохимического фенотипирования, молекулярных маркеров и анализа экспрессии кандидатных генов создаёт эффективную научную основу для выявления и отбора высококачественных, биологически ценных и стрессоустойчивых генотипов яблони и груши в условиях Узбекистана.

Список использованной литературы

1. Братилова Н.П., Моксина Н.В., Репях М.В. Влияние сортовых особенностей яблонь, произрастающих в Ботаническом саду им. Вс. М. Крутовского, на сроки сбора плодов и длительность их хранения // Вестник КрасГАУ. 2012. № 6.

2. Ветрова В.В. и др. Результаты изучения влияния минерального питания и погодных условий на биохимический состав плодов яблони сорта Веняминовское //

Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2025. № 1. DOI: 10.31857/S2500208225010039.

3. Гудковский В.А., Кожина Л.В., Балакирев А.Е., Назаров Ю.Б. Влияние генотипа сорта, сроков съёма, загрузки камер и обработки плодов ингибитором биосинтеза этилена на степень развития загара // Вестник МичГАУ. 2012. № 3. С. 120–125.

4. Исаев Р.Д. Использование 1-метилциклопропена для повышения лежкоспособности плодов летних и осенних сортов груши // Материалы научно-практической конференции ВНИИС им. И.В. Мичурина. 2007.

5. Макаренко С.А. Сравнительная оценка биохимии плодов яблони алтайских сортов как источника питательных и биологически активных веществ // Химия растительного сырья. 2021. № 3. С. 245–252. DOI: 10.14258/jcprm.2021039177.

6. Макаркина М.А., Седов Е.Н. Методы селекции яблони на улучшение биохимического состава плодов // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 1. С. 48–52. DOI: 10.31857/2500-2082/2023/1/48-52.

7. Медеяева А.Ю., Брюхина С.А., Трунов Ю.В. Влияние условий хранения на биохимический состав яблок зимних сортов. 2024. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-6-959.

8. Наумова Н.Л., Лукин А.А., Слепнёва Т.Н., Велисевич Е.А. Биохимический состав плодов яблонь районированных сортов, произрастающих в разных агроценозах // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. № 2. С. 255–262. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-2-255-262.

9. Репях М.В. Изменчивость плодов яблони летних сортов по биохимическому составу на территории Ботанического сада им. Вс. М. Крутовского // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 2 (56). DOI: 10.23670/IRJ.2017.56.098.

10. Савельева Н.Н., Макаркина М.А., Седов Е.Н. и др. Сорта яблони Федерального научного центра им. И.В. Мичурина как базис обеспечения селекционного преимущества биохимического состава плодов // Российская сельскохозяйственная наука. 2024. № 6. DOI: 10.31857/S2500262724060069.

11. Седов Е.Н., Макаркина М.А., Серова З.М., Янчук Т.В. Качество плодов у диплоидных, триплоидных, иммунных к парше и колонновидных сортов яблони // Аграрный научный журнал. 2018. № 4. С. 32–37. DOI: 10.28983/asj.v0i4.448.

12. Седов Е.Н., Макаркина М.А., Янчук Т.В., Серова З.М. Биохимический состав плодов отечественных и зарубежных сортов яблони и их использование в селекции // Аграрный научный журнал. 2018. № 8. С. 38–42. DOI: 10.28983/asj.v0i8.546.

13. Тютюма Н.В., Костенко М.Г., Меншутина Т.В. Товарные качества и биохимический состав плодов яблони на клоновых подвоях южной селекции // Аграрный научный журнал. 2021. № 9. С. 38–41. DOI: 10.28983/asj.y2021i9pp38-41.

14. Feng S., Wang L., Belwal T. et al. Systematic Review of Phenolic Compounds in Apple Fruits: Compositions, Distribution, Absorption, Metabolism, and Processing Stability // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2021. Vol. 69, No. 1. P. 7–27. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c05481.

15. Li J., Zhang M., Li X. et al. Pear genetics: Recent advances, new prospects, and a roadmap for the future // Horticulture Research. 2022. Vol. 9. Article uhab040. DOI: 10.1093/hr/uhab040.

16. Li X., et al. Transcriptome profiling reveals the candidate genes associated with aroma metabolites and emission of pear (*Pyrus ussuriensis* cv.) // Scientia Horticulturae. 2016. Vol. 206. P. 33–42. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.04.019.

17. Li X., Qi L., Zang N. et al. Integrated metabolome and transcriptome analysis of the regulatory network of volatile ester formation during fruit ripening in pear // Plant Physiology and Biochemistry. 2022. Vol. 185. P. 80–90. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.04.030.

18. Liu W., Chen Z., Jiang S. et al. Research Progress on Genetic Basis of Fruit Quality Traits in Apple (*Malus × domestica*) // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. Article 918202. DOI: 10.3389/fpls.2022.918202.

19. Zhao H. et al. Unraveling a genetic roadmap for improved taste in the domesticated apple // Molecular Plant. 2021. Vol. 14, No. 9. P. 1454–1471. DOI: 10.1016/j.molp.2021.05.018.