

Научная статья

УДК 634.11:575.822

DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18)

**МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОРТОВ ЯБЛОНИ
СЕЛЕКЦИИ ИНСТИТУТА «ЖИГУЛЕВСКИЕ САДЫ» ПО ГЕНАМ MD-ACS1 И MD-ACO1
БИОСИНТЕЗА ЭТИЛЕНА В ПЛОДАХ ПРИ СОЗРЕВАНИИ И ИХ ХРАНЕНИИ**

Михаил Иванович Дулов^{1✉}, Иван Николаевич Шамшин²¹ Научно-исследовательский институт садоводства и лекарственных растений «Жигулевские сады», Самара, Россия² Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия¹ dulov-tehfak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7118-9520>² ivan_shamshin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4464-1876>

Резюме. Сохранение твердости яблок с сочной и хрустящей мякотью при созревании определяет вкусовые качества плодов, влияет на устойчивость их к механическим повреждениям и патогенам. Выращивание сортов с низким уровнем биосинтеза в плодах способствует более длительному сохранению потребительских достоинств яблок при хранении. Цель исследований – анализ состава аллелей генов Md-ACS1 и Md-ACO1, вовлеченных в биосинтез этилена при созревании плодов сортов яблони селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады». Объектом изучения служили 7 сортов яблони осеннего и 18 сортов зимнего срока созревания плодов. Исследования проводили в лаборатории молекулярно-генетического анализа плодовых растений ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет». Установлено, что все исследуемые сорта яблони являются носителями аллелей Md-ACS1-1 и Md-ACO1-2, одновременное наличие которых в одном генотипе в гомозиготном состоянии указывает на высокий уровень биосинтеза этилена в плодах во время созревания и их хранения. Гетерозиготное состояние в одном генотипе яблони аллелей Md-ACS1-1 и Md-ACS1-2 отмечено у сортов Буян, Волжский шафран осеннего срока созревания и у сортов Красноглинское, Куйбышевское, Маяк Поволжья, Оригинал, Память Королева, Подарок Министру, Рассвет Поволжья зимнего срока созревания. Сорта Буян, Красноглинское, Оригинал, Подарок Министру и Спартанец содержат ген Md-ACO1 в гетерозиготном состоянии (Md-ACO1-1/2). Сочетание гетерозиготных состояний генов Md-ACS1 и Md-ACO1, что определяет средний уровень синтеза этилена в плодах во время созревания и их хранения, идентифицировано у сортов Буян, Красноглинское, Оригинал и Подарок Министру. Данные сорта представляют интерес для производителей яблок и могут быть использованы в селекционных программах как источники селекционно-ценных аллелей по созданию новых форм, обладающих твердой мякотью и хорошей лежкостью плодов при хранении.

Ключевые слова: яблоня, сорт, хранение плодов, биосинтез этилена, аллели гена, гетерозиготность

Для цитирования: Дулов М. И., Шамшин И. Н. Молекулярно-генетический анализ сортов яблони селекции института «Жигулевские сады» по генам Md-ACS1 и Md-ACO1 биосинтеза этилена в плодах при созревании и их хранении // Известия Самарской государственной академии. 2025. Т. 10, № 2. С. 11-18. DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18)

Original article

**MOLECULAR GENETIC ANALYSIS OF APPLE VARIETIES
BREEDED BY THE INSTITUTE "ZHIGULEVSKIE GARDENS" BY THE MD-ACS1 AND MD-ACO1
GENES OF ETHYLENE BIOSYNTHESIS IN FRUITS DURING RIPENING AND THEIR STORAGE**

Mikhail I. Dulov^{1✉}, Ivan N. Shamshin²¹ Research Institute of Horticulture and Medicinal Plants "Zhigulevskie Gardens", Samara, Russia² Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia¹ dulov-tehfak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7118-9520>² ivan_shamshin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4464-1876>

Abstract. The preservation of the hardness of apples with juicy and crispy flesh during maturation determines the taste of the fruits, affects their resistance to mechanical damage and pathogens. The cultivation of varieties with a low level of biosynthesis in fruits contributes to a longer preservation of consumer advantages of apples during storage. The aim of the research was to analyze the composition of alleles of the Md-ACS1 and Md-ACO1 genes involved in ethylene biosynthesis during fruit ripening of apple varieties selected by GBU SB Research Institute «Zhiguli Gardens». The object of study was 7 varieties of autumn apple trees and 18 varieties of winter fruit ripening period. The research was carried out in the laboratory of molecular genetic analysis of fruit plants of the Michurinsk State Agrarian University. It was found that all the studied apple varieties are carriers of the Md-ACS1-1 and Md-ACO1-2 alleles, the simultaneous presence of which in one genotype in a homozygous state indicates a high level of ethylene biosynthesis in fruits during ripening and storage. The heterozygous state in one apple tree genotype of the Md-ACS1-1 and Md-ACS1-2 alleles was noted in the varieties Buyan, Volga saffron of the autumn ripening period and in the varieties Krasnoglinsky, Kuibyshevskoye, Mayak of the Volga region, Original, Memory of Korolev, Gift to the Minister, Dawn of the Volga region of the winter ripening period. The varieties

Buyan, Krasnoglinskoye, Original, Gift to the Minister and Spartan contain the Md-ACO1 gene in a heterozygous state (Md-ACO1-1/2). A combination of heterozygous states of the Md-ACS1 and Md-ACO1 genes, which determines the average level of ethylene synthesis in fruits during maturation and storage, has been identified in the varieties Buyan, Krasnoglinskoye, Original and Gift to the Minister. These varieties are of interest to apple producers and can be used in breeding programs as sources of breeding-valuable alleles for the creation of new forms with hard flesh and good shelf life of fruits during storage.

Keywords: apple tree, variety, fruit storage, ethylene biosynthesis, gene alleles, heterozygosity

For citation: Dulov, M. I., Shamshin, I. N. (2025). Molecular genetic analysis of apple varieties bred by the Institute "Zhigulevskie Gardens" by the Md-ACS1 and Md-ACO1 genes of ethylene biosynthesis in fruits during ripening and storage. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 10, 2. 11-18. (in Russ.). DOI: [10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18](https://doi.org/10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18)

Яблоня домашняя (*Malus domestica* Borkh.) является одной из наиболее экономически значимых культур. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАОСТАТ) в 2023 году яблоню выращивали в 93 странах и производство яблок в мире составило 115,25 млн. т., в том числе в Китае 49,6 млн. т. [1]. В России яблоня отнесена к числу растений, производство и выращивание которых направлено на обеспечение продовольственной безопасности страны. В 2023 году в России яблоню выращивали на площади 201,4 тыс. га и объем производства плодов составил 2,08 млн. т.

Яблоки являются важным компонентом здорового и сбалансированного питания [2]. Потребление яблок в достаточном количестве снижает риск развития заболеваний, связанных с неправильным питанием, снижением иммунитета, нарушениями липидного и углеводного обмена, позволяет помочь предотвратить преждевременное старение организма [3]. В свежем виде плоды яблони употребляют для профилактики инфекционных заболеваний и улучшения работы пищеварительной системы [4].

Важными показателями качества плодов яблони являются текстура, упругость и пригодность их для хранения в течение определенного периода времени. Потребители все чаще требуют твердых яблок с сочной и хрустящей мякотью. Сохранение твердости и консистенции мякоти во время созревания важно не только для вкусовых качеств и устойчивости плодов к механическим повреждениям, но и для снижения восприимчивости их к патогенам, уменьшения активируемых потерь и более длительного сохранения потребительских достоинств яблок при хранении.

Размягчение тканей мякоти плодов, связанное с изменением плотности расположения клеток, клеточной стенки и мембран, тургора клеток, при созревании и хранении яблок происходит в результате протекания нежелательных различных физиологических и биохимических процессов, среди которых важная роль принадлежит биосинтезу этилена [5, 6]. Выращивание сортов с низким уровнем биосинтеза этилена в плодах во время созревания и подавление его действия способствуют повышению сроков хранения яблок [7].

Хранение яблок в камере холодильника с регулируемой газовой средой, применение химических обработок в саду и перед закладкой в хранилище позволяют предотвратить потери от микробиологической порчи и являются эффективными в поддержании стабильного качества плодов в период хранения, но использование данных методов значительно повышает себестоимость яблок. Одним из вариантов частичной замены данных способов, особенно при производстве органической продукции, является применение сортов яблони с низким уровнем биосинтеза этилена в плодах во время созревания и в период их хранения.

Ключевую роль в выработке этилена и потере твердости яблок при хранении играют ферменты 1-аминоциклопропан-1-карбоксилатсинтаза (АЦК-синтаза) и 1-аминоциклопропан-1-карбоновая кислота оксидаза (АЦК-оксидаза). Активность работы ферментов АЦК-синтазы и АЦК-оксидазы кодируется серией генов *Md-ACS* и *Md-ACO* [8]. Ограничивающим фактором в концентрации эндогенного этилена во время созревания плодов яблони в основном являются гены АЦК-синтазы семейства *ACS* [9, 10].

Фермент АЦК-синтаза преобразует S-аденозил-L-метионин в 1-аминоциклопропан-1-карбоновую кислоту (АЦК), которая окисляется до этилена, аммиака, муравьиной кислоты и углекислого газа [11]. В этой связи регуляция активности данного фермента является ключевой в биосинтезе этилена в плодах яблони.

В локусе *Md-ACS1* выявлены аллели *Md-ACS1-1* (489 п. н.) и *Md-ACS1-2* (655 п. н.). Аллель *Md-ACS1-1* приводит к нормальному производству этилена, а аллель *Md-ACS1-2* связана со сниженным уровнем этилена [12]. Гомозиготное состояние аллеля *Md-ACS1-1* (489 п. н.) свидетельствует о максимальном биосинтезе этилена в плодах и невысокой их лежкости. Отсутствие данной гомозиготы в генотипе может служить первым критерием на селекцию сортов яблони с твердыми, длительно хранящимися плодами. Для сортов яблони, гомозиготных по аллелю *Md-ACS1-2*, характерен пониженный, а у гетерозиготных – средний уровень биосинтеза этилена в плодах [13, 14].

В локусе *Md-ACO1* идентифицированы также две аллели: *Md-ACO1-1* (525 п. н.) и *Md-ACO1-2* (587 п. н.). Сорта яблоны, гомозиготные по аллелю *Md-ACO1-1*, отличаются низкой концентрацией эндогенного этилена и при хранении демонстрируют лучшее сохранение твердости мякоти плода, чем гетерозиготные и гомозиготные по аллелю *Md-ACO1-1/2* [15]. Гомозиготное состояние аллеля *Md-ACO1-1* в сочетании с гомозиготностью аллеля *Md-ACS1-2* приводит к еще большему снижению биосинтеза этилена в плодах яблоны, что позволяет дольше сохранять их твердость при хранении в течение нескольких месяцев [13].

Цель исследований: анализ состава аллелей генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1*, вовлеченных в биосинтез этилена при созревании плодов сортов яблоны селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады».

Задачи исследований: провести оценку сортов яблоны по аллелям генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1*, вовлеченных в контроль биосинтеза этилена при созревании и хранении плодов; предоставить селекционерам и производителям яблок информацию о генотипах, проявляющих способность к лучшему сохранению яблок при хранении.

Материалы и методы исследований. Исследования проводили в лаборатории молекулярно-генетического анализа плодовых растений ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет». Объектом исследований служили 7 сортов яблоны осеннего и 18 сортов зимнего срока созревания плодов селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады» (табл. 1). При создании сортов осеннего срока созревания в качестве родительских форм использованы 30,8 % генотипов, полученных до начала XX века и 69,2 % в период до 30^х годов XX века. Сорта зимнего срока созревания получены с участием исходных родительских форм, среди которых 13,9 % были созданы до начала XX века, 69,4 % в первой половине XX века и только 16,7 % в 50-70^х годах XX века.

Таблица 1

Происхождение сортов яблоны селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады»

№ п/п	Сорт	Происхождение
Осенний срок созревания		
1	Аркад волжский	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
2	Буян	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Лобо (Макинтош × св. оп.)
3	Волжский шафран	Антоновка шафранная (Антоновка обыкновенная × Ренет орлеанский) × Пепин лондонский (старинный английский сорт)
4	Жигулевское	Боровинка (народная селекция) × Вагнера призовое (св. оп.)
5	Самара	Спартак (Шаропай × св. оп.) × Голден Делишес Спур (клон сорта Голден Делишес)
6	Сокское розовое	Позднее сладкое (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
7	Спартак	Шаропай (старинный русский сорт) × св. оп.
Зимний срок созревания		
8	Азаровское	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
9	Данко	Куйбышевское (Антоновка шафранная × Ренет орлеанский) × Лобо
10	Князь Засекин	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Вайнспур Делишес (почковая мутация сорта Старкин Делишес)
11	Красноглинское	Позднее сладкое (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
12	Куйбышевское	Антоновка шафранная (Антоновка обыкновенная × Ренет орлеанский) × Пепин лондонский (старинный английский сорт)
13	Кутузовец	Скрыжапель (старинный русский сорт) × Ренет Симиренко (случайный сеянец)
14	Маяк Поволжья	Антоновка (старинный сорт) × Лобо (Макинтош × св. оп.)
15	Оригинал	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Орлик (Макинтош × Бессемянка Мичуринская)
16	Память Кедрина	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Орлик (Макинтош × Бессемянка Мичуринская)
17	Память Королева	Куйбышевское (Антоновка шафранная × Ренет орлеанский) × Лобо (Макинтош × св. оп.)
18	Подарок министру	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
19	Рассвет Поволжья	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
20	Самарский сувенир	Кутузовец (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Память Мичурина (Шампарен-китайка × св. оп.)
21	Самарчанин	(5-10-3 × 4-2-13-28-1 (Спартак × Анис Альп) × Орлик (Макинтош × Бессемянка Мичуринская)
22	Синап самарский	Жигулевское (Боровинка × Вагнера призовое) × Северный синап (Кандиль-китайка × св. оп.)
23	Спартанец	Позднее сладкое (Скрыжапель × Ренет Симиренко) × Спартак (Макинтош × Желтый Ньютаун)
24	Скиф	Спартак (Шаропай × св. оп.) × Кубань спур (клон сорта Кубань)
25	Янтарь самарский	Скрыжапель красный (старинный русский сорт) × Корей (Голден Делишес × Индо)

Выделение ДНК проводили из молодых листьев с использованием метода ЦТАБ [16] с модификациями. Постановку амплификации осуществляли с использованием мастер-микса для ПЦР 5XMasDDTaqMIX-2025 от производственно-коммерческого закрытого акционерного общества «ДИАПАТ ЛТД» (Россия). Состав реакционной смеси объемом 25 мкл: матричная ДНК (20 нг/мкл) – 1,5 мкл; праймер прямой – 0,5 мкл (концентрация 10 пМ/мкл); праймер обратный – 0,5 мкл (концентрация 10 пМ/мкл); мастер-микс – 5 мкл; деионизированная вода – 17,5 мкл.

Для обнаружения у сортов яблок аллелей гена *Md-ACS1* применяли маркер *Md-ACS1*, гена *Md-ACO1* – маркер *Md-ACO1* [12]. Праймеры синтезированы ООО «Синтол» (Россия). Нуклеотидные последовательности праймерных пар представлены в таблице 2.

Таблица 2

Нуклеотидная последовательность праймерных пар, используемых в работе

Название	Последовательность
Md-ACSI F	5'-AGAGAGATGCCATTTTGTTCGTAC-3'
Md-ACSI R	5'-CCTACAACTTGCGTGG GGATTATAAGTGT-3'
Md-ACO1 F	5'-TCCCCCAATGCACCACTCCA-3'
Md-ACO1 R	5'-GATTCCTTGGCCTTCATAGCTTC-3'

Реакцию проводили с помощью амплификаторов SimpliAmp («Applied Biosystems», USA), «ДТ-прайм» («ДНК-технология», Россия) по следующей программе: для маркера *Md-ACSI* – 4 мин при 94 °С; следующие 35 циклов: 1 мин при 94 °С, 1 мин при 58 °С, 1 мин синтез при 72 °С; финальный цикл синтеза 7 мин. при 72 °С; для маркера *Md-ACO1* – 2 мин при 94 °С; следующие 25 циклов: 45 с при 65 °С, 2 мин при 72 °С, 45 с синтез при 94 °С; 1 цикл: 65 °С – 45 с; 72 °С – 10 мин.

Продукты амплификации разделяли путем электрофореза в 2-процентном агарозном геле. После электрофореза гель анализировали в ультрафиолетовом свете с использованием трансиллюминатора.

Результаты исследований. Для всех исследуемых сортов яблони, несущих различные аллельные комбинации генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1*, получены четкие результаты электрофоретического разделения продуктов ПЦР (рис. 1, 2).

Данные аллельного полиморфизма по локусу *Md-ACS1* показали, что гомозиготное состояние по аллелю *Md-ACS1-2*, связанное с низким уровнем выделения этилена в плодах при созревании и продолжительным сроком их хранения без потери потребительских качеств, не было обнаружено ни у одного из изучаемых сортов яблони селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады» (табл. 3).

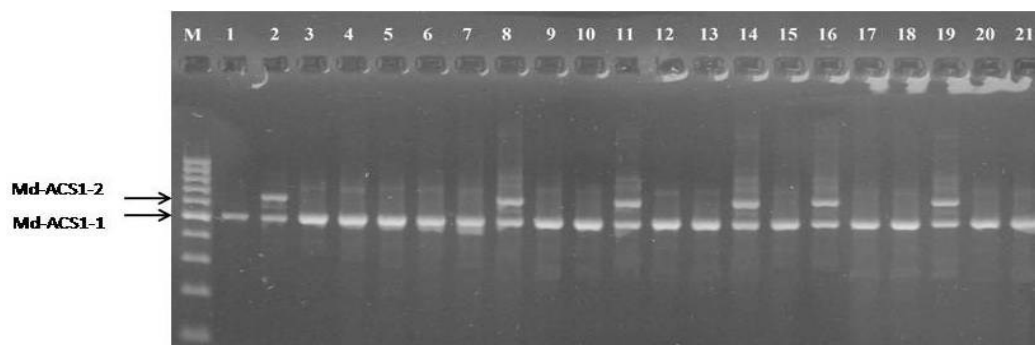


Рис. 1. Электрофореграмма идентификации аллелей гена *Md-ACS1* у сортов яблони:

1 – Азаровское, 2 – Буян, 3 – Спартанец, 4 – Самарский сувенир, 5 – Самарчанин, 6 – Синап самарский, 7 – Скиф, 8 – Красноглинское, 9 – Кутузовец, 10 – Самара, 11 – Память Королева, 12 – Сокское розовое, 13 – Спартак, 14 – Куйбышевское, 15 – Жигулевское, 16 – Подарок Министру, 17 – Аркад волжский, 18 – Князь Засекин, 19 – Маяк Поволжья, 20 – Память Кедрина, 21 – Янтарь самарский, М – маркер молекулярного размера (шаг 100 п.н.)

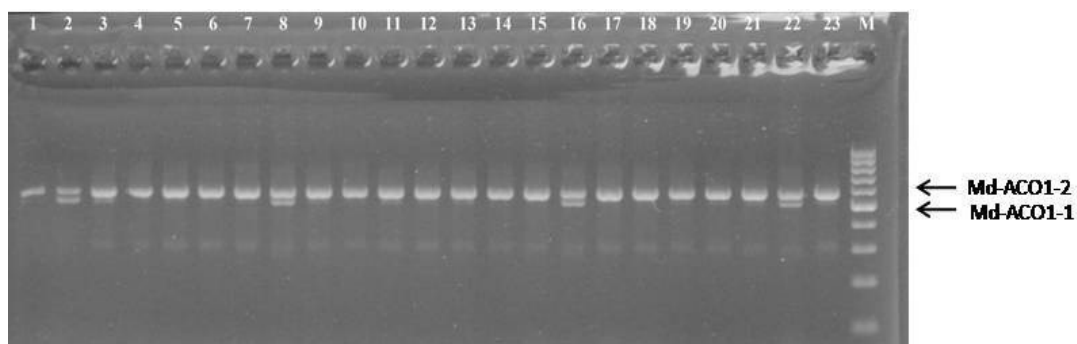


Рис. 2. Электрофореграмма идентификации аллелей гена *Md-ACO1* у сортов яблони:

1 – Азаровское, 2 – Буян, 3 – Спартанец, 4 – Самарский сувенир, 5 – Самарчанин, 6 – Синап самарский, 7 – Скиф, 8 – Красноглинское, 9 – Кутузовец, 10 – Самара, 11 – Память Королева, 12 – Сокское розовое, 13 – Спартак, 14 – Куйбышевское, 15 – Жигулевское, 16 – Подарок Министру, 17 – Аркад волжский, 18 – Князь Засекин, 19 – Маяк Поволжья, 20 – Память Кедрина, 21 – Янтарь самарский, 22 – Оригинал, 23 – Рассвет Поволжья, М – маркер молекулярного размера (шаг 100 п.н.)

Выявлено, что все анализируемые сорта яблони несут аллель *Md-ACS1-1*, а более 70,0 % сортов осеннего и около 40,0 % сортов зимнего срока созревания имеют данный аллель в гомозиготном состоянии. Гомозиготность по аллелю *Md-ACS1-1* указывает на высокий уровень биосинтеза этилена в плодах при созревании и не является селекционно-ценным признаком при создании сортов с твердой мякотью и хорошей лежкостью яблок после сбора урожая. Высокая частота встречаемости аллеля *Md-ACS1-1* в гомозиготном состоянии, скорее всего, связана с использованием в качестве исходных родительских форм сортов отечественной селекции, полученных в XVIII-XIX веках или созданных в начале XX века.

Таблица 3

Аллельное разнообразие генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1* сортов яблони селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады»

Гены биосинтеза этилена					
№ п/п	Сорт	Md-ACS1		Md-ACO1	
		Md-ACS1-1 489 п.н.	Md-ACS1-2 655 п.н.	Md-ACO1-1 525 п.н.	Md-ACO1-2 587 п.н.
Осенний срок созревания					
1	Аркад волжский	1*	0	0	1
2	Буян	1	1	1	1
3	Волжский шафран	1	1	0	1
4	Жигулевское	1	0	0	1
5	Самара	1	0	0	1
6	Сокское розовое	1	0	0	1
7	Спартак	1	0	0	1
Зимний срок созревания					
8	Азаровское	1	0	0	1
9	Данко	1	0	0	1
10	Князь Засекин	1	0	0	1
11	Красноглинское	1	1	1	1
12	Куйбышевское	1	1	0	1
13	Кутузовец	1	0	0	1
14	Маяк Поволжья	1	1	0	1
15	Оригинал	1	1	1	1
16	Память Кедрина	1	0	0	1
17	Память Королева	1	1	0	1
18	Подарок Министру	1	1	1	1
19	Рассвет Поволжья	1	1	0	1
20	Самарский сувенир	1	0	0	1
21	Самарчанин	1	0	0	1
22	Синап самарский	1	0	0	1
23	Спартанец	1	0	1	1
24	Скиф	1	0	0	1
25	Янтарь самарский	1	0	0	1

* «1» – наличие маркера; «0» – отсутствие маркера.

 – наличие у образцов двух маркеров лежкости.

Наличие и сочетание в одном генотипе яблони аллелей *Md-ACS1-1* и *Md-ACS1-2* обуславливает средний или пониженный уровень синтеза эндогенного этилена в плодах при хранении [17]. Из исследуемых нами образцов (25 сортов) гетерозиготами (*Md-ACS1-1/2*) являются сорта Буян, Волжский шафран осеннего срока созревания и сорта Красноглинское, Куйбышевское, Маяк Поволжья, Оригинал, Память Королева, Подарок Министру, Рассвет Поволжья зимнего срока созревания, что представляет интерес для производителей яблок и ценность для селекции, так как определяет средний уровень синтеза этилена в плодах во время их созревания и хранения.

Ген *Md-ACO1* оказывает менее сильное влияние на биосинтез этилена в плодах при созревании яблок и действует независимо от гена *Md-ACS1*. Аллельные различия гена *Md-ACO1* обусловлены наличием в генотипе InDel (Insertion/Deletion) сайта в третьем интроне с размером инсерции в 62 пары нуклеотидов. Мутация аллеля 1 (InDel в третьем интроне) гена *Md-ACO1* (*Md-ACO1-1*) связана со снижением выработки этилена [12]. Гомозиготные по аллелю *Md-ACO1-1* сорта яблони синтезируют меньшее количество этилена, чем гетерозиготные и гомозиготные по аллелю *Md-ACO1-2*.

Анализ аллельного полиморфизма по локусу *Md-ACO1* показал отсутствие в генотипе исследуемых сортов дефектного аллеля *Md-ACO1-1* в гомозиготном состоянии, что указывало бы на низкий уровень биосинтеза

этилена в плодах при созревании и их хранении. Все сорта осеннего и зимнего сроков созревания содержат аллель *Md-ACO1-2* и 84,0 % из них являются гомозиготами по данному аллелю. В исследуемой выборке сорта Буян, Красноглинское, Оригинал, Подарок Министру и Спартавец содержат ген *Md-ACO1* в гетерозиготном состоянии (*Md-ACO1-1/2*).

Сочетание гетерозиготных состояний генов *Md-ACS1* (*Md-ACS1-1/2*) и *Md-ACO1* (*Md-ACO1-1/2*), детерминирующих относительно пониженный уровень биосинтеза этилена в плодах во время созревания и при их хранении, идентифицировано у сорта Буян осеннего срока созревания и у сортов Красноглинское, Оригинал, Подарок Министру зимнего срока созревания плодов. Данные сорта представляют интерес для производителей яблок и могут быть использованы в селекционных программах как источники селекционно-ценных аллелей по созданию новых форм, обладающих твердой мякотью и хорошей лежкостью плодов при хранении. В зависимости от комбинаций скрещиваний в полученном гибридном материале ожидаемое количество генотипов, несущих ценные аллели *Md-ACS1-2/2* и *Md-ACO1-1/1*, может быть значительно увеличено.

Проведенный ранее анализ полиморфизма генов *Md-ACO1* и *Md-ACS1* показал, что дефектные аллели, обуславливающие сниженную выработку этилена, имеют наибольшее распространение среди сортов зарубежной селекции. При этом частота встречаемости гомозиготных форм по таким аллелям преобладает над отечественными сортами для аллеля *Md-ACS1-1/2* в два раза, а для аллеля *Md-ACO1-1-1* практически в три раза [18]. Вероятно, отбор по степени сохранности плодов не был приоритетным для отечественных селекционеров, поэтому доля исходных форм с признаком длительной лежкости незначительна.

Значительная часть анализируемых нами генотипов получена с участием стародавних сортов отечественной и зарубежной селекции. Возможно, это является причиной незначительного распространения аллелей сниженного биосинтеза этилена.

Заключение. Оценка генетического полиморфизма исследуемых сортов яблони осеннего и зимнего срока созревания селекции ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады» по аллелям генов, вовлеченных в контроль биосинтеза этилена в плодах во время созревания и их хранения, показала, что все генотипы одновременно являются носителями аллелей *Md-ACS1-1* и *Md-ACO1-2*.

Наличие и сочетание в одном генотипе яблони аллелей *Md-ACS1-1* и *Md-ACS1-2* отмечено у сортов Буян, Волжский шафран осеннего срока созревания и у сортов Красноглинское, Куйбышевское, Маяк Поволжья, Оригинал, Память Королева, Подарок Министру, Рассвет Поволжья зимнего срока созревания. Сорта Буян, Красноглинское, Оригинал, Подарок министру и Спартавец содержат ген *Md-ACO1* в гетерозиготном состоянии (*Md-ACO1-1/2*).

Сочетание гетерозиготных состояний генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1*, что определяет средний уровень синтеза этилена в плодах во время созревания и их хранения, идентифицировано у сорта Буян осеннего срока созревания и у сортов Красноглинское, Оригинал, Подарок Министру зимнего срока созревания плодов. Данные сорта представляют интерес для производителей яблок и могут быть использованы в селекционных программах как источники селекционно-ценных аллелей по созданию новых форм, обладающих твердой мякотью и хорошей лежкостью плодов при хранении.

Список источников

1. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Данные в области продовольствия и сельского хозяйства. [Электронный ресурс]. Дата обращения: 05.03.2025. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru> (дата обращения: 05.03.2025).
2. Дулов М. И. Биохимический состав и производство яблок в странах мира // Наукосфера. 2022. № 2-1. С. 90-96. EDN: FZSPKG
3. Ефимцева Э. А., Челпанова Т. И. Яблоки как источник растворимых и нерастворимых пищевых волокон. Влияние пищевых волокон на аппетит // Физиология человека. 2020. Т. 46, № 2. С. 121-132. DOI: [10.31857/S0131164620020058](https://doi.org/10.31857/S0131164620020058) EDN: LOPEJR
4. Mierczak K., Garus-Pakowska A. An Overview of Apple Varieties and the Importance of Apple Consumption in the Prevention of Non-Communicable Diseases - A Narrative Review // Nutrients, 2024. Vol.16 (19), 3307. DOI: [10.3390/nu16193307](https://doi.org/10.3390/nu16193307) EDN: NFZVDY
5. Дулов М. И. Уборка урожая, хранение и переработка плодов яблони // Традиции и инновации в современной науке и образовании: теория и передовая практика. 2021. С. 235-252.
6. Johnston J. W., Hewett E. W., Hertog M. L. A. T. M. Postharvest softening of apple (*Malus domestica*) fruit: A review // New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2002. 30:3, 145-160. DOI: [10.1080/01140671.2002.9514210](https://doi.org/10.1080/01140671.2002.9514210)
7. Минин А. Н., Кузнецов А. А., Антипенко М. И. [и др.]. Садоводство в Среднем Поволжье. Самара : ООО "Слово", 2021. ISBN: 978-5-6047579-5-6 EDN: CEXYIF
8. Sunako, T., Sakuraba, W., Senda, M., Akada, S., Ishikawa, R., Niizeki, M., & Harada, T. (1999). An allele of the ripening-specific 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase gene (ACS1) in apple fruit with a long storage life // Plant Physiol. Vol. 119 (4). P. 1297-1304. DOI: [10.1104/pp.119.4.1297](https://doi.org/10.1104/pp.119.4.1297)

9. Harada, T., Sunako, T., Wakasa, Y., Soejima, J., Satoh, T., & Niizeki, M. (2000). An allele of the 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase gene (Md-ACS1) accounts for the low level of ethylene production in climacteric fruits of some apple cultivars. // *Theoretical and Applied Genetics*. 2000. Vol. 101. P. 742-746. DOI: [10.1007/s001220051539](https://doi.org/10.1007/s001220051539) EDN: AVIIQV
10. Oraguzie N. C., Iwanami H., Soejima J. [et al.]. Inheritance of the Md-ACS1 gene and its relationship to fruit softening in apple (*Malus x domestica* Borkh.) // *Theoretical and Applied Genetics*. 2004. Vol. 108. P. 1526-1533. DOI: [10.1007/s00122-003-1574-8](https://doi.org/10.1007/s00122-003-1574-8) EDN: EBVADD
11. Adams D. O., Yang S. F. Ethylene biosynthesis: Identification of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid as an intermediate in the conversion of methionine to ethylene // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1979. Vol. 7. P.170-174. DOI: [10.1073/pnas.76.1.170](https://doi.org/10.1073/pnas.76.1.170)
12. Costa F., Stella S., Van de Weg W. E. [et al.]. Role of the genes Md-ACO1 and Md-ACS1 in ethylene production and shelf life of apple (*Malus domestica* Borkh.) // *Euphytica*. 2005. Vol. 141. P. 181-190. DOI: [10.1007/s10681-005-6805-4](https://doi.org/10.1007/s10681-005-6805-4)
13. Zhu Y., Barritt B. H. Md-ACS1 and Md-ACO1 genotyping of apple (*Malus x domestica* Borkh.) breeding parents and suitability for marker-assisted selection // *Tree Genetics and Genomes*. 2008. Vol. 4. P. 555-562. DOI: [10.1007/s11295-007-0131-z](https://doi.org/10.1007/s11295-007-0131-z) EDN: LIPDNG
14. Шамшин И. Н., Тележинский Д. Д., Шлявас А. В. Оценка сортов яблони Свердловской селекционной станции садоводства по генам биосинтеза этилена с использованием молекулярных маркеров // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020. Т. 21. № 6. С. 706-712. DOI: [10.30766/2072-9081.2020.21.6.706-712](https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.6.706-712) EDN: JYXOTB
15. Costa F., Peace C. P., Stella S. [et al.]. QTL dynamics for fruit firmness and softening around an ethylene-dependent polygalacturonase gene in apple (*Malus x domestica* Borkh.) // *Journal of Experimental Botany*. 2010. Vol. 61(11). P. 3029-3039. DOI: [10.1093/jxb/erq130](https://doi.org/10.1093/jxb/erq130) EDN: MPGJUN
16. Doyle J. J., Doyle J. L. Isolation of Plant DNA from Fresh Tissue // *Focus*. 1990. Vol. 12, № 1. P. 13-15.
17. Супрун И. И., Токмаков С. В., Добренков Е. А. Идентификация аллельных комбинаций гена Md-ACS 1 у некоторых отечественных автохтонных сортов яблони // *Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*. 2018. Т. 14. С. 26-29. DOI: [10.30679/2587-9847-2018-14-26-29](https://doi.org/10.30679/2587-9847-2018-14-26-29) EDN: YWTPTG
18. Дулов М. И. Частота встречаемости аллелей генов, вовлеченных в биосинтез этилена и лежкость плодов у сортов яблони российской и зарубежной селекций // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023. № 3(63). С. 51-57. DOI: [10.18286/1816-4501-2023-3-51-57](https://doi.org/10.18286/1816-4501-2023-3-51-57) EDN: RYSFRJ

References

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Data in the field of food and agriculture. [Electronic resource]. Update date: 03.05.2025. URL: <https://www.fao.org/faostat/ru> (date of request: 03.05.2025).
2. Dulov, M. I. (2022). Biochemical composition and production of apples in the countries of the world. *Naukosphere*, 2-1. 90-96. (in Russ.).
3. Efimtseva, E. A. & Chelpanova, T. I. (2020). Apples as a source of soluble and insoluble dietary fiber. The effect of dietary fiber on appetite. *Human Physiology*. 46, 2. 121-132. (in Russ.).
4. Mierczak, K. & Garus-Pakowska, A. (2024). An Overview of Apple Varieties and the Importance of Apple Consumption in the Prevention of Non-Communicable Diseases - A Narrative Review. *Nutrients*. 16 (19), 3307.
5. Dulov, M. I. (2021). Harvesting, storage and processing of apple fruits. In *traditions and innovations in modern science and education: theory and best practice* (pp. 235-252) (in Russ.).
6. Johnston, J. W., Hewett, E. W., & Hertog, M. L. (2002). Postharvest softening of apple (*Malus domestica*) fruit: a review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 30(3), 145-160.
7. Minin, A. N., Kuznetsov, A. A., Antipenko, M. I., Savin, E. Z., Sobolev, G. I., Gaetsky, M. P.,... & Nikiforova, O. I. (2021). Gardening in the Middle Volga region. (in Russ.).
8. Sunako, T., Sakuraba, W., Senda, M., Akada, S., Ishikawa, R., Niizeki, M., & Harada, T. (1999). An allele of the ripening-specific 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase gene (ACS1) in apple fruit with a long storage life. *Plant Physiology*, 119(4), 1297-1304.
9. Harada, T., Sunako, T., Wakasa, Y., Soejima, J., Satoh, T., & Niizeki, M. (2000). An allele of the 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase gene (Md-ACS1) accounts for the low level of ethylene production in climacteric fruits of some apple cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*, 101, 742-746.
10. Oraguzie, N. C., Iwanami, H., Soejima, J., Harada, T., & Hall, A. (2004). Inheritance of the Md-ACS1 gene and its relationship to fruit softening in apple (*Malus x domestica* Borkh.). *Theoretical and Applied Genetics*, 108, 1526-1533.
11. Adams, D. O., & Yang, S. (1979). Ethylene biosynthesis: identification of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid as an intermediate in the conversion of methionine to ethylene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 76(1), 170-174.
12. Costa, F., Stella, S., Van de Weg, W. E. [et al.]. (2005). Role of the genes Md-ACO1 and Md-ACS1 in ethylene production and shelf life of apple (*Malus domestica* Borkh.). *Euphytica*. 141. 181-190.
13. Zhu, Y. & Barritt, B. H. (2008). Md-ACS1 and Md-ACO1 genotyping of apple (*Malus x domestica* Borkh.) breeding parents and suitability for marker-assisted selection. *Tree Genetics and Genomes*. 4. 555-562.
14. Shamshin, I. N., Telezhinsky, D. D., & Shlyavas, A.V. (2020). Evaluation of apple varieties of the Sverdlovsk horticultural breeding station by genes of ethylene biosynthesis using molecular markers. *Agrarian Science of the Euro-North-East*, 21(6), 706-712. (in Russ.).

15. Costa, F., Peace, C. P., Stella, S. [et al.]. (2010). QTL dynamics for fruit firmness and softening around an ethylene-dependent polygalacturonase gene in apple (*Malus × domestica* Borkh.). *Journal of Experimental Botany*. 61(11). 3029-3039.
16. Doyle, J. J. & Doyle, J. L. (1990). Isolation of Plant DNA from Fresh Tissue. *Focus*. 12, 1. 13-15.
17. Suprun, I. I., Tokmakov, S. V., & Dobrenkov, E. A. (2018). Identification of allelic combinations of the Md-ACS 1 gene in some domestic autochthonous apple varieties. *Scientific works of the North Caucasus Federal Scientific Center for Horticulture, Viticulture, and Winemaking*, 14, 26-29. (in Russ.).
18. Dulov, M. I. (2023). Frequency of occurrence of alleles of genes involved in ethylene biosynthesis and fruit shelf life in apple varieties of Russian and foreign breeding. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 3(63). 51-57. (in Russ.).

Информация об авторах:

М. И. Дулов – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник;

И. Н. Шамшин – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией молекулярно-генетического анализа плодовых растений.

Information about the authors:

M. I. Dulov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, leading Researcher;

I. N. Shamshin – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Molecular Genetic Analysis of Fruit Plants.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 23.05.2025; принята к публикации 27.05.2025.
The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 23.05.2025; accepted for publication 27.05.2025.