

Технологии хранения плодов яблони сорта Джеромин: от традиционных к инновационным

ФГБНУ «ФНЦ им. И.В. Мичурина»,
г. Мичуринск, Российская Федерация

В.А. Гудковский, Л.В. Кожина, Ю.Б. Назаров, А.В. Сутормина

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Владимир Александрович Гудковский
E-mail: gudkovskiy37@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гудковский, В.А., Кожина, Л.В., Назаров, Ю.Б., & Сутормина, А.В. (2025). Эффективность хранения плодов сорта Джеромин в обычной, регулируемой и динамичной регулируемой атмосферах. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(3), 38–66. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.3.666>

ПОСТУПИЛА: 2.05.2025

ПРИНЯТА: 15.09.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Сбалансированное питание является необходимым условием поддержания здоровья человека. Плоды яблони – самые потребляемые фрукты, производимые в регионах мира с умеренным климатом. Окрашенные сладкие сорта (Джеромин) пользуются повышенным спросом у потребителей. С разной эффективностью технологии хранения в обычной (ОА), регулируемой атмосфере с ультранизким содержанием кислорода (УЛО) и динамичной регулируемой атмосфере (ДРА) регулируют/управляют созреванием фруктов, что обеспечивает потребителям круглогодичный доступ к плодам высокого/приемлемого качества с полезными для здоровья компонентами. Для относительно нового сорта Джеромин не изучено влияние послеуборочных факторов на восприимчивость к физиологическим заболеваниям, продолжительность хранения. В связи с этим в работе впервые осуществляется разработка технологии ДРА.

Цель: Выявить восприимчивость плодов сорта Джеромин к физиологическим заболеваниям при хранении, проследить влияние метеорологических условий предуборочного периода на развитие физиологических заболеваний, изучить влияние 4 существующих (ОА-контроль, ОА+1-МЦП, УЛО-контроль, УЛО+1-МЦП) и 2 разрабатываемых технологий хранения (ДРА-контроль, ДРА+1-МЦП) на физиолого-биохимические и др. показатели качества, а также на восприимчивость к заболеваниям, продолжительность хранения плодов для создания системы круглогодичного хранения сорта.

Материалы и методы: Объектом исследования служили плоды яблони сорта Джеромин, часть плодов обрабатывали 1-МЦП, контрольные и обработанные партии хранили в условиях ОА, УЛО и ДРА, определяли этилен, α -фарнезен и продукты его окисления (КТ281), твердость, сухие растворимые вещества, кислотность, потери от заболеваний, повреждений и др.

Результаты: В зависимости от наличия факторов ингибирования метаболизма плодов эффективные сроки хранения плодов сорта Джеромин при 6 изученных технологиях составляют: ОА-контроль – до 3,5 мес., ОА+1-МЦП – до 5 мес., УЛО-контроль – 4–5 мес., УЛО+1-МЦП – 8–9 мес., ДРА-контроль – 9–10 мес., ДРА+1-МЦП – 9–11 мес. Хранение плодов сорта Джеромин при использовании технологии ДРА-контроль с эффективным арсеналом средств ингибирования созревания плодов обеспечивает защиту от загара, минимизацию потерь от подкожной пятнистости, исключение потерь от коричневой пятнистости, увеличение продолжительности хранения до 9–10 месяцев при максимальной дегустационной оценке потребителем.

Выводы: Система хранения плодов сорта Джеромин (6 технологий) обеспечивает сохранение высококачественной продукции и возможность её успешной реализации на российском рынке в период от 3,5 до 11 месяцев после съема, т. е. практически до нового урожая. Высокий уровень сохранения товарного и потребительского качества (вкус, аромат), отсутствие химических обработок в послеуборочный период определяют предпочтительность технологии ДРА-контроль для потребителя и серьезные основания для её промышленного освоения. В связи с возрастающими требованиями потребителя к качеству и безопасности плодов, а также рисками поражения плодов МЦП-опосредованными заболеваниями у технологий хранения с послеуборочной обработкой 1-МЦП (ОА+1-МЦП, УЛО+1-МЦП) снижается конкурентоспособность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

плоды яблони; Джеромин; 1-МЦП; ОА; УЛО; ДРА; метаболизм; твердость; физиологические заболевания яблук

Storage Technologies for Jeromin Apples: From Traditional to Innovative

I.V. Michurin Federal Scientific Center,
Michurinsk, Russian Federation

Vladimir A. Gudkovsky, Lyudmila V. Kozhina, Yuri B. Nazarov,
Alena V. Sutormina

CORRESPONDENCE:

Vladimir A. Gudkovsky

E-mail: gudkovskiy37@mail.ru

FOR CITATIONS:

Gudkovsky, V.A., Kozhina, L.V.,
Nazarov, Yu.B., & Sutormina, A.V. (2025).
Storage technologies for Jeromin
apples: From traditional to innovative.
Storage and Processing of Farm Products,
33(3), 38–66. [https://doi.org/10.36107/
spfp.2025.3.666](https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.666)

RECEIVED: 2.05.2025

ACCEPTED: 15.09.2025

PUBLISHED: 30.09.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Balanced nutrition is essential for maintaining human health. Apple fruits are the most consumed fruits produced in temperate regions of the world. Red-colored sweet apple cultivars (Jeromin) are in high demand among consumers. Storage technologies with regular (RA), controlled atmosphere with ultra-low oxygen (ULO) and dynamic controlled atmosphere (DCA) regulate/manage fruit ripening with different efficiency, which provides year-round access to fruits of high/acceptable quality with healthy components for consumers. The influence of post-harvest factors on susceptibility to physiological diseases and effective storage period for a relatively new apple cultivar Jeromin has not been studied, DCA technology is being developed for the first time.

Purpose: To identify the susceptibility of apple fruits cv. Jeromin to physiological storage diseases, to track the influence of meteorological conditions of the pre-harvest period on the development of physiological diseases, to study the influence of 4 existing (RA-control, RA+1-MCP, ULO-control, ULO+1-MCP) and 2 storage technologies under development (DCA-control, DCA+1-MCP) on physiological, biochemical and other quality indicators of apples, its susceptibility to diseases, and the storage duration to create a year-round storage system for the cultivar.

Materials and Methods: The objects of the study were the apple fruits cv. Jeromin; some of the fruits were treated with 1-MCP, the control and treated lots were stored under RA, ULO and DCA conditions; ethylene, α -farnesene and its oxidation products (CT281), fruit firmness, dry soluble substances content, titratable acidity, losses from diseases, etc. were determined.

Results: Depending on the presence of factors inhibiting fruit metabolism, the effective storage periods of the apple fruits cv. Jeromin using the 6 studied technologies are: RA-control (up to 3.5 months), RA+1-MCP (up to 5 months), ULO-control (4–5 months), ULO+1-MCP (8–9 months), DCA-control (9–10 months), DCA+1-MCP (9–11 months). Storage of the apple fruits cv. Jeromin using DCA-control technology with an effective arsenal of fruit ripening inhibition agents provides protection from superficial scald, minimizes losses from bitter pit, eliminates losses from leather blotch, increases the storage period to 9–10 months, with maximum consumer tasting assessment.

Conclusion: The storage system of the apple fruits cv. Jeromin (6 technologies) ensures the preservation of high-quality products and the possibility of their successful sale on the Russian market for the period from 3.5 to 11 months after harvesting, i.e. practically until the new harvest. The high level of preservation of commercial and consumer quality (taste, aroma), the absence of post-harvest chemical treatments determine the preference of the DCA-control technology for the consumers and serious grounds for its industrial development. Due to increasing consumer demands for the quality and safety of fruits, as well as the risks of damage to fruits by MCP-mediated diseases, the competitiveness of storage technologies with post-harvest 1-MCP treatment (RA + 1-MCP, ULO + 1-MCP) is decreasing.

KEYWORDS

apple fruits; Jeromin; 1-MCP; RA; ULO; DCA; metabolism; fruit firmness; physiological diseases of apples

ВВЕДЕНИЕ

Сбалансированное питание является необходимым условием поддержания здоровья человека. Все больше потребителей во всем мире осознают, что продукты питания должны быть безопасными, содержать достаточное количество полезных и жизненно важных элементов, таких как витамины, минеральные вещества, пищевые волокна и др. Причина такого тренда может быть связана с социально-демографическими и экономическими факторами, пропагандой здорового образа жизни, увеличением дохода, улучшением маркетинга и усовершенствованием цепочек поставок продуктов питания (Kearney, 2010; Knorr et al., 2018; Vasylieva & James, 2021).

Плоды яблони (*Malus domestica* Borkh.) — самые потребляемые фрукты, производимые в регионах мира с умеренным климатом (Lyu et al., 2020). Кроме неоспоримых вкусовых и питательных качеств, яблоки, считающиеся скоропортящимися, обладают более высокой лежкостью, чем большинство других фруктов, могут храниться в свежем виде до 12 месяцев, обладают высокой транспортабельностью. В период пандемии COVID-19 спрос на яблоки вырос за счет возможности их легкого мытья и при необходимости очищения от кожуры¹. В 2022 г. было собрано более 95 млн тонн плодов яблони², что не обеспечивает потребности населения земного шара, даже при том, что с 2000 г. производство яблок выросло более чем на 50%³. Ожидается, что среднесуточное потребление фруктов в мире вырастет с 204 до 242 граммов на человека к 2025 г. (Vasylieva & James, 2021). Резкое увеличение объема производства и равномерное обеспечение поставок плодов в торговые сети в течение круглого года связано и возможно только при масштабировании в производство современных технологий выращивания (плотные схемы посадки, управление водным, минеральным, гормональным балансом, а значит продуктивностью и качеством плодов), механизации технологий сбора урожая, сортировки и технологий длительного хранения яблок (Muder et al., 2022; Гудковский и соавт., 2025).

Возможности продления сроков хранения плодов в 20-е годы 21 столетия обеспечивают в основном 4 технологии при пониженной температуре (+1...4 °C): обычная атмосфера (ОА, O₂ — 21%, CO₂ — 0,03%), регулируемая атмосфера с ультранизким содержанием кислорода (УЛО, O₂ — 1,2–1,5%, CO₂ — 1,2–1,5%), в сочетании с послеуборочной обработкой 1-МЦП и без неё. Все технологии хранения отличаются арсеналом физических и химических средств по ингибированию интенсивности дыхания плодов, синтеза этилена (гормона созревания), а значит созревания и развития физиологических заболеваний (загар, подкожная пятнистость, разложение от старения, мокрый ожог, внутренние и внешние CO₂-повреждения и др.) (Lurie & Watkins, 2012; Гудковский и соавт., 2025). Кроме того, технологии хранения оказывают существенное влияние на физико-химические свойства плодов, такие как твердость, цвет, общее количество растворимых сухих веществ (СРВ) и общую кислотность (ТК), что влияет на вкусовое восприятие, потребительские предпочтения (Mditshwa et al., 2018).

Традиционная и исторически первая технология хранения с применением искусственного охлаждения (ОА) незначительно (до 1–1,5 мес.) продлевает сроки хранения плодов, но вызывает развитие загара, не всегда эффективно противодействует физиологическим нарушениям, таким как разложение, подкожная пятнистость, низкотемпературные заболевания. Эти ограничения стимулировали разработку технологии хранения с ультранизким содержанием кислорода (УЛО), которая обеспечивает значительные преимущества в сохранении качества продукции (твердость, сочность), а также снижение потерь от разложения и подкожной пятнистости. Более того, данная технология позволяет значительно продлить сроки хранения. Однако влияние на развитие загара неоднозначно: уровень потерь может как уменьшаться, так и возрастать в зависимости от концентрации кислорода в атмосфере и сортовых особенностей (Zanella, 2003; Watkins, 2008; Weber et al., 2011).

Послеуборочная обработка плодов химическим соединением 1-метилциклопропеном (1-МЦП),

¹ WHO. (2020). COVID-19 and Food Safety: Guidance for Food Businesses. Department of Communications, the World Health Organization of the United Nations. <https://www.who.int/publications/i/item/covid19-and-food-safety-guidance-for-food-businesses>

² FAOSTAT. (2024). <https://www.fao.org/faostat/en/#data/Q.CL/visualize>

³ WB. (2019). Total and Urban Population. Data of the World Bank. <https://data.worldbank.org/indicator>

активно используемым в сочетании с ОА и УЛО (Blankenship & Dole, 2003; Jung & Watkins, 2008; Lurie & Watkins, 2012), ингибирует синтез этилена и некоторых мало летучих веществ, таких как α -фарнезен, конъюгированные триены (КТ), 6-метил-5-гептен-2-он, что обеспечивает защиту от загара, способствует снижению потерь от разложения (старение), маслянистости кожицы, сохранению твердости, цвета, титруемой кислотности (Blankenship & Dole, 2003; Jung & Watkins, 2008; Pesis et al., 2010; Lurie & Watkins, 2012), но может вызывать, либо усиливать развитие CO_2 -ожогов кожицы, коричневой пятнистости, низкотемпературного разложения, диффузного побурения кожицы (De Freitas & Pareek, 2019; Гудковский и соавт., 2025).

1-метилциклопропен (1-МЦП) по классификации Европейского агентства по безопасности продуктов питания (EFSA) и Агентства по охране окружающей среды США (USEPA) является нетоксичным соединением. Однако обработка химическими соединениями свежих плодов в послеуборочный период всегда вызывает опасения в их безопасности у потребителей и некоторых исследователей (Boukerche et al., 2024; Quali et al., 2024). Негативные проявления, связанные с обработкой 1-МЦП в условиях ОА и УЛО, усиливающиеся требованиями потребителей к безопасности пищевой продукции и необходимость минимизации рисков, ассоциированных с использованием химических веществ, стимулировали разработку альтернативных методов, реализованных в технологию длительного хранения фруктов (ДРА). Технология представляет собой инновационный нехимический подход к сохранению качества плодов.

ДРА представляет собой относительно новую технологию, которой уделяется повышенное внимание в исследованиях, посвященных послеуборочной обработке продукции (Mditshwa et al., 2018). Условия ДРА с минимально допустимым для плодов уровнем кислорода (до точки анаэробной компенсации), динамически адаптируют его концентрацию на основе меняющейся физиологической реакции плодов (Prange et al., 2013; Weber et al., 2020), что обеспечивает защиту от загара у многих сортов яблони, а также снижение потерь от подкожной пятнистости при отсутствии анаэробных расстройств и спиртового привкуса. Таким образом, преимущества ДРА в сохранении качества при длительных сроках хранения плодов, возрастающий

спрос на органическую продукцию, отсутствие послеуборочных химических обработок определяет актуальность исследований по разработке сортовых технологий в ДРА.

Несмотря на то, что условия хранения (наряду с экологическими, агротехническими факторами и сроками съема) играют важную роль в формировании и сохранении качества плодов, эффективность хранения и рентабельность производства яблок в большей мере определяется генотипом сорта, который должен обеспечивать стабильную ежегодную урожайность плодов высокого качества (диаметр, окраска, вкус, текстура — оптимальные для сорта), устойчивость к основным физиологическим заболеваниям (De Freitas & Pareek, 2019; Гудковский и соавт., 2025). Потребители часто отдают предпочтение сортам с красной кожицей, насыщенный красный цвет плодов повышает рыночную стоимость сорта (Rozman et al., 2015). Полная (100%) окраска кожицы в сочетании с большим диаметром плодов и более ранним сроком созревания становятся приоритетными направлениями в селекции яблони в последние десятилетия (Guerra & Sansavini, 2012).

Относительно недавно на международном рынке появился сорт яблони Джеромин французской селекции осенне-зимнего срока созревания с бордово-красной, практически 100%-й окраской кожицы, выраженным ароматом, сладкой и сочной мякотью. Сорт относится к группе Ред Делишес. Садоводы многих европейских стран уже оценили новинку, в Польше сорт яблони выращивается в промышленных масштабах, активно изучается в Турции (Çalhan et al., 2015; Shi, 2021), динамично распространяется в ЮФО и ЦФО России. При этом в настоящее время в литературе практически отсутствуют данные о влиянии технологий хранения (ОА, УЛО, ДРА в сочетании с обработкой 1-МЦП и без неё) на качество, восприимчивость плодов сорта Джеромин к заболеваниям, продолжительность хранения.

Сорт яблони Ред Делишес более широко изучен (Brizzolara et al., 2017; Salame, 2024 и др.), однако его хранение в условиях ДРА, как и некоторых других сортов, не было однозначно успешным (Gasser & Von Arx, 2015; Zanella & Rossi, 2015; Zanella & Sturz, 2015), что проявлялось в повышенном уровне накопления этанола в плодах, снижении твердости

в некоторых партиях плодов при хранении в ДРА-СФ по сравнению с УЛО (Zanella & Sturz, 2015). Вероятно, такие проявления обусловлены особенностями механизма регуляции жизнедеятельности плодов этого сорта при гипоксии (Salame, 2024).

Цель и задачи настоящего исследования: выявить восприимчивость плодов сорта Джеромин к физиологическим заболеваниям при хранении, проследить влияние метеорологических условий предуборочного периода на развитие физиологических заболеваний, изучить влияние 4 существующих (ОА-контроль, ОА+1-МЦП, УЛО-контроль, УЛО+1-МЦП) и 2 разрабатываемых технологий хранения (ДРА-контроль, ДРА+1-МЦП) на физиолого-биохимические и др. показатели качества, а также на восприимчивость к заболеваниям, продолжительность хранения плодов для создания системы круглогодичного хранения сорта. В России такие исследования проводятся впервые.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Физиологические основы развития загара, подкожной и коричневой пятнистости плодов яблоны

Под агаром принято понимать физиологическое заболевание плодов (яблок), вызванное низкотемпературным окислительным стрессом при хранении. Проявляется в побурении кожицы плодов. Ключевыми звеньями развития заболевания считают накопление этилена и синтез монотерпена α -фарнезена, продукты окисления которого (в т. ч. конъюгированные триены — КТ₂₈₁) повреждают мембраны эпидермальных клеток и приводят к некрозу тканей кожицы (Pesis et al., 2010; Lurie & Watkins, 2012; Donadel et al., 2023). De Freitas & Pareek (2019) подчеркивают, что выраженность загара определяется не только технологическими параметрами хранения (температура, содержание O_2 и CO_2 , скорость охлаждения, продолжительность хранения), но и генетической предрасположенностью сорта, в том числе особенностями структуры кожицы и уровнем антиоксидантной защиты. Для сортов группы Ред Делишес, к которой относится и Джеромин по происхождению, описана высокая чувствительность к загару и другим поверхностным расстройствам (De Freitas & Pareek, 2019).

Подкожная пятнистость (ПП) рассматривается как кальций- и стресс-зависимое физиологическое заболевание. Saure (2014), De Freitas & Mitcham (2012) и De Freitas & Pareek (2019) связывают его развитие с локальным дефицитом Ca^{2+} и антиоксидантов в кожице и подкожном слое плодов, дисбалансом минерального питания, изменениями в функциональности ксилемы и нарушением водного статуса тканей. Torres et al. (2024) и Гудковский и соавт. (2019a, 2019b, 2025) подчеркивают роль абиотических стрессов (жара, дефицит влаги, перегрузка урожаем) и гормонального статуса: низкие уровни ауксинов и повышенная концентрация гиббереллинов снижают способность тканей поддерживать целостность клеточных стенок и мембран при воздействии стрессовых факторов. В результате сочетание предуборочных стрессов и неблагоприятных условий хранения приводит к формированию типичных для ПП некротических участков под кожицей.

Коричневая пятнистость (КП) часто развивается на фоне ПП и проявляется как участки бурой окисленной ткани, окружающие первичные очаги подкожных повреждений. De Freitas & Pareek (2019) подчеркивают, что КП может возникать и без применения 1-МЦП, однако для восприимчивых сортов показано усиление её проявлений при послеуборочной обработке ингибитором биосинтеза этилена (1-МЦП). DeEll et al. (2016) и Mattheis et al. (2017) показали, что у чувствительных генотипов 1-МЦП, блокируя рецепторы этилена и резко тормозя процессы созревания, нарушает баланс между защитой от старения и необходимым уровнем метаболической активности, повышая вероятность реализации предуборочных повреждений в виде КП. Таким образом, для индукции трех заболеваний (загара, ПП и КП) решающими факторами оказываются: сортовые особенности, стресс-факторы предуборочного периода и выбранная послеуборочная технология хранения.

Технологии хранения плодов яблоны

В обычной атмосфере ($O_2 \approx 21\%$) пониженная температура остается единственным фактором ингибирования метаболизма плодов, тогда как высокий уровень кислорода способствует повышению интенсивности дыхания и биосинтезу этилена из 1-аминоциклопропан-1-карбоновой кислоты (Adams & Yang, 1979). Этилен активизирует синтез

и накопление α -фарнезена и продуктов его окисления. Повышенный уровень кислорода усиливает свободнорадикальные процессы окисления непредельных соединений, что увеличивает вероятность развития загара и других заболеваний плодов яблони (Pesis et al., 2010; Lurie & Watkins, 2012; Meitha et al., 2020). Ferguson & Watkins (1989) и Fernández et al. (2016) показали, что при хранении в обычной атмосфере высокий воздухообмен и пониженная относительная влажность дополнительно увеличивают риск ПП у восприимчивых сортов. Для генотипов группы Ред Делишес высокая частота поверхностных расстройств в обычной атмосфере многократно подтверждена (De Freitas & Pareek, 2019).

Переход к контролируемой атмосфере с пониженным содержанием кислорода, в том числе к режимам ультранизкого содержания O_2 (УЛО), позволяет существенно замедлить метаболизм плодов, продлить сроки хранения и снизить частоту некоторых физиологических заболеваний (Both et al., 2017; De Freitas & Pareek, 2019). Однако Zanella (2003) показал, что для чувствительных сортов даже содержание O_2 порядка 1,5% может быть недостаточным для полного предотвращения загара: при длительном хранении в коже накапливаются критические уровни α -фарнезена и KT_{281} , а при доведении до потребителя фиксируются высокие потери от заболевания. Аналогичные тенденции описаны и для режимов УЛО с разной глубиной снижения O_2 (Zanella & Stürz, 2015).

1-метилциклопропен широко применяется как ингибитор синтеза этилена для контроля созревания и загара у яблок (Fan et al., 1999; Watkins et al., 2000; Blankenship & Dole, 2003), используется перед основным хранением в ОА, УЛО, ДРА. Препарат легко проникает через мембраны и взаимодействует с рецепторами этилена, обеспечивая длительное (в течение месяцев) торможение синтеза и действия гормона в послеуборочный период (Blankenship & Dole, 2003; Ouali et al., 2024). Это свойство позволяет существенно снижать частоту загара и других этилен-опосредованных расстройств у плодов многих сортов (Rupasinghe et al., 2000; Lurie & Watkins, 2012; DeEll et al., 2016). Вместе с тем у генотипов с высоким метаболизмом и способностью к образованию новых рецепторов этилена защита, обеспечиваемая 1-МЦП, со временем ослабевает (Blankenship & Dole, 2003; Lurie

& Watkins, 2012; De Freitas & Pareek, 2019). Негативным проявлением 1-МЦП является инициация либо усиление коричневой пятнистости, повышение частоты CO_2 -ожогов кожицы, развития диффузного побурения кожицы у восприимчивых сортов и партий; ранний срок съема увеличивает риски развития заболеваний (De Freitas & Pareek, 2019; Weber et al., 2020; Гудковский и соавт., 2025). Кроме того, Yang et al. (2016) отмечают, что у ряда сортов 1-МЦП, продлевая срок хранения, одновременно снижает выраженность сортового аромата, что важно учитывать в контексте потребительской привлекательности продукции.

Динамичная регулируемая атмосфера (ДРА) была предложена как альтернатива обработке 1-МЦП. Технология основана на максимально возможном ингибировании метаболизма плодов физическими факторами хранения (минимально допустимый уровень кислорода, пониженная температура) и естественных процессах жизнедеятельности плодов яблони при неглубоком (обратимом) анаэробном метаболизме (Prange et al., 2013). В работах Zanella (2003), Prange et al. (2013) показано, что в условиях ДРА повышенный уровень этанола в плодах и атмосфере камеры способствует снижению выработки этилена, α -фарнезена и KT_{281} . Donadel et al. (2023) указывает на антиоксидантные свойства этанола, что проявлялось в снижении уровня активных форм кислорода, стабилизации мембран, препятствовало побурению тканей и развитию загара. Mditshwa et al. (2018) и Weber et al. (2020) указывают на сохранение антиоксидантной активности, снижение проницаемости мембран и уменьшение активности гидролитических ферментов (включая β -галактозидазу) при хранении в ДРА, что сопровождается снижением восприимчивости к загару и меньшей потерей твердости по сравнению с традиционными режимами УЛО. В совокупности эти данные подтверждают, что сортоориентированная ДРА-технология обеспечивает более эффективную защиту от загара и других окислительных повреждений по сравнению с классическими низкокислородными режимами (УЛО, УЛО+1-МЦП), и может рассматриваться как перспективная нехимическая альтернатива 1-МЦП (De Freitas & Pareek, 2019; Weber et al., 2020; Гудковский и соавт., 2025).

Показатели вкусового качества яблок и их пороговые значения

Твердость мякоти, содержание сухих растворимых веществ (СРВ) и титруемая кислотность (ТК) традиционно рассматриваются как ключевые интегральные показатели качества свежих яблок при оценке их пригодности к потреблению (Hoehn et al., 2003; Musacchi & Serra, 2018). Твердость является индикатором текстуры и степени зрелости плодов: снижение показателя до определенного уровня отражает переход от оптимального состояния к перезреванию и потере устойчивости к разложению, механическим повреждениям. DeLong et al. (2000) показали, что для того, чтобы отгруженный продукт был принят на рынок без риска возврата, твердость многих сортов должна составлять не менее 62,3 Н ($\approx 6,4$ кг/см²). Harker et al. (2002) установили, что изменение твердости менее чем на 6 Н (0,61 кг/см²) зачастую не воспринимается потребителем, что задает ориентиры для оценки практической значимости различий между технологиями хранения.

Сухие растворимые вещества (в основном сахара) накапливаются в плодах на протяжении всего периода развития и созревания; при послеуборочном климактерическом созревании их концентрация может дополнительно увеличиваться за счет гидролиза крахмала, а при старении — снижаться (Palmer, 2014; Musacchi & Serra, 2018). Титруемая кислотность, представленная в яблоках преимущественно яблочной кислотой, формирует кислый компонент вкуса и одновременно служит важным субстратом дыхания как в предуборочный, так и в послеуборочный период (Ackermann et al., 1992; Kingston, 2010). Musacchi & Serra (2018) подчеркивают, что ощущение сладости потребителем определяется не только содержанием сахаров, но и уровнем кислот: при низкой кислотности вкус воспринимается как более сладкий, при избытке кислот на фоне низкого содержания сахаров — как более кислый и малопривлекательный.

С точки зрения рынка важен не только абсолютный уровень кислотности, но и диапазон значений, приемлемый для потребителя. Bai et al. (2015) отмечают, что в Европе как яблоки с очень низкой кислотностью (<0,3%), так и плоды с чрезмерно высокой кислотностью (>1%) считаются нежелательными, что задает целевые ориентиры для

технологических решений по хранению. Таким образом, системы хранения, позволяющие поддерживать твердость выше порогового уровня (DeLong et al., 2000; Harker et al., 2002) и сохранять СРВ и ТК в диапазоне, обеспечивающем гармоничное сочетание сладости и кислотности (Musacchi & Serra, 2018; Bai et al., 2015), имеют наибольший потенциал с точки зрения удовлетворения ожиданий потребителя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объекты исследования: условия хранения (ОА, УЛО, ДРА) плодов яблони сорта Джеромин. Для исследований использовали плоды промышленных насаждений ООО «Сады Ставрополя» (Ставропольский край), посадка растений была проведена в 2018 г. на подвое М-9 (карлик) по схеме 4 × 1 м. Агротехника: сплошное залужение междурядий, капельное орошение; почвы: чернозем южный, легкосуглинистый.

При съеме 10.09.2021 г. твердость плодов составляла 8,0 кг/см², индекс йодкрахмальной пробы (ЙКП) — 2,5–3,0 балла, эндогенный этилен — 0,6 ppm, сумма среднесуточных, максимальных и минимальных температур в предуборочный период (август) составляла 747,1; 927,7 и 575,8 °С соответственно, количество осадков — 94,3 мм, ГТК = 1,26.

При съеме 08.09.2022 г. твердость плодов составляла 8,0 кг/см², индекс ЙКП — 1,6–2,2 балла, эндогенный этилен — 0,086 ppm, сумма среднесуточных, максимальных и минимальных температур в предуборочный период (август) составляла 756,4, 968,2 и 559,5 °С соответственно, количество осадков — 26,3 мм, ГТК = 0,35.

При съеме 02.09.2023 г. твердость плодов составляла 8,0 кг/см², индекс ЙКП — 2,0 балла, эндогенный этилен — 0,087 ppm, сумма среднесуточных, максимальных и минимальных температур в предуборочный период (август) составляла 782, 981,3 и 568,5 °С соответственно, количество осадков — 37,7 мм, ГТК = 0,48.

Оборудование

Хранение плодов осуществляли в лабораторном комплексе, созданном ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина» совместно с PLAWI Plattenhardt+Wirth GmbH (Германия) и её дочерней компанией «ПЛАВИ-Сервис», ныне «ХОЛКОР» (Россия), с экспериментальными камерами объемом 0,9 м³, возможностью автоматического управления и контроля параметров в каждой камере (Система «ПЛАВИ-Сервис», 2020 г). Система «ПЛАВИ-Сервис» включает устройство для охлаждения УУ-УВ-С-VZH028G-B1W1C1(1S) G1(1T), генератор азота UP1-4, адсорбер CO² — USC20, шкаф управления, программное обеспечение. Для обеспечения ДРА использовали датчики флуоресценции хлорофилла (DPAFCF, BESSELINGGROUP, Нидерланды).

Содержание этилена в тканях плода (эндогенный) определяли на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором (GC-2014, SHIMADZU, Япония).

Содержание α -фарнезена и продуктов его окисления (КТ₂₈₁) в кутикуле кожицы плодов определяли на спектрофотометре (UV-1800, SHIMADZU, Япония).

Твердость плодов, кг/см² измеряли пенетрометром (FT-327, Италия).

Содержание сухих растворимых веществ определяли с помощью рефрактометра PAL-BX1ACID5 (ATAGO, Япония).

Инструменты

Содержание эндогенного этилена (в ppm) определяли газохроматографически (Ракитин, 1986). Извлечение этилена из атмосферы межклетников плодов проводили при разрежении около 650 мм рт. ст. в течение 1 мин., используя специальное устройство, образец газа вводили в хроматограф.

Содержание α -фарнезена и продуктов его окисления (КТ₂₈₁) в кутикуле кожицы плодов (в нмоль/см²)

определяли в свежих полосках кожицы теневой стороны плода. Диски кожицы известной площади погружали в гексан на 6 мин. Спектры поглощения гексановых экстрактов регистрировали на спектрофотометре (Морозова, 1980).

Твердость плодов (в кг) измеряли пенетрометром FT-327 с использованием 11-мм плунжера для яблок. С противоположных сторон экваториальной области 10 плодов после снятия кожуры проводилось два измерения.

Индекс ЙКП определяли визуально на поперечном срезе 10 плодов по 10-балльной шкале после погружения половинок в раствор Люголя⁴.

Содержание сухих растворимых веществ (СРВ) в соке плодов определяли с помощью рефрактометра PAL-BX1ACID5 (ATAGO, Япония); титруемую кислотность (ТК) — путем титрования 1 мл сока 0,1N раствором NaOH в присутствии фенолфталеина до розового окрашивания (Ермаков и др., 1972).

Физиологические заболевания определяли визуально, потери выражали в процентах от общего числа плодов.

Процедура исследования

После съема (ООО «Сады Ставрополя», Ставропольский край) плоды сорта Джеромин в течение 3 ч загружали в авторефрижератор, за 20–24 ч при $T = +10...12$ °C доставляли в ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина», г. Мичуринск. Обработку части плодов ингибитором биосинтеза этилена 1-МЦП (препарат Фитомаг, Россия) проводили на 2 день после съема, концентрация действующего вещества в атмосфере составляла 0,8 ppm, продолжительность обработки — 24 ч.

1-метилциклопропен (препараты: Смарт Фреш, Форма Фреш, Фитомаг, Фреш Форма и др.) для обработки плодов перед закладкой на хранение входит в перечень разрешенных на территории РФ⁵.

⁴ Generic Starch-Iodine Index Chart for Apples. <https://blog-fruit-vegetable-ipm.extension.umn.edu/2018/08/check-apple-ripeness-with-starch-iodine.html>

⁵ Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации по состоянию на 2 декабря 2024 г. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации (Минсельхоз России).

На 3 день после съема контрольные и обработанные партии плодов размещали в камеры с различными условиями хранения. Схема опыта (варианты опыта и условия проведения эксперимента) приведена в Таблице 1.

Таблица 1

Варианты опыта и условия проведения эксперимента

Table 1

Experimental Designs and Conditions

Варианты опыта (технологии хранения)	Условия проведения эксперимента
1. ОА-контроль	Плоды без обработки 1-МЦП, хранение плодов в условиях обычной атмосферы ($T = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{CO}_2 = 0,03\%$, $\text{O}_2 = 21\%$)
2. ОА+1-МЦП	Обработка плодов 1-МЦП, хранение плодов в условиях обычной атмосферы ($T = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{CO}_2 = 0,03\%$, $\text{O}_2 = 21\%$)
3. УЛО-контроль	Плоды без обработки 1-МЦП, хранение плодов в условиях регулируемой атмосферы ($T = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{O}_2 = 1,2\%$, $\text{CO}_2 = 0,8-1\%$)
4. УЛО+1-МЦП	Обработка плодов 1-МЦП, хранение плодов в условиях регулируемой атмосферы ($T = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{O}_2 = 1,2\%$, $\text{CO}_2 = 0,8-1\%$)
5. ДРА-контроль	Плоды без обработки 1-МЦП, хранение плодов в условиях динамичной регулируемой атмосферы ($T = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{O}_2 < 0,8\%$, $\text{CO}_2 = 0,8-1\%$)
6. ДРА+1-МЦП	Обработка 1-МЦП, хранение плодов в условиях динамичной регулируемой атмосферы ($T = +1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{O}_2 < 0,8\%$, $\text{CO}_2 = 0,8-1\%$)

Повторность опыта четырехкратная (повторность — 1 ящик плодов массой 12–15 кг).

Влияние условий хранения на качество плодов оценивали по твердости мякоти, содержанию этилена, α -фарнезена и продуктов его окисления (KT_{281}), потерям от физиологических и грибных заболеваний.

Показатели оценки физиологического состояния плодов определяли при съеме, в процессе хранения (в условиях ОА через 3 и 5 месяцев, в условиях УЛО через 5 месяцев), после окончания хранения (все варианты — 9 месяцев хранения), при доведении до потребителя («жизнь на полке») в усло-

виях $+20\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ дней (все варианты), индекс ЙКП — при съеме.

Потери от подкожной пятнистости (ПП), коричневой пятнистости (КП), грибной гнили (ГГ) определяли при хранении (в условиях ОА через 3 и 5 месяцев, в условиях УЛО через 5 месяцев), после 9 месяцев хранения, при доведении до потребителя ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ дней).

Анализ данных

Для оценки влияния предуборочных (метеорологических) факторов на потери от заболеваний и показатели качества применяли корреляционный анализ, для оценки и визуализации воздействия послеуборочных факторов (технологий хранения) на потери от заболеваний и показатели качества использовали пределы погрешности (там, где это уместно), графическое представление данных осуществляли при помощи программы Microsoft Excel.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с использованием метода корреляционного анализа, оценивали пределы погрешности (там, где это уместно), графическое представление данных осуществляли при помощи программы Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние технологий хранения на физиолого-биохимические показатели качества плодов сорта Джеромин

Эндогенный этилен

В годы проведения исследований (2021–2023) технология ДРА+1-МЦП обеспечила максимально глубокое ингибирование метаболизма плодов, что проявлялось в предельно низком (0,06–0,7 ppm), сравнимом, но чаще более низком, чем в УЛО+1-МЦП (0,3–2,5 ppm) и более низком, чем в ДРА-контроль (1,7–11,4 ppm) уровне содержания эндогенного этилена после 9 месяцев хранения (Рисунок 1).

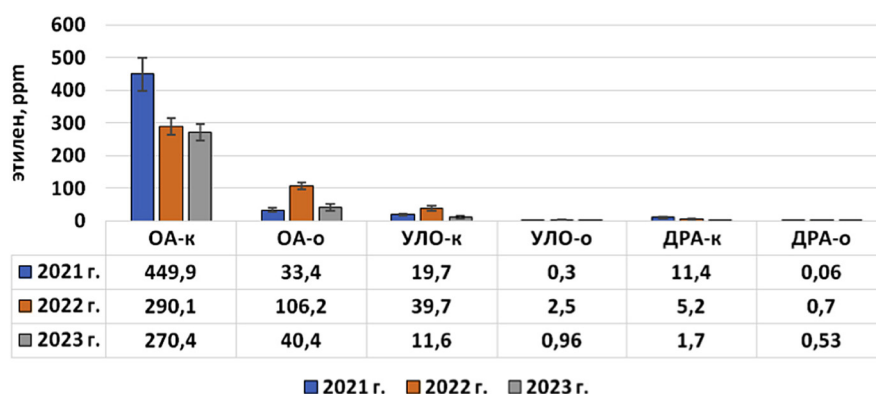
В условиях ОА-контроль после 3 месяцев хранения содержание этилена в плодах достигло 395–496 ppm (при исходном значении ниже 1 ppm), после 5,5 ме-

Рисунок 1

Влияние технологий хранения на содержание эндогенного этилена в плодах сорта Джеромин (9 месяцев хранения)

Figure 1

Effect of Storage Technologies on the Endogenous Ethylene Content in Apple Fruits cv. Jeromin (9 Months of Storage)



Содержание α -фарнезена

содержания увеличивалось до 630,7–720,3 ppm, что, вероятно, соответствовало климактерическому максимуму, далее оно снижалось, составляя к 9 месяцам хранения 270,4–449,9 ppm. Обработка 1-МЦП надежно ингибировала накопление этилена в плодах: после 3 месяцев хранения — до 5,0–10,0 ppm, после 5,5 месяцев — до 6–15 ppm, при последующем снижении ингибирующего эффекта, после 9 месяцев хранения — 33,4–106,2 ppm (Рисунок 1).

Технология ДРА+1-МЦП при максимально глубоком ингибировании синтеза этилена обеспечивала чаще всего более низкий, по сравнению с другими низкокислородными технологиями (ДРА-контроль, УЛО+1-МЦП, УЛО-контроль), уровень накопления α -фарнезена (Рисунок 2).

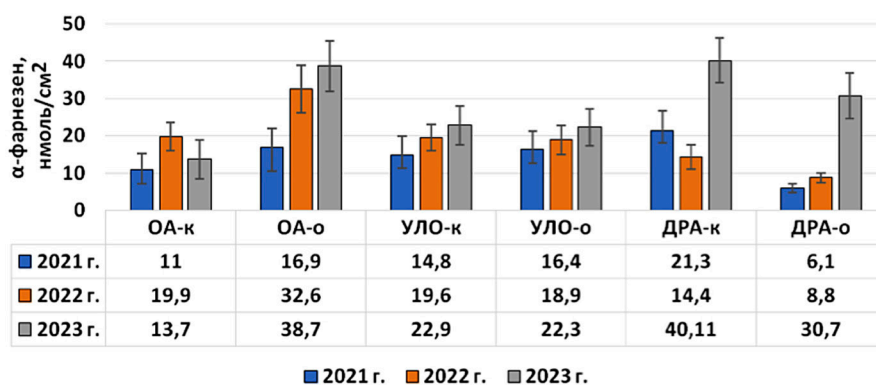
В условиях ОА-контроль в первые 3 месяца хранения активный синтез этилена в плодах сопровождался

Рисунок 2

Влияние технологий хранения на содержание α -фарнезена в плодах сорта Джеромин (9 месяцев хранения)

Figure 2

The Effect of Storage Technologies on the α -farnesene Content in Apple Fruits cv. Jeromin (9 Months of Storage)



ждался интенсивным накоплением α -фарнезена (в пределах 60–80 нмоль/см²) при заметном снижении (11–20 нмоль/см²) к окончанию хранения в пораженных загаром плодах (данные не показаны). Обработка 1-МЦП обеспечила ингибирование накопления α -фарнезена в условиях ОА в первые 3 месяца хранения (30–45 нмоль/см²), максимальное повышение к 5 месяцу (60–80 нмоль/см²) и снижение к окончанию хранения (13–30 нмоль/см²).

КТ₂₈₁

Максимальной эффективностью ингибирования накопления КТ₂₈₁ в кутикуле кожицы плодов на протяжении всего периода хранения (9 месяцев) отличались варианты ДРА+1-МЦП (0,5–2 нмоль/см²), УЛО+1-МЦП (2,3–3,2 нмоль/см²), в варианте ДРА-контроль значения были существенно выше (4,2–6,9 нмоль/см²). Плоды варианта УЛО-контроль отличались наиболее высоким содержанием КТ₂₈₁ (до 9,4 нмоль/см²) из всех вариантов хранения при пониженном содержании кислорода (Рисунок 3), что сопровождалось их поражением загаром.

Ранние сроки появления (до 3 месяцев хранения) и высокий уровень накопления КТ₂₈₁ (25–32 нмоль/см²) при поступательном снижении показателя к концу хранения (4,9–14,9 нмоль/см²) во все годы исследований отличали плоды варианта ОА-контроль.

Резкое снижение эффективности ингибирования накопления КТ₂₈₁ в варианте ОА+1-МЦП обнаружено после 5 месяцев хранения партии, при этом уровни накопления продуктов окисления α -фарнезена были ниже либо сопоставимы с контрольными, значения показателя после 9 месяцев хранения оставались высокими в 2021 г. (12,9 нмоль/см²) и критически высокими в 2022 и 2023 гг. (в пределах 30 нмоль/см²) (Рисунок 3).

Влияние технологий хранения на потери от физиологических заболеваний

В результате проведенных исследований установлено, что снижение качества в период хранения плодов сорта Джеромин связано в основном с поражением плодов загаром (Рисунок 4) и подкожной пятнистостью (Рисунок 5), обработка 1-МЦП вызвала развитие коричневой пятнистости (Рисунок 6). При длительном хранении, особенно в условиях ОА, отмечается потеря твердости, появление мучнистости.

Полную защиту плодов от загара (0%), защиту либо минимизацию потерь от подкожной (до 2%) и коричневой пятнистости (до 0,4%) за 3 года исследований обеспечивала технология ДРА-контроль, сопоставимые значения при некоторой тенденции к увеличению потерь от КП выявлены в варианте ДРА+1-МЦП. Защиту от загара при несколько более

Рисунок 3

Влияние технологий хранения на содержание КТ₂₈₁ в плодах сорта Джеромин (9 месяцев хранения)

Figure 3

The Effect of Storage Technologies on the CT₂₈₁ Content in Apple Fruits cv. Jeromin (9 Months of Storage)

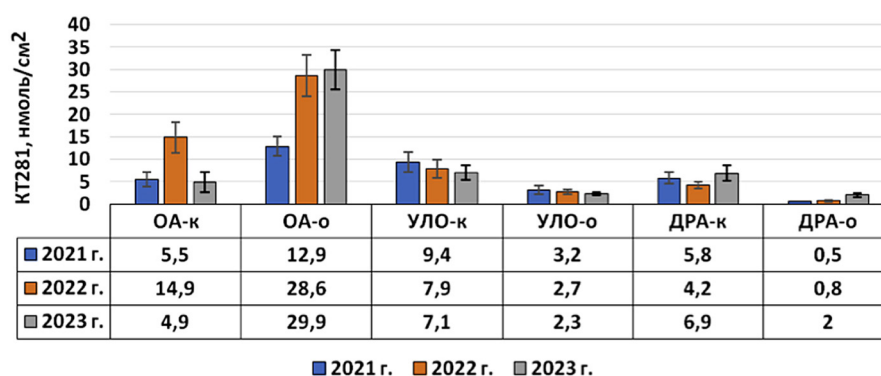


Рисунок 4

Загар на плодах сорта Джеромин в условиях ОА-контроль

Figure 4

Superficial Scald on Jeromin Apples under RA Storage Conditions



Рисунок 5

Подкожная пятнистость на плодах сорта Джеромин в условиях ОА-контроль

Figure 5

Bitter Pit on Jeromin Apples under RA Storage Conditions



Рисунок 6

Коричневая пятнистость на плодах сорта Джеромин в условиях УЛО+1-МЦП

Figure 6

Leather Blotch on Jeromin Apples under ULO + 1-MCP Storage Conditions



высоких потерях от ПП (до 6%) и КП (до 5%) обеспечивает технология УЛО+1-МЦП (Рисунки 7, 8).

При хранении контрольных партий в условиях УЛО велики риски развития загара (от 9,5 до 93,6%), при имитации условий доведения до потребителя в комнатных условиях (КУ) эти риски увеличивались (50–100%), отмечен более низкий уровень потерь от КП по сравнению с УЛО+1-МЦП.

Выявлены существенные различия по восприимчивости плодов сорта Джеромин к ПП по годам. Общий уровень потерь от ПП в 2021 г. кардинально ниже (1,2%), чем в 2022 г. (53,5%) и 2023 г. (31%).

В наших исследованиях показано, что в условиях ОА эффективность послеуборочной обработки

1-МЦП для защиты от загара изменялась от максимальной (100% защита, 2021 г.) до низкой (33% и 66% пораженных загаром плодов в 2023 и 2022 гг. соответственно).

За три года исследований выделились следующие положительные качественные характеристики сорта: все изучаемые партии плодов при всех технологиях хранения проявляли устойчивость к развитию маслянистости кожицы, побурению мякоти и сердцевины, отличались очень низкой восприимчивостью к грибной гнили (0–0,5%).

Рисунок 7

Влияние технологий хранения на развитие загара при хранении и в условиях доведения до потребителя (комнатные условия, КУ) (9 месяцев хранения)

Figure 7

The Effect of Storage Technologies on the Scald Development during Storage and Shelf Life Imitation Period. 9 Months of Storage

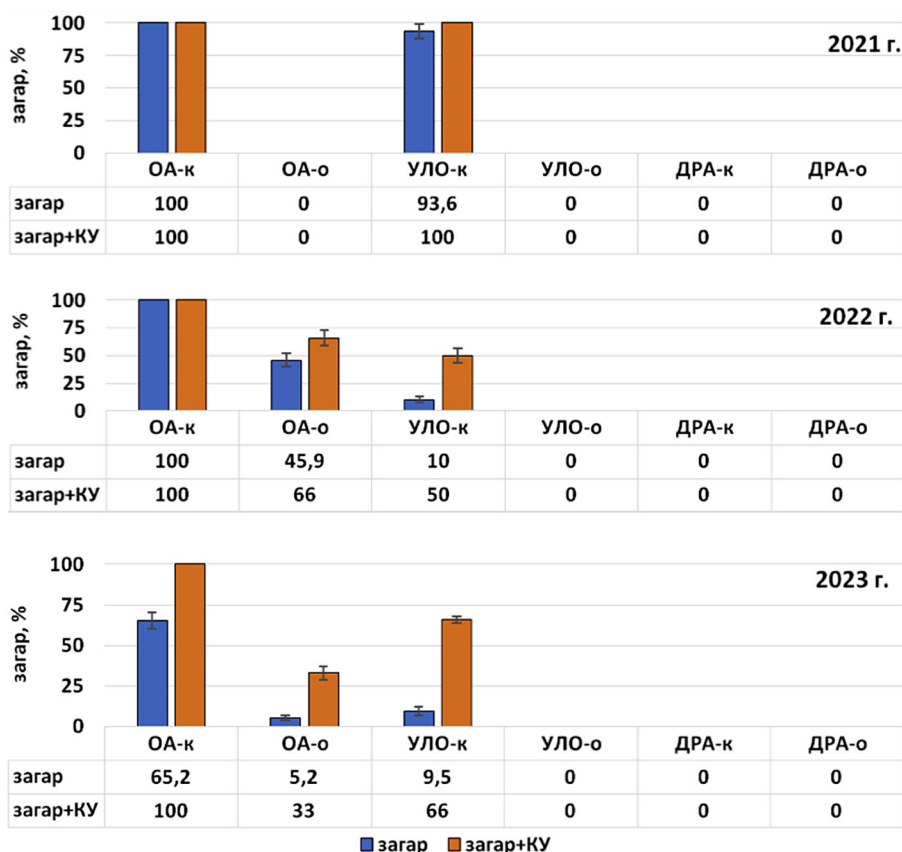
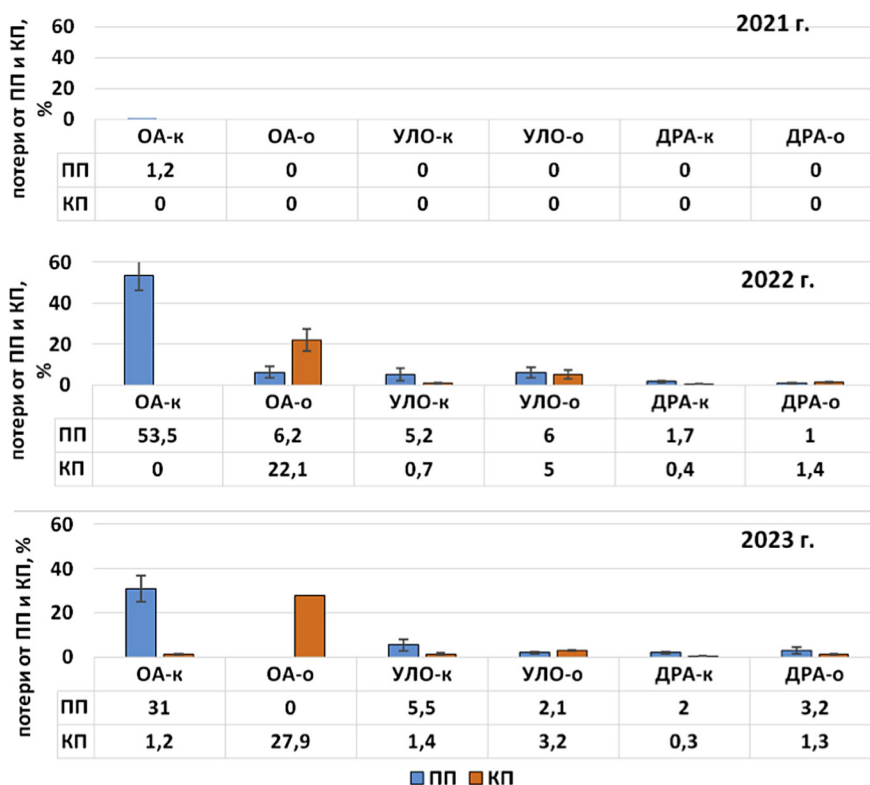


Рисунок 8

Влияние технологий хранения на развитие ПП и КП (9 месяцев хранения)

Figure 8

The Effect of Storage Technologies on the Bitter Pit (BP) and Leather Blotch (LB) Development. 9 Months of Storage



Влияние технологий хранения на показатели, отражающие вкусовые качества плодов, и дегустационную оценку потребителем

Технологии хранения оказывают существенное влияние на сохранение товарных и вкусовых качеств плодов, отражаемых в твердости плодов, содержании сухих растворимых веществ (СРВ), титруемых кислот (ТК), дегустационной оценке потребителем.

Твердость

Максимальное сохранение твердости плодов при хранении и в условиях доведения до потребителя за 3 года исследований обеспечивалось в вариантах УЛО+1-МЦП, ДРА-контроль, ДРА+1-МЦП при сравнимых значениях показателей, превышающих 7 кг/см². Твердость плодов варианта УЛО-контроль сравнима с ОА+1-МЦП на протяжении периода хранения, но была ниже в условиях доведения до потребителя (до 6 кг/см²). Наиболее

низкое сохранение твердости (до 4,1 кг/см²) обеспечивали условия ОА-контроль (Рисунки 9, 10).

Сухие растворимые вещества

В наших исследованиях более высокий уровень содержания СРВ в плодах сорта Джеромин (14,0–16,4%) был отмечен в годы с высокими температурами и дефицитом влаги (2022 и 2023 гг.), более низкий (13,0–13,8%) при пониженных температурах и избыточном увлажнении в предуборочный период (2021 г.) (Рисунок 11). Во все годы исследований существенных различий по содержанию сахаров в плодах при использовании технологий ОА+1-МЦП, УЛО-контроль, УЛО+1-МЦП, ДРА-контроль, ДРА+1-МЦП не обнаружено, как при инструментальной, так и при органолептической (дегустационной) оценке. В условиях ОА-контроль отмечено заметное снижение содержания СРВ до 12,4–14,0%, по сравнению с другими изучаемыми технологиями (13,2–16,4%).

Рисунок 9

Влияние технологий хранения на твердость плодов сорта Джеромин после 9 месяцев хранения

Figure 9

The Effect of Storage Technologies on the Fruit Firmness of Jeromin Apples after 9 Months of Storage

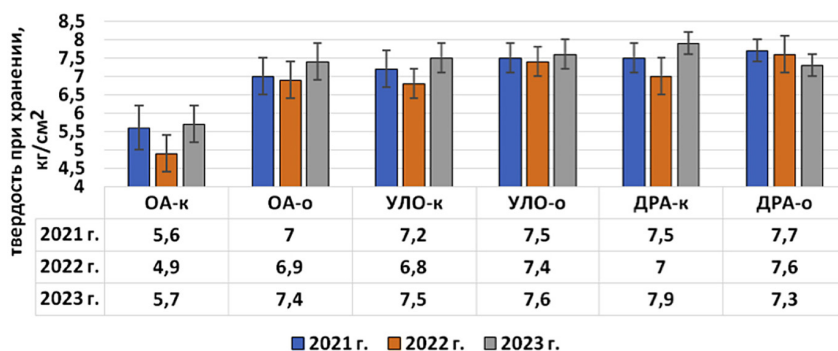


Рисунок 10

Влияние технологий хранения на твердость плодов сорта Джеромин после 9 месяцев хранения и периода доведения до потребителя (+20 °C/10 дней)

Figure 10

The Effect of Storage Technologies on the Fruit Firmness of Jeromin Apples after 9 Months of Storage and Shelf Life Imitation Period (+20 °C/10 days)

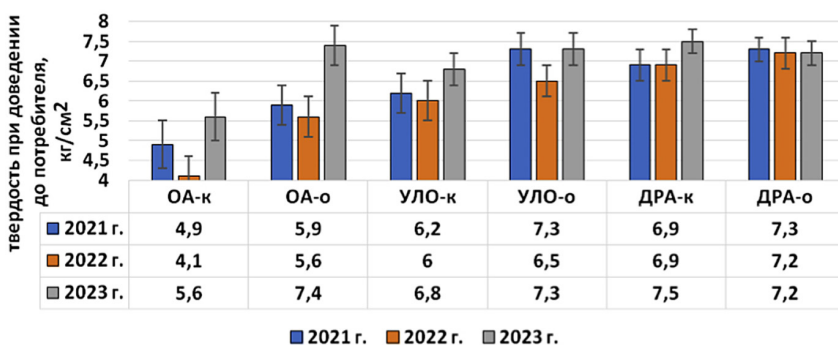
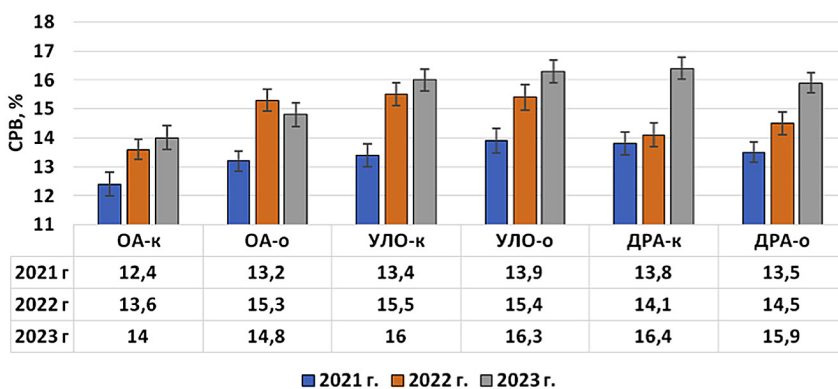


Рисунок 11

Влияние технологий хранения на содержание СРВ в плодах сорта Джеромин после 9 месяцев хранения

Figure 11

The Effect of Storage Technologies on the Soluble Solids Content (SSC) in Jeromin Apples after 9 Months of Storage



Содержание титруемых кислот

Минимальные значения ТК за 3 года исследований (0,12–0,27%) выявлены в условиях ОА-контроль (с максимально высоким метаболизмом плодов). Замедление метаболизма плодов в условиях РА (УЛО-контроль, УЛО+1-МЦП, ДРА-контроль, ДРА+ 1-МЦП) обеспечивало более высокий уровень сохранения кислот (0,21–0,53%), при этом влияние УЛО и ДРА не было последовательным (Рисунок 12). Послеуборочная обработка 1-МЦП обеспечивала существенно более высокий уровень

сохранения ТК в условиях ОА+1-МЦП по сравнению с ОА-контроль, а также отсутствие значимого влияния обработки в условиях УЛО и ДРА (Рисунок 12).

Дегустационная оценка

Максимальной дегустационной оценкой (4,7 балла) отличались плоды варианта ДРА-контроль, более низкими значениями показателя — варианты ДРА+1-МЦП, УЛО+1-МЦП, далее УЛО-контроль и ОА+1-МЦП, минимальные значения характеризовали плоды варианта ОА-контроль (Рисунок 13).

Рисунок 12

Влияние технологий хранения на содержание ТК в плодах сорта Джеромин после 9 месяцев хранения

Figure 12

The Effect of Storage Technologies on the Titratable Acids (TA) Content in Jeromin Apples after 9 Months of Storage

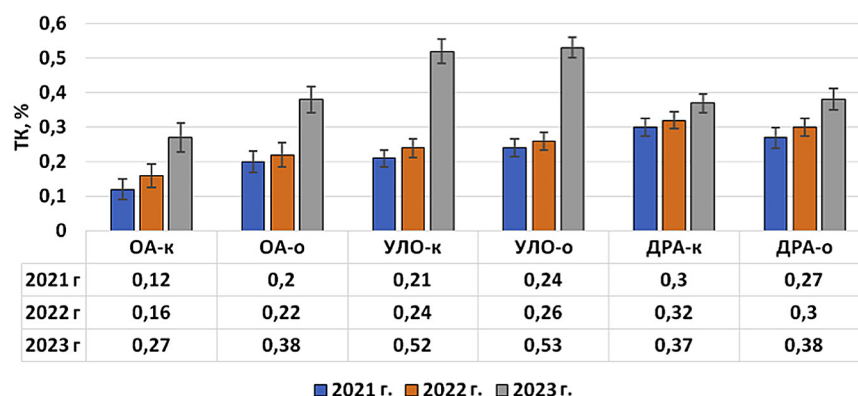
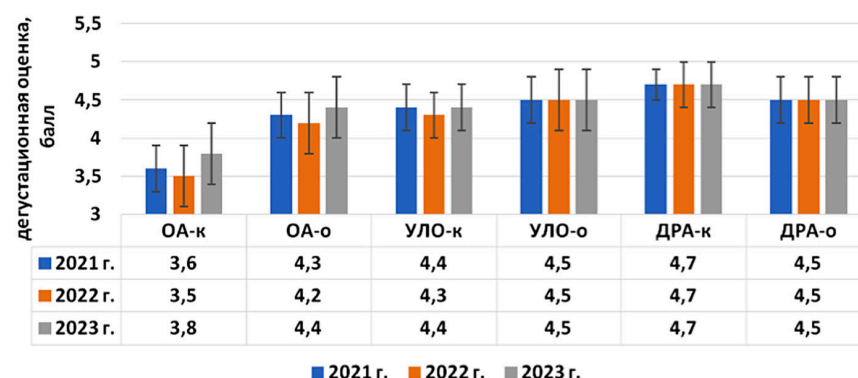


Рисунок 13

Влияние технологий хранения на дегустационную оценку плодов яблони сорта Джеромин потребителем (9 месяцев хранения)

Figure 13

The Effect of Storage Technologies on the Tasting Score of Jeromin Apples (9 Months of Storage)



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное трехлетнее исследование подтвердило, что сорт яблоны Джеромин, генетически связанный с группой Ред Делишес, обладает выраженной предрасположенностью к загару, подкожной и коричневой пятнистости при длительном хранении. Полученные результаты согласуются с данными о высокой чувствительности сортов группы Ред Делишес к комплексу поверхностных физиологических заболеваний, обусловленных как наследуемыми особенностями структуры кожицы и метаболизма плодов, так и специфическими реакциями на стрессовые условия хранения (De Freitas & Pareek, 2019). В то же время для Джеромина нехарактерны маслянистость кожицы, побурение мякоти и сердцевины, а также отмечена низкая поражаемость грибными гнилями даже в годы с высокими потерями от заболеваний у других сортов (Гудковский и соавт., 2024), что указывает на анатомо-морфологические и физиолого-биохимические особенности сорта.

Влияние содержания кислорода в атмосфере хранения, обработки 1-МЦП на развитие физиологических заболеваний

Полученные результаты подтверждают современное представление о том, что загар — это физиологическое заболевание, связанное с накоплением этилена, α -фарнезена и продуктов его окисления (включая конъюгированные триены KT_{281}), повреждающие мембраны эпидермальных клеток в условиях низких температур (Pesis et al., 2010; Lurie & Watkins, 2012; Donadel et al., 2023; De Freitas & Pareek, 2019). В условиях обычной атмосферы (ОА-контроль) пониженная температура была единственным фактором ингибирования метаболизма, тогда как высокий уровень кислорода (21%) поддерживал интенсивное дыхание и биосинтез этилена (Adams & Yang, 1979). Этот фактор в сочетании с активными процессами свободно-радикального окисления приводил к существенному накоплению α -фарнезена и KT_{281} , и уже после 3–5 месяцев хранения отмечалось массовое развитие загара (70–80% при хранении и до 82–100% при доведении до потребителя). Помимо этого, зафиксированы высокие потери от подкожной пятнистости (до 50% и более), что согласуется с данными о роли высоких концентраций

O_2 как фактора, инициирующего и усиливающего окислительные повреждения (Meitha et al., 2020; Mditshwa et al., 2018).

Выраженность подкожной пятнистости в ОА-контроль также соответствует представлениям о её кальций- и стресс-зависимой природе: заболевание связывают с локальным дефицитом Ca^{2+} , дисбалансом минерального питания, снижением антиоксидантной защиты и нарушениями проводимости ксилемы на фоне абиотических стрессов (Saure, 2014; De Freitas & Mitcham, 2012; De Freitas & Pareek, 2019; Torres et al., 2024; Гудковский и соавт., 2019a, 2019b, 2025). Высокий воздухообмен и пониженная относительная влажность воздуха в ОА дополнительно увеличивали риск ПП, особенно для восприимчивых партий (Ferguson & Watkins, 1989; Fernández et al., 2016), что и было зафиксировано в наших опытах.

Послеуборочная обработка 1-метилциклопропеном в сочетании с обычной атмосферой (ОА+1-МЦП) позволяла на ранних этапах хранения временно сдерживать синтез этилена и накопление α -фарнезена, снижая риск развития загара в соответствии с многочисленными данными по другим сортам (Rupasinghe et al., 2000; Watkins et al., 2000; Blankenship & Dole, 2003; Lurie & Watkins, 2012). Однако для плодов сорта Джеромин защитный эффект 1-МЦП оказался ограниченным примерно пятимесячным периодом: в стрессовые по метеословиям годы (2022 и 2023) после 5 месяцев хранения уровень накопления KT_{281} в ОА+1-МЦП достигал 30 нмоль/см², что сопровождалось значительными потерями от загара (до 45,9% при хранении и 66% при доведении до потребителя), тогда как в более благоприятном 2021 г. загар практически не проявлялся. Зафиксированные результаты согласуются с данными о том, что у сортов с высоким метаболизмом и способностью к образованию новых рецепторов этилена защита, обеспечиваемая 1-МЦП, со временем снижается (Blankenship & Dole, 2003; Lurie & Watkins, 2012; De Freitas & Pareek, 2019). Одновременно в ОА+1-МЦП отмечено появление и усиление коричневой пятнистости, что также соответствует литературным данным о МЦП-опосредованном усилении КП у восприимчивых генотипов на фоне химического стресса и стрессовых факторов в условиях ОА (DeEll et al., 2016; Mattheis et al., 2017; De Freitas & Pareek, 2019, Гудковский и соавт., 2019a, 2019b, 2025).

Переход к ультранизкому содержанию кислорода (УЛО-контроль) принципиально изменил соотношение рисков потери качества и развития физиологических заболеваний. Условия УЛО ($\approx 1,2\% \text{ O}_2$) в сочетании с пониженной температурой надежно тормозили созревание плодов (Both et al., 2017): после 9 месяцев хранения твердость Джеромина оставалась на уровне 6,8–7,5 кг/см², а концентрация этилена была существенно ниже, чем в ОА. При этом в партиях с высоким исходным риском ПП потери от данного заболевания снижались до $\approx 5\%$ по сравнению с 31–53,5% в ОА-контроль, а коричневая пятнистость не проявлялась, что подтверждает эффективность низкокислородных режимов в ингибировании ПП и других окислительных повреждений (De Freitas & Pareek, 2019; Donadel et al., 2023). Однако к концу 9-месячного хранения в УЛО в коже плодов накапливалось содержание КТ₂₈₁ (7,1–9,4 нмоль/см²), критичное для чувствительных сортов группы Ред Делишес, а при доведении до потребителя потери от загара достигали 50–66%, в отдельных партиях — 100%, что согласуется с данными о высокой чувствительности плодов к загару при содержании O_2 около 1,5% (Zanella, 2003).

Сочетание обработки 1-МЦП с УЛО (УЛО+1-МЦП) усиливало ингибирование метаболизма плодов и позволило практически полностью исключить загар при хранении до 8–9 месяцев, обеспечивая минимальное накопление этилена, α -фарнезена и КТ₂₈₁ (Blankenship & Dole, 2003; DeEll et al., 2016). Вместе с тем в этом режиме проявлялись ингибированные низким уровнем O_2 очаги подкожной пятнистости, формировалась коричневая пятнистость (до $\approx 5\%$), преимущественно в годы с выраженными предуборочными стрессами (2022–2023). Таким образом, УЛО+1-МЦП для Джеромина представляет собой эффективную технологию контроля загара и продления сроков хранения, но сохраняет риски МЦП-опосредованных повреждений кожицы.

Динамично регулируемая атмосфера без применения 1-МЦП (ДРА-контроль) продемонстрировала наиболее благоприятное сочетание низкой частоты физиологических заболеваний и высокой сохранности качества. Механизмы действия ДРА, описанные в работах Zanella (2003), Streif et al. (2010), Prange et al. (2013), Mditshwa et al. (2018), Weber et al. (2020), включают максимально возможное ингибирование метаболизма плодов физическими факторами хранения (минимально допусти-

мый уровень кислорода, пониженная температура) и естественные процессы жизнедеятельности плодов яблони при неглубоком (обратимом) анаэробном метаболизме. В наших опытах это проявилось в низких уровнях этилена и α -фарнезена, умеренном накоплении КТ₂₈₁ (4,2–6,9 нмоль/см²), низком содержании биотоксикантов в атмосфере камеры (Гудковский и соавт., 2025), что обеспечивало практически полное отсутствие загара, минимальные потери от ПП (0–2%) и отсутствие коричневой пятнистости при сроках хранения до 9–10 месяцев. По сравнению с УЛО-контроль технология ДРА позволяла устранить риски развития загара при сопоставимых или более низких потерях от ПП, а по сравнению с ОА-контроль радикально снижала суммарные потери от всех видов физиологических заболеваний, что согласуется с представлениями о преимуществе атмосферы хранения с минимально допустимым уровнем O_2 для контроля физиологических заболеваний у чувствительных к ним сортов (Zanella, 2003; Prange et al., 2013; Donadel et al., 2023; Гудковский и соавт., 2019a, 2019b, 2025).

Послеуборочная обработка 1-МЦП в условиях ДРА (ДРА+1-МЦП) дополнительно минимизировала накопление этилена и α -фарнезена, снижала КТ₂₈₁ до 0,5–2,0 нмоль/см², полностью исключая загар, но при этом ещё более жестко блокировала процессы дозревания. Газохроматографический анализ показал отсутствие динамики этилена после 6–9 месяцев хранения и последующем доведении до потребителя, что сопровождалось снижением выраженности сортового аромата и более низкими дегустационными оценками по сравнению с ДРА-контроль, аналогично наблюдениям Yang et al. (2016) для других сортов. Потери от ПП и КП в ДРА+1-МЦП оставались минимальными и сопоставимыми с ДРА-контроль (суммарно $\leq 2,3\%$), поэтому дополнительное применение 1-МЦП в условиях ДРА не дает существенных преимуществ в части контроля заболеваний, но усиливает сенсорные ограничения технологии.

В совокупности наши данные подтверждают, что для сорта Джеромин ключевым фактором управления физиологическими заболеваниями при длительном хранении является глубина снижения содержания O_2 , тогда как использование 1-МЦП без низкокислородного хранения (ОА+1-МЦП) не обеспечивает надежной защиты от загара и не предотвращает развитие ПП и КП.

Роль предуборочных факторов и степени зрелости плодов при съёме

Межгодовые различия по уровню потерь от ПП и ПП+КП показали, что наследуемая предрасположенность сорта к физиологическим заболеваниям существенно модифицируется предуборочными факторами. В урожаях 2022 и 2023 гг, отличавшихся высокой температурой и дефицитом осадков в предуборочный период (ГТК 0,35–0,48) фиксировались максимальные потери от подкожной и коричневой пятнистости, особенно в ОА и ОА+1-МЦП. Эти потери зафиксированы в ситуации максимально ранних сроков съема (ЙКП 1,6–2,2 балла, содержание этилена <0,1 ppm) и молодого возраста насаждений. Полученные данные подтверждают, что жаркая и сухая погода, ранний съем усиливают восприимчивость плодов к ПП и загару вследствие нарушения накопления кальция и антиоксидантов, изменения водного статуса тканей и повышения чувствительности к стрессам хранения (De Freitas & Mitcham, 2012; De Freitas & Pareek, 2019; Torres et al., 2024; Whitaker et al., 2009; Никитин & Макаркина, 2021; Thomas & Adarsh, 2020).

В урожае 2021 г., напротив, наблюдались более благоприятные условия влагообеспеченности (ГТК 1,26) и более продвинутая степень зрелости при съеме (ЙКП 2,5–3 балла, этилен 0,6 ppm), это сопровождалось минимальными потерями от ПП во всех режимах хранения. Корреляционный анализ подтвердил тесную связь между суммой максимальных температур и количеством осадков в предуборочный период и потерями от ПП и ПП+КП (коэффициенты корреляции до 0,73–0,97 и от –0,90 до –0,98 соответственно), что согласуется с концепцией комплексного влияния климатических факторов на формирование исходной устойчивости плодов к физиологическим заболеваниям (De Freitas & Mitcham, 2012; De Freitas & Pareek, 2019). При этом низкокислородные режимы (УЛО и особенно ДРА) частично нивелировали негативное влияние предуборочных стрессов, тогда как в ОА и ОА+1-МЦП эти эффекты проявлялись в максимальной степени.

Влияние технологий хранения на потребительские качества плодов

Сохранение потребительских качеств плодов Джеромира при длительном хранении определялось сочетанием показателей твердости, содержания сухих растворимых веществ (СРВ) и титруемой кислотности (ТК), что соответствует современным представлениям о ключевых детерминантах восприятия текстуры и вкуса яблок (Hoeft et al., 2003; Musacchi & Serra, 2018). В условиях ОА-контроль максимально высокий и слабо контролируемый метаболизм уже после 5–9 месяцев приводил к состоянию постклимактерического старения: твердость снижалась до 4,1 кг/см², СРВ — до 12,4–14,0%, ТК — до 0,12–0,27%. Эти значения ниже рекомендуемого порога твердости для приемлемого потребительского восприятия ($\approx 6,4$ кг/см²) (DeLong et al., 2000; Harker et al., 2002) и выходят за рекомендуемые диапазоны кислотности для европейского рынка (<0,3% и >1% считаются нежелательными) (Bai et al., 2015), что снижает конкурентоспособность такого продукта.

В низкокислородных режимах (УЛО-контроль, УЛО+1-МЦП, ДРА-контроль, ДРА+1-МЦП) замедление интенсивности дыхания обеспечивало более высокое сохранение СРВ (13,4–16,4%) и кислот (0,21–0,53%) по сравнению с ОА, что соответствует представлениям о роли органических кислот как ключевых субстратов дыхания в пред- и послеуборочный период (Ackermann et al., 1992; Kingston, 2010; Musacchi & Serra, 2018). Послеуборочная обработка 1-МЦП существенно повышала сохранность кислот только в условиях ОА+1-МЦП, тогда как в УЛО и ДРА дополнительный эффект препарата был ограниченным, что подчеркивает первостепенное значение содержания O₂ для регуляции расхода кислот.

Максимальное ингибирование метаболизма в ДРА+1-МЦП обеспечивало наивысший среди изученных технологий уровень сохранения твердости при хранении (7,6–7,7 кг/см²) и доведении до потребителя (7,2–7,4 кг/см²), однако разница по сравнению с ДРА-контроль и УЛО+1-МЦП зачастую не превышала порог сенсорной различимости текстуры ($\approx 0,6$ кг) (Harker et al., 2002). При этом именно в ДРА-контроль сочетались приемлемая твердость, гармоничное соотношение СРВ и ТК и более высокие дегустационные оценки, что согласуется с данными о том,

что чрезмерное ингибирование созревания 1-МЦП может снижать выраженность сортового аромата и обеднять вкусовой профиль (Yang et al., 2016). С учетом отсутствия послеуборочной химической обработки и минимальных потерь от физиологических заболеваний это делает ДРА-контроль наиболее сбалансированной технологией длительного хранения плодов сорта Джеромин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное трехлетнее исследование показало, что сорт яблони Джеромин, генетически связанный с группой Ред Делишес, отличается высоким уровнем восприимчивости к основным физиологическим заболеваниям: загару, подкожной и коричневой пятнистости, но устойчив к маслянистости кожицы, побурению мякоти и сердцевины. Отмечена низкая поражаемость плодов грибными гнилями даже в годы с высокими потерями от заболеваний у других сортов, что свидетельствует о специфическом сочетании анатомо-морфологических и физиолого-биохимических характеристик сорта. Такое сочетание, наряду с привлекательной окраской и высокими потребительскими свойствами, формирует его потенциально высокую конкурентоспособность на рынке при условии подбора эффективной технологии хранения.

Показано, что выраженность физиологических заболеваний у Джеромина определяется не только технологиями хранения, но и условиями вегетационного периода, степенью зрелости плодов при съеме. Жаркая и сухая погода в предуборочный период, ранний съем плодов сопровождались повышением потерь от подкожной пятнистости и загара; установлены тесные корреляционные связи между суммой максимальных температур, количеством осадков и потерями от ПП и ПП+КП. Более благоприятные по влагообеспеченности сезоны и более продвинутая степень зрелости плодов при съеме ассоциировались с меньшей восприимчивостью к расстройствам. Эти результаты подчеркивают необходимость учета предуборочных факторов при прогнозировании рисков развития физиологических заболеваний и планировании сроков съема и хранения.

Сравнение шести технологий хранения показало решающую роль уровня содержания кислоро-

да и глубины ингибирования метаболизма плодов при контроле их качества. Обычная атмосфера (ОА) даже при оптимально низкой температуре обеспечивала лишь короткий безопасный период хранения: высокий уровень кислорода способствовал повышению интенсивности дыхания, накоплению этилена, α -фарнезена и продуктов его окисления, приводил к значительным потерям от загара и подкожной пятнистости уже после 3–5 месяцев. Послеуборочная обработка 1-метилциклопропеном в сочетании с ОА (ОА+1-МЦП) эффективна для временного контроля созревания и загара, но её защитный эффект для Джеромина оказался ограничен примерно пятью месяцами хранения и зависел от условий вегетации; при увеличении сроков возростали риски развития загара, потери качества.

Низкокислородные технологии (УЛО и ДРА) продемонстрировали принципиально иное соотношение рисков контроля качества плодов. УЛО-контроль надежно тормозил созревание и резко снижал потери от подкожной пятнистости по сравнению с ОА, однако при длительном хранении в атмосфере камеры и плодах накапливались уровни биотоксикантов, критичные для данного сорта, что сопровождалось значительными потерями от загара при доведении до потребителя и фактически ограничивало срок хранения 4–5 месяцами. Сочетание 1-МЦП с УЛО (УЛО+1-МЦП) обеспечивало высокую устойчивость плодов к загару и хорошее сохранение твердости до 8–9 месяцев, но приводило к проявлению скрытых очагов ПП и развитию коричневой пятнистости у восприимчивых плодов, а также сопровождалось снижением выраженности сортового аромата.

Динамично регулируемая атмосфера (ДРА) без применения 1-МЦП (ДРА-контроль) показала себя наиболее сбалансированной технологией для длительного хранения Джеромина. Сочетание минимально допустимого уровня кислорода, пониженной температуры и обратимого анаэробного метаболизма плодов обеспечивало низкий уровень накопления этилена, α -фарнезена и продуктов его окисления, практически полное отсутствие загара, минимальные потери от подкожной пятнистости и отсутствие коричневой пятнистости при сроках хранения до 9–10 месяцев. При этом сохранялись приемлемая для потребителя твердость, гармоничное соотношение сухих растворимых веществ, титруемых кислот и высокие дегустационные оцен-

ки. Дополнительная обработка 1-МЦП в условиях ДРА (ДРА+1-МЦП) не давала существенных преимуществ в отношении контроля физиологических заболеваний по сравнению с ДРА-контроль, но усиливала ингибирование созревания, ограничивая развитие аромата и снижая сенсорную привлекательность плодов, хотя и позволяла ещё более продлить календарный срок хранения.

Таким образом, для промышленного хранения плодов сорта Джеромин в условиях, близких к изученным, наилучшим образом себя зарекомендовала технология ДРА-контроль, обеспечивающая длительный (до 9–10 месяцев) период хранения без применения послеуборочных химических препаратов при минимальных потерях от загара, подкожной и коричневой пятнистости и высоком уровне сохранения потребительских свойств. Технологии, основанные на обработке 1-МЦП, актуальны в качестве инструментов продления сроков хранения и защиты от загара, однако для данного сорта и изученного региона их использование сопровождается рисками МЦП-опосредованных физиологических расстройств и снижением ароматического профиля, что в совокупности с запросом на снижение химической нагрузки может ограничивать их конкурентоспособность по сравнению с нехимическими вариантами низкокислотного хранения.

Ограничениями настоящей работы являются изучение одного сорта и одного промышленного сада в конкретных почвенно-климатических условиях, а также отсутствие детализированного экономического анализа различных технологий. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется проверка эффективности технологии ДРА-контроль и других технологий хранения на перспективных сортах яблони, различающихся генетической предрасположенностью к физиологическим заболеваниям, в разных агроклиматических зонах, с включением оценки экономической эффективности и более глубокого изучения физиолого-биохимических механизмов устойчивости плодов к физиологическим заболеваниям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность А. Ш. Ширинову (ООО «Сады Ставрополя», Ставропольский край, ЮФО), инициатору проведения исследований, за активное участие в совместной работе, поставку плодов яблони для ее осуществления.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Владимир Александрович Гудковский: концептуализация; разработка модели исследования; ресурсное обеспечение; написание; рецензирование и редактирование рукописи.

Людмила Владимировна Кожина: разработка модели исследования; проведение исследования; верификация данных; написание; рецензирование и редактирование рукописи.

Назаров Юрий Борисович: проведение исследования; верификация данных; рецензирование и редактирование рукописи.

Сутормина Алена Владимировна: проведение исследования; верификация данных; рецензирование и редактирование рукописи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Vladimir A. Gudkovsky: conceptualization; research model design; resource provision; writing; reviewing and editing the manuscript.

Lyudmila V. Kozhina: research model design; conducting the research; data verification; writing; reviewing and editing the manuscript.

Yuri B. Nazarov: conducting the research; data verification; reviewing and editing the manuscript.

Alena V. Sutormina: conducting the research; data verification; reviewing and editing the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

- Гудковский, В. А., Кожина, Л. В., Балакирев, А. Е., & Назаров, Ю. Б. (2019а). Новая технология защиты плодов яблони от подкожной пятнистости и других физиологических заболеваний при хранении. *Садоводство и виноградарство*, (4), 37–44. <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2019-4-37-44>
- Гудковский, В. А., Кожина, Л. В., Назаров, Ю. Б., Балакирев, А. Е., & Гучева, Р. Б. (2019b). Высокоточные технологии хранения плодов яблони – основа обеспечения их качества (достижения, задачи на перспективу). *Достижения науки и техники АПК*, 33(2), 61–67. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10215>
- Гудковский, В. А., Кожина, Л. В., Назаров, Ю. Б., & Сутормина, А. В. (2024). Комплекс технологий для длительного хранения плодов яблок сорта Гала. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(2), 133–146. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.495>
- Гудковский, В. А., Кожина, Л. В., Назаров, Ю. Б., & Сутормина, А. В. (2025). *Система круглогодичного хранения плодов яблони*. Воронеж: Кварта.
- Доспехов, Б.А. (1979). *Методика полевого опыта* (изд. 4-е, перераб. и доп.). Москва: Колос.
- Ермаков, А.И., Арасимович, В.Е., Смирнова-Иконникова, М.И., Ярош, Н.П., & Луковникова, Г.А. (1972). *Методы биохимического исследования растений*. Ленинград: Колос.
- Морозова, Н.П. (1980). Спектрофотометрическое определение содержания α -фарнезена и продуктов его окисления в растительном материале. *Биохимические методы* (с. 107–112). Москва: Наука.
- Никитин, А. Л., & Макаркина, М. А. (2021). Деструктивные гидротермические факторы вегетационного периода за месяц до уборки урожая, увеличивающие потери плодов яблони от «загара» во время хранения. *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*, (6), 23–26. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/6/23-26>
- Ракитин, В. Ю. (1986). Определение газообмена и содержания этилена, двуокси углерода и кислорода в тканях растений. *Физиология растений* (т. 33, вып. 2, с. 403–413). Москва: Наука.
- Ackermann, J., Fischer, M., & Amado, R. (1992). Changes in sugars, acids, and amino acids during ripening and storage of apples (cv. Glockenapfel). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(7), 1131–1134. <https://doi.org/10.1021/jf00019a008>
- 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.76.1.170>
- Bai, Y., Dougherty, L., Cheng, L., Zhong, G.Y., & Xu, K. (2015). Uncovering co-expression gene network modules regulating fruit acidity in diverse apples. *BMC Genomics* 16(1), 612. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1816-6>
- Blankenship S. M., Dole J. M. (2003). 1-Methylcyclopropene: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 28(1), 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00246-6)
- Both, V., Thewes, F. R., Brackmann, A., de Oliveira Anese, R., de Freitas Ferreira, D., & Wagner, R. (2017). Effects of dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on some quality parameters and volatile profile of ‘Royal Gala’ apple after long-term storage. *Food Chemistry*, 215, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.009>
- Boukerche, S., Ouali, A., Ouali, K. (2024). Effect of contaminated diet with a plant growth regulator “1-methylcyclopropene” on the hematological parameters and liver function of albino Wistar rats. *Comparative Clinical Pathology*, 33(1), 21–32. <https://doi.org/10.1007/s00580-023-03518-6>
- Brizzolara, S., Santucci, C., Tenori, L., Hertog, M., Nicolai, B., Stürz, S., Zanella, A., & Tonutti, P. (2017). A metabolomics approach to elucidate apple fruit responses to static and dynamic controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 127, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.008>
- Çalhan, Ö., Eren, İ., Seçmen, T., Güneylİ, A., Onursal, C. E., & Koyuncu, M. A. (2015). Determination of storage and shelf life quality of Jeromine apple variety grown in the Isparta. *Sixth International Scientific Agricultural Symposium “Agrosym 2015”. Book of Proceedings* (pp. 1001–1006). Lukavica: University of East Sarajevo.

- De Freitas S.T. & Mitcham, E.I. (2012). Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. *Horticultural Reviews*, 40, 107–146. <https://doi.org/10.1002/9781118351871>
- De Freitas, S. T., & Pareek, S. (2019). *Postharvest physiological disorders in fruits and vegetables*. Boca Raton: CRC Press.
- DeEll, J. R., Lum, G. B., & Ehsani-Moghaddam, B. (2016). Effects of multiple 1-methylcyclopropene treatments on apple fruit quality and disorders in controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.002>
- DeLong, J. M., Prange, R. K., Harrison, P. A., & McRae, K. B. (2000). Comparison of a new apple firmness penetrometer with three standard instruments. *Postharvest Biology and Technology*, 19(3), 201–209. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00097-1)
- Donadel, J. Z., Thewes, F. R., Dos Santos, L. F., Schultz, E. E., Berghetti, M. R. P., Ludwig, V., Mesadri, J., Klein, B., Thewes, F. R., Schmidt, S. F. P., Both, V., Brackmann, A., Neuwald, D. A., & Wagner, R. (2023). Superficial scald development in ‘Granny Smith’ and ‘Nicoter’ apples: The role of key volatile compounds when fruit are stored under dynamic controlled atmosphere. *Food Research International*, 173, 113396. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113396>
- Fan, X., Mattheis, J. P., & Blankenship, S. (1999). Development of apple superficial scald, soft scald, core flush, and greasiness is reduced by MCP. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(8), 3063–3068. <https://doi.org/10.1021/jf981176b>
- Ferguson, I. B., & Watkins, C. B. (1989). Bitter pit in apple fruit. *Horticultural reviews*, 11, 289–355. <https://doi.org/10.1002/9781118060841.ch8>
- Fernández, V., Guzmán-Delgado, P., Graça, J., Santos, S., & Gil, L. 2016. Cuticle structure in relation to chemical composition: re-assessing the prevailing model. *Frontiers in Plant Science*, 7, 427. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00427>
- Gasser, F., & Von Arx, K. (2015). Dynamic CA storage of organic apple cultivars. *Acta Horticulturae*, 1071, 527–532. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1071.68>
- Gouws, A., & Steyn, W. J. (2014). The effect of temperature, region and season on red colour development in apple peel under constant irradiance. *Scientia Horticulturae*, 173, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.040>
- Guerra, W., & Sansavini, S. (2012). Gala e le sue mutazioni: Una storia senza fine [Gala and its mutations: A never-ending story]. *Rivista di Frutticoltura e di Ortofloricoltura*, 74(11), 26–32.
- Harker, F. R., Maindonald, J., Murray, S. H., Gunson, F. A., Hallett, I. C., & Walker, S. B. (2002). Sensory interpretation of instrumental measurements 1: Texture of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 24(3), 225–239. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00158-2)
- Hoehn, E., Gasser, F., Guggenbühl, B., & Künsch, U. (2003). Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharvest Biology and Technology*, 27(1), 27–37. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00190-4)
- Jung, S.K., James, H., Lee, J., Nock, J.F. & Watkins, C.B. (2010). Effects of ethylene inhibition on development of flesh browning in apple fruit. *Acta Horticulturae*, 877, 549–554. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.71>
- Jung, S. K., & Watkins, C. B. (2008). Superficial scald control after delayed treatment of apple fruit with diphenylamine (DPA) and 1-methylcyclopropene (1-MCP). *Postharvest Biology and Technology*, 50(1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.05.006>
- Kearney, J. (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2793–2807. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0149>
- Kingston, C. M. (2010). Maturity indices for apple and pear. *Horticultural Reviews*, 13, 407–422. <https://doi.org/10.1002/9780470650509.ch10>
- Knorr, D., Khoo, C. S. H., & Augustin, M. A. (2018). Food for an urban planet: Challenges and research opportunities. *Frontiers in Nutrition*, 4, 73. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00073>
- Lurie, S. & Watkins, C. B. (2012). Superficial scald, its etiology and control. *Postharvest Biology and Technology*, 65, 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.11.001>
- Lyu, F., Luiz, S. F., Azeredo, D. R. P., Cruz, A. G., Ajlouni, S., & Ranadheera, C. S. (2020). Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. *Processes*, 8(3), 319. <https://doi.org/10.3390/pr8030319>

- Mattheis, J.P., Rudell, D. R., & Hanrahan, I. (2017). Impacts of 1-methylcyclopropene and controlled atmosphere established during conditioning on development of bitter pit in 'Honeycrisp' apples. *Hortscience*, 52(1), 132–137. <https://doi.org/10.21273/HoRTSCI11368-16>
- Mditshwa, A., Fawole, O.A., & Opara, U.L. (2018). Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples - A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 16, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.01.011>
- Meitha, K., Pramesti, Y., & Suhandono, S. (2020). Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits. *International Journal of Food Science*, (1), 8817778. <https://doi.org/10.1155/2020/8817778>
- Muder, A., Garming, H., Dreisiebner-Lanz, S., Kerngast, K., Rosner, F., Kličková, K., Kurthy, G., Cimer, K., Bertazzoli, A., Altamura, V., De Ros, G., Zmarlicki, K., de Belém Costa Freitas, M., Duarte, A., Bravin, E., Kambor, J., Karamürsel, D., Pinar Öztürk, F., & Kaçal, E. (2022). Apple production and apple value chains in Europe. *European Journal of Horticultural Science*, 87(6), 1–22. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2022/059>
- Musacchi, S., & Serra, S. (2018). Apple fruit quality: Overview on pre-harvest factors. *Scientia Horticulturae*, 234, 409–430. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.057>
- Palmer, J. W. (2014). The future role of crop physiologists, a personal view. *Acta Horticulturae*, 1058, 209–220. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1058.24>
- Ouali, A., Boukerche, S., Trea, F., & Ouali, K. (2024). In vivo and in silico studies assessment of the effects of oral exposure to 1-methylcyclopropene on liver function in male albino rats. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 94(3), 597–606. <https://doi.org/10.1007/s40011-024-01562-y>
- Pesis, E., Ebeler, S. E., de Freitas, S. T., Padda, M., & Mitcham, E. J. (2010). Short anaerobiosis period prior to cold storage alleviates bitter pit and superficial scald in Granny Smith apples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(12), 2114–2123. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4060>
- Prange, R., Wright, A., DeLong, J., & Zanella, A. (2013). A review on the successful adoption of dynamic controlled-atmosphere (DCA) storage as a replacement for diphenylamine (DPA), the chemical used for control of superficial scald in apples and pears. *Acta Horticulturae*, 1071, 389–396. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1071.50>
- Rozman, Č., Hühner, M., Kolenko, M., Tojnko, S., Unuk, T., & Pažek, K. (2015). Apple variety assessment with analytical hierarchy process. *Erwerbs-Obstbau*, 57, 97–104. <https://doi.org/10.1007/s10341-015-0236-8>
- Rupasinghe, H. P. V., Murr, D. P., Paliyath, G., & DeEll, J. R. (2000). Suppression of alpha-farnesene synthesis in 'delicious' apples by Aminoethoxyvinylglycine (AVG) and 1-Methylcyclopropene (1-MCP). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 6, 195–198. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3587-6_13
- Salame, E. (2024). *Dissecting the effects of dynamic controlled atmosphere (DCA) and postharvest hypoxic stress on 'Red delicious' apple fruit physiology* [PhD Dissertation Thesis]. Scuola Superiore di Studi Universitari e Perfezionamento "S. Anna" di Pisa. <https://hdl.handle.net/20.500.14242/217133>
- Saure, M. C. (2014). Why calcium deficiency is not the cause of blossom-end rot in tomato and pepper fruit – a reappraisal. *Scientia Horticulturae*, 174, 151–154. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.020>
- Shi, M. (2021). *Physiochemical quality, instrumental and sensory evaluation of apples treated by post-harvest treatment technologies: Dynamic controlled atmosphere (DCA), controlled atmosphere (CA), and 1-methylcyclopropene (1MCP)* [Unpublished Master's dissertation]. Cornell University.
- Streif, J., Kitemann, D., Neuwald, D.A., McCormick, R., & Xuan, H. (2010). Pre- and post-harvest management of fruit quality, ripening and senescence. *Acta Horticulturae*, 877, 55–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.2>
- Thomas, G., & Adarsh, S. (2020). Versatility of calcium as a plant nutrient. *Advantages in Agronomy*, 9, 119–141. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819978-5.00004-7>
- Torres, E., Kalcits, L., & Nieto, L. G. (2024). Is calcium deficiency the real cause of bitter pit? A review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1383645. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1383645>

- Vasylieva, N., and James, H. (2021). Production and trade patterns in the world apple market. *Innovative Marketing*, 17, 16–25. [https://doi.org/10.21511/im.17\(1\).2021.02](https://doi.org/10.21511/im.17(1).2021.02)
- Watkins, C. B. (2008). Overview of 1-methylcyclopropene trials and uses for edible horticultural crops. *HortScience*, 43(1), 86–94. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.86>
- Watkins, C. B., Bramlage, W. J., Brookfield, P. L., Reid, S. J., Weis, S. A., & Alwan, T. F. (2000). Cultivar and growing region influence efficacy of warming treatments for amelioration of superficial scald development on apples after storage. *Postharvest Biology and Technology*, 19(1), 33–45. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00071-5)
- Weber, A., Brackmann, A., Anese, R. D. O., Both, V., & Pavanello, E. P. (2011). ‘Royal Gala’ apple quality stored under ultralow oxygen concentration and low temperature conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 1597–1602. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001200003>
- Weber, A., Neuwald, D. A., Kittermann, D., Thewes, F. R., Both, V., & Brackmann, A. (2020). Influence of respiratory quotient dynamic controlled atmosphere (DCA-RQ) and ethanol application on softening of Braeburn apples. *Food Chemistry*, 303, 125346. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125346>
- Whitaker, B. D., Villalobos-Acuna, M., Mitcham, E. J., & Mattheis, J. P. (2009). Superficial scald susceptibility and α -farnesene metabolism in ‘Bartlett’ pears grown in California and Washington. *Postharvest Biology and Technology*, 53(1–2), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.04.002>
- Yang, X., Song, J., Du, L., Forney, C., Campbell-Palmer, L., Fillmore, S., Wismer, P., & Zhang, Z. (2016). Ethylene and 1-MCP regulate major volatile biosynthetic pathways in apple fruit. *Food Chemistry*, 194, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.018>
- Zanella, A. (2003). Control of apple superficial scald and ripening — A comparison between 1-methylcyclopropene and diphenylamine postharvest treatments, initial low oxygen stress and ultra low oxygen storage. *Postharvest Biology and Technology*, 27(1), 69–78. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00187-4)
- Zanella, A., & Rossi, O. (2015). Post-harvest retention of apple fruit firmness by 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment or dynamic CA storage with chlorophyll fluorescence (DCA-CF). *European Journal of Horticultural Science*, 80(1), 11–17. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.1.2>
- Zanella, A., & Stürz, S. (2015). Optimizing postharvest life of horticultural products by means of dynamic CA: Fruit physiology controls atmosphere composition during storage. *Acta Horticulturae*, 1071, 59–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1071.4>

REFERENCES

- Gudkovsky, V. A., Kozhina, L. V., Balakirev, A. E., & Nazarov, Yu. B. (2019a). New technology for protecting apple fruits from bitter pit and other physiological diseases during storage. *Horticulture and Viticulture*, (4), 37–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2019-4-37-44>
- Gudkovsky, V. A., Kozhina, L. V., Nazarov, Yu. B., Balakirev, A. E., & Gucheva, R. B. (2019b). High-precision technologies of apple fruits storage are the basis for ensuring their quality (achievements, tasks for the future). *Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex*, 33(2), 61–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10215>
- Gudkovsky, V. A., Kozhina, L. V., Nazarov, Yu. B., & Sutormina, A. V. (2024). Complex of technologies for long-term storage of apple fruits cv. Gala. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 32(2), 133–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.2.495>
- Gudkovsky, V. A., Kozhina, L. V., Nazarov, Yu. B., & Sutormina, A. V. (2025). *System of year-round storage of apple fruits*. Voronezh: Kvarta. (In Russ.)
- Dospehov, B. A. (1979). *Methodology of field experience* (4th ed., revised and supplemented). Moscow: Kolos. (In Russ.)
- Ermakov, A. I., Arasimovich, V. E., Smirnova-Ikonnikova, M. I., Yarosh, N. P., & Lukovnikova, G. A. (1972). *Methods of biochemical research of plants*. Leningrad: Kolos. (In Russ.)

- Morozova, N. P. (1980). Spectrophotometric determination of the content of α -farnesene and its oxidation products in plant material. In *Biochemical methods* (pp. 107–112). Moscow: Science. (In Russ.)
- Nikitin, A. L., & Makarkina, M. A. (2021). Destructive hydrothermal factors of the growing season a month before harvesting, increasing the loss of apple fruits from scald during storage. *Bulletin of the Russian Agricultural Science*, (6), 23–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/6/23-26>
- Rakitin, V. Yu. (1986). Determination of gas exchange and ethylene, carbon dioxide and oxygen content in plant tissues. In *Plant Physiology* (vol. 33(2), pp. 403–413). Moscow: Science. (In Russ.)
- Ackermann, J., Fischer, M., & Amado, R. (1992). Changes in sugars, acids, and amino acids during ripening and storage of apples (cv. Glockenapfel). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(7), 1131–1134. <https://doi.org/10.1021/jf00019a008>
- 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. <https://doi.org/10.1073/pnas.76.1.170>
- Bai, Y., Dougherty, L., Cheng, L., Zhong, G.Y., & Xu, K. (2015). Uncovering co-expression gene network modules regulating fruit acidity in diverse apples. *BMC Genomics* 16(1), 612. <https://doi.org/10.1186/s12864-015-1816-6>
- Blankenship S. M., Dole J. M. (2003). 1-Methylcyclopropene: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 28(1), 1–25. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00246-6)
- Both, V., Thewes, F. R., Brackmann, A., de Oliveira Anese, R., de Freitas Ferreira, D., & Wagner, R. (2017). Effects of dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on some quality parameters and volatile profile of ‘Royal Gala’ apple after long-term storage. *Food Chemistry*, 215, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.009>
- Boukerche, S., Ouali, A., Ouali, K. (2024). Effect of contaminated diet with a plant growth regulator “1-methylcyclopropene” on the hematological parameters and liver function of albino Wistar rats. *Comparative Clinical Pathology*, 33(1), 21–32. <https://doi.org/10.1007/s00580-023-03518-6>
- Brizzolara, S., Santucci, C., Tenori, L., Hertog, M., Nicolai, B., Stürz, S., Zanella, A., & Tonutti, P. (2017). A metabolomics approach to elucidate apple fruit responses to static and dynamic controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 127, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.01.008>
- Çalhan, Ö., Eren, İ., Seçmen, T., Güneylİ, A., Onursal, C. E., & Koyuncu, M. A. (2015). Determination of storage and shelf life quality of Jeromine apple variety grown in the Isparta. *Sixth International Scientific Agricultural Symposium “Agrosym 2015”. Book of Proceedings* (pp. 1001–1006). Lukavica: University of East Sarajevo.
- De Freitas S.T. & Mitcham, E.I. (2012). Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. *Horticultural Reviews*, 40, 107–146. <https://doi.org/10.1002/9781118351871>
- De Freitas, S. T., & Pareek, S. (2019). *Postharvest physiological disorders in fruits and vegetables*. Boca Raton: CRC Press.
- DeEll, J. R., Lum, G. B., & Ehsani-Moghaddam, B. (2016). Effects of multiple 1-methylcyclopropene treatments on apple fruit quality and disorders in controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.002>
- DeLong, J. M., Prange, R. K., Harrison, P. A., & McRae, K. B. (2000). Comparison of a new apple firmness penetrometer with three standard instruments. *Postharvest Biology and Technology*, 19(3), 201–209. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00097-1)
- Donadel, J. Z., Thewes, F. R., Dos Santos, L. F., Schultz, E. E., Berghetti, M. R. P., Ludwig, V., Mesadri, J., Klein, B., Thewes, F. R., Schmidt, S. F. P., Both, V., Brackmann, A., Neuwald, D. A., & Wagner, R. (2023). Superficial scald development in ‘Granny Smith’ and ‘Nicoter’ apples: The role of key volatile compounds when fruit are stored under dynamic controlled atmosphere. *Food Research International*, 173, 113396. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113396>
- Fan, X., Mattheis, J. P., & Blankenship, S. (1999). Development of apple superficial scald, soft scald, core flush, and greasiness is reduced by MCP. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(8), 3063–3068. <https://doi.org/10.1021/jf981176b>

- Ferguson, I. B., & Watkins, C. B. (1989). Bitter pit in apple fruit. *Horticultural reviews*, 11, 289–355. <https://doi.org/10.1002/9781118060841.ch8>
- Fernández, V., Guzmán-Delgado, P., Graça, J., Santos, S., & Gil, L. 2016. Cuticle structure in relation to chemical composition: re-assessing the prevailing model. *Frontiers in Plant Science*, 7, 427. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00427>
- Gasser, F., & Von Arx, K. (2015). Dynamic CA storage of organic apple cultivars. *Acta Horticulturae*, 1071, 527–532. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1071.68>
- Gouws, A., & Steyn, W. J. (2014). The effect of temperature, region and season on red colour development in apple peel under constant irradiance. *Scientia Horticulturae*, 173, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.040>
- Guerra, W., & Sansavini, S. (2012). Gala e le sue mutazioni: Una storia senza fine [Gala and its mutations: A never-ending story]. *Rivista di Frutticoltura e di Ortofloricoltura*, 74(11), 26–32.
- Harker, F. R., Maindonald, J., Murray, S. H., Gunson, F. A., Hallett, I. C., & Walker, S. B. (2002). Sensory interpretation of instrumental measurements 1: Texture of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 24(3), 225–239. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(01\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(01)00158-2)
- Hoehn, E., Gasser, F., Guggenbühl, B., & Künsch, U. (2003). Efficacy of instrumental measurements for determination of minimum requirements of firmness, soluble solids, and acidity of several apple varieties in comparison to consumer expectations. *Postharvest Biology and Technology*, 27(1), 27–37. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00190-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00190-4)
- Jung, S.K., James, H., Lee, J., Nock, J.F. & Watkins, C.B. (2010). Effects of ethylene inhibition on development of flesh browning in apple fruit. *Acta Horticulturae*, 877, 549–554. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.71>
- Jung, S. K., & Watkins, C. B. (2008). Superficial scald control after delayed treatment of apple fruit with diphenylamine (DPA) and 1-methylcyclopropene (1-MCP). *Postharvest Biology and Technology*, 50(1), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.05.006>
- Kearney, J. (2010). Food consumption trends and drivers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2793–2807. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0149>
- Kingston, C. M. (2010). Maturity indices for apple and pear. *Horticultural Reviews*, 13, 407–422. <https://doi.org/10.1002/9780470650509.ch10>
- Knorr, D., Khoo, C. S. H., & Augustin, M. A. (2018). Food for an urban planet: Challenges and research opportunities. *Frontiers in Nutrition*, 4, 73. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00073>
- Lurie, S. & Watkins, C. B. (2012). Superficial scald, its etiology and control. *Postharvest Biology and Technology*, 65, 44–60. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.11.001>
- Lyu, F., Luiz, S. F., Azeredo, D. R. P., Cruz, A. G., Ajlouni, S., & Ranadheera, C. S. (2020). Apple pomace as a functional and healthy ingredient in food products: A review. *Processes*, 8(3), 319. <https://doi.org/10.3390/pr8030319>
- Mattheis, J.P., Rudell, D.R., & Hanrahan, I. (2017). Impacts of 1-methylcyclopropene and controlled atmosphere established during conditioning on development of bitter pit in ‘Honeycrisp’ apples. *Hortscience*, 52(1), 132–137. <https://doi.org/10.21273/HoRTSCI11368-16>
- Mditshwa, A., Fawole, O.A., & Opara, U.L. (2018). Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples - A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 16, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.01.011>
- Meitha, K., Pramesti, Y., & Suhandono, S. (2020). Reactive oxygen species and antioxidants in postharvest vegetables and fruits. *International Journal of Food Science*, (1), 8817778. <https://doi.org/10.1155/2020/8817778>
- Muder, A., Garming, H., Dreisiebner-Lanz, S., Kerngast, K., Rosner, F., Kličková, K., Kurthy, G., Cimer, K., Bertazzoli, A., Altamura, V., De Ros, G., Zmarlicki, K., de Belém Costa Freitas, M., Duarte, A., Bravin, E., Kambor, J., Karamürsel, D., Pinar Öztürk, F., & Kaçal, E. (2022). Apple production and apple value chains in Europe. *European Journal of Horticultural Science*, 87(6), 1–22. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2022/059>
- Musacchi, S., & Serra, S. (2018). Apple fruit quality: Overview on pre-harvest factors. *Scientia Horticulturae*, 234, 409–430. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.057>

- Palmer, J. W. (2014). The future role of crop physiologists, a personal view. *Acta Horticulturae*, 1058, 209–220. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1058.24>
- Ouali, A., Boukerche, S., Trea, F., & Ouali, K. (2024). In vivo and in silico studies assessment of the effects of oral exposure to 1-methylcyclopropene on liver function in male albino rats. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 94(3), 597–606. <https://doi.org/10.1007/s40011-024-01562-y>
- Pesis, E., Ebeler, S. E., de Freitas, S. T., Padda, M., & Mitcham, E. J. (2010). Short anaerobiosis period prior to cold storage alleviates bitter pit and superficial scald in Granny Smith apples. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(12), 2114–2123. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4060>
- Prange, R., Wright, A., DeLong, J., & Zanella, A. (2013). A review on the successful adoption of dynamic controlled-atmosphere (DCA) storage as a replacement for diphenylamine (DPA), the chemical used for control of superficial scald in apples and pears. *Acta Horticulturae*, 1071, 389–396. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1071.50>
- Rozman, Č., Hühner, M., Kolenko, M., Tojnko, S., Unuk, T., & Pažek, K. (2015). Apple variety assessment with analytical hierarchy process. *Erwerbs-Obstbau*, 57, 97–104. <https://doi.org/10.1007/s10341-015-0236-8>
- Rupasinghe, H. P. V., Murr, D. P., Paliyath, G., & DeEll, J. R. (2000). Suppression of alpha-farnesene synthesis in ‘delicious’ apples by Aminoethoxyvinylglycine (AVG) and 1-Methylcyclopropene (1-MCP). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 6, 195–198. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3587-613>
- Salame, E. (2024). *Dissecting the effects of dynamic controlled atmosphere (DCA) and postharvest hypoxic stress on ‘Red delicious’ apple fruit physiology* [PhD Dissertation Thesis]. Scuola Superiore di Studi Universitari e Perfezionamento “S. Anna” di Pisa. <https://hdl.handle.net/20.500.14242/217133>
- Saure, M. C. (2014). Why calcium deficiency is not the cause of blossom-end rot in tomato and pepper fruit – a reappraisal. *Scientia Horticulturae*, 174, 151–154. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.05.020>
- Shi, M. (2021). *Physicochemical quality, instrumental and sensory evaluation of apples treated by post-harvest treatment technologies: Dynamic controlled atmosphere (DCA), controlled atmosphere (CA), and 1-methylcyclopropene (1MCP)* [Unpublished Master's dissertation]. Cornell University.
- Streif, J., Kitemann, D., Neuwald, D.A., McCormick, R., & Xuan, H. (2010). Pre- and post-harvest management of fruit quality, ripening and senescence. *Acta Horticulturae*, 877, 55–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.877.2>
- Thomas, G., & Adarsh, S. (2020). Versatility of calcium as a plant nutrient. *Advantages in Agronomy*, 9, 119–141. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819978-5.00004-7>
- Torres, E., Kalcsits, L., & Nieto, L. G. (2024). Is calcium deficiency the real cause of bitter pit? A review. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1383645. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1383645>
- Vasylieva, N., and James, H. (2021). Production and trade patterns in the world apple market. *Innovative Marketing*, 17, 16–25. [https://doi.org/10.21511/im.17\(1\).2021.02](https://doi.org/10.21511/im.17(1).2021.02)
- Watkins, C. B. (2008). Overview of 1-methylcyclopropene trials and uses for edible horticultural crops. *HortScience*, 43(1), 86–94. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.1.86>
- Watkins, C. B., Bramlage, W. J., Brookfield, P. L., Reid, S. J., Weis, S. A., & Alwan, T. F. (2000). Cultivar and growing region influence efficacy of warming treatments for amelioration of superficial scald development on apples after storage. *Postharvest Biology and Technology*, 19(1), 33–45. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(00\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(00)00071-5)
- Weber, A., Brackmann, A., Anese, R. D. O., Both, V., & Pavanello, E. P. (2011). ‘Royal Gala’ apple quality stored under ultralow oxygen concentration and low temperature conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 1597–1602. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001200003>
- Weber, A., Neuwald, D. A., Kitemann, D., Thewes, F. R., Both, V., & Brackmann, A. (2020). Influence of respiratory quotient dynamic controlled atmosphere (DCA-RQ) and ethanol application on softening of Braeburn apples. *Food Chemistry*, 303, 125346. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125346>

- Whitaker, B. D., Villalobos-Acuna, M., Mitcham, E. J., & Mattheis, J. P. (2009). Superficial scald susceptibility and α -farnesene metabolism in 'Bartlett' pears grown in California and Washington. *Postharvest Biology and Technology*, 53(1–2), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2009.04.002>
- Yang, X., Song, J., Du, L., Forney, C., Campbell-Palmer, L., Fillmore, S., Wismer, P., & Zhang, Z. (2016). Ethylene and 1-MCP regulate major volatile biosynthetic pathways in apple fruit. *Food Chemistry*, 194, 325–336. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.018>
- Zanella, A. (2003). Control of apple superficial scald and ripening - A comparison between 1-methylcyclopropene and diphenylamine postharvest treatments, initial low oxygen stress and ultra low oxygen storage. *Postharvest Biology and Technology*, 27(1), 69–78. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00187-4](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00187-4)
- Zanella, A., & Rossi, O. (2015). Post-harvest retention of apple fruit firmness by 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment or dynamic CA storage with chlorophyll fluorescence (DCA-CF). *European Journal of Horticultural Science*, 80(1), 11–17. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.1.2>
- Zanella, A., & Stürz, S. (2015). Optimizing postharvest life of horticultural products by means of dynamic CA: Fruit physiology controls atmosphere composition during storage. *Acta Horticulturae*, 1071, 59–68. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1071.4>

ОБ АВТОРАХ

Владимир Александрович Гудковский, главный научный сотрудник Федерального научного центра имени И. В. Мичурина (393764, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Мичурина, д. 30), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7465-7723>, Scopus ID: 9742950700, Researcher ID: AAU-5436-2020, SPIN-код: 2123-6926, gudkovskiy37@mail.ru

Людмила Владимировна Кожина, ведущий научный сотрудник Федерального научного центра имени И. В. Мичурина (393764, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Мичурина, д. 30), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2833-1965>, Scopus ID: 36659622600, Researcher ID: OYF-1104-2025, SPIN-код: 2481-1586, liudmila.kozhina@mail.ru

Юрий Борисович Назаров, старший научный сотрудник Федерального научного центра имени И. В. Мичурина (393764, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Мичурина, д. 30), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1259-0594>, Scopus ID: 36659390400, Researcher ID: OYF-0767-2025, SPIN-код: 3090-8818, nazarov.yuri-fnc.mich@mail.ru

Алёна Владимировна Сутормина, научный сотрудник Федерального научного центра имени И. В. Мичурина (393764, Российская Федерация, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Мичурина, д. 30), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4467-1434>, Scopus ID: 57223683572, Researcher ID: OYF-1061-2025, SPIN-код: 4605-2213, sutormina.alna@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir Aleksandrovich Gudkovsky, Chief Researcher, I.V. Michurin Federal Scientific Center (30 Michurin St., Michurinsk, Tambov Region, 393764, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7465-7723>, Scopus ID: 9742950700, Researcher ID: AAU-5436-2020, SPIN-код: 2123-6926, gudkovskiy37@mail.ru

Lyudmila Vladimirovna Kozhina, Leading Researcher, I.V. Michurin Federal Scientific Center (30 Michurin St., Michurinsk, Tambov Region, 393764, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2833-1965>, Scopus ID: 36659622600, Researcher ID: OYF-1104-2025, SPIN-код: 2481-1586, liudmila.kozhina@mail.ru

Yuri Borisovich Nazarov, Senior Researcher, I.V. Michurin Federal Scientific Center (30 Michurin St., Michurinsk, Tambov Region, 393764, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1259-0594>, Scopus ID: 36659390400, Researcher ID: OYF-0767-2025, SPIN-код: 3090-8818, nazarov.yuri-fnc.mich@mail.ru

Alena Vladimirovna Sutormina, Researcher, I.V. Michurin Federal Scientific Center (30 Michurin St., Michurinsk, Tambov Region, 393764, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4467-1434>, Scopus ID: 57223683572, Researcher ID: OYF-1061-2025, SPIN-код: 4605-2213, sutormina.alna@mail.ru