

Научная статья/Research Article

УДК 635.64

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-216-230

Юлия Николаевна Чернявская^{1✉}, Татьяна Викторовна Яковлева²,

Татьяна Викторовна Першакова³, Григорий Анатольевич Купин⁴

^{1,2,3,4}Краснодарский НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции – филиал СК ФНЦ садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодар, Россия

¹yulya19992011@mail.ru

²yakovleva_yu@mail.ru

³7999997@inbox.ru

⁴Griga_77@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЧИН ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ ПОТЕРЬ В ЦЕПОЧКАХ ПОСТАВОК ТОМАТОВ СВЕЖИХ

Цель исследования – определить взаимодействие причин продовольственных потерь томатов свежих различной окраски (коричневой и малиновой) с помощью интерпретационного структурного моделирования (ISM). Задачи: анализ научно-технической литературы с целью выявления причин продовольственных потерь томатов свежих, возникающих на всех этапах производственно-сбытовой цепочки; проведение двух независимых сессий интерпретационного структурного моделирования (ISM) – для томатов коричневой и малиновой окраски; сравнительный анализ построенных иерархий и классификационных матриц перекрестного влияния факторов (MICMAC-анализ). Объект исследования – одиннадцать причин продовольственных потерь томатов свежих, идентифицированных путем анализа научных источников. В результате проведенного исследования все выявленные причины продовольственных потерь были разделены на четыре класса: автономные, зависимые, связующие и независимые. Установлено, что для эффективного управления продовольственными потерями необходим дифференцированный подход. Для томатов коричневой окраски приоритетом является воздействие на ключевые причины «ошибки сортировки и калибровки», «закладка на хранение перезревших плодов», «отсутствие предварительного охлаждения» и «несоблюдение условий хранения», в то время как для малиновых – на причины «ошибки сортировки и калибровки» и «закладка на хранение перезревших плодов». При этом разработка целевых решений, таких как защитные покрытия, позволяет эффективно решать как автономные, так и критически важные проблемы («недостаточная защита от патогенов после уборки»), обеспечивая комплексную защиту продукции. Стратегические инвестиции в целевые технологии, такие как защитные пленкообразующие покрытия и оптимизация критических этапов (сортировка, охлаждение), позволяют опережающе воздействовать на выявленные «корневые» причины. Такой подход обеспечит максимальный эффект для сохранения качества продукции и повышения устойчивости всей производственно-сбытовой цепочки томатов свежих.

Ключевые слова: томаты, цепочка поставок, продовольственные потери, причины потерь, интерпретационное структурное моделирование, метод перекрестного влияния факторов, независимые причины

Для цитирования: Чернявская Ю.Н., Яковлева Т.В., Першакова Т.В., и др. Моделирование причин продовольственных потерь в цепочках поставок томатов свежих // Вестник КрасГАУ. 2026. № 4. С. 216–230. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-216-230.

Yulia Nikolaevna Chernyavskaya^{1✉}, Tatyana Viktorovna Yakovleva²,
Tatyana Viktorovna Pershakova³, Grigory Anatolyevich Kupin⁴

1,2,3,4 Krasnodar Research Institute of Storage and Processing of Agricultural Products – branch of the FSC for Horticulture, Viticulture, and Winemaking, Krasnodar, Russia

¹yulya19992011@mail.ru

²yakovleva_yy@mail.ru

³7999997@inbox.ru

⁴griga_77@mail.ru

MODELLING THE CAUSES OF FOOD LOSS IN FRESH TOMATO SUPPLY CHAINS

The aim of the study is to investigate the interactions between the causes of food losses of fresh tomatoes of different colors (brown and crimson) using interpretative structural modeling (ISM). Objectives: analysis of scientific and technical literature to identify the causes of food losses of fresh tomatoes occurring at all stages of the production and distribution chain; conducting two independent sessions of interpretative structural modeling (ISM) - for brown and crimson tomatoes; comparative analysis of the constructed hierarchies and classification matrices of the cross-influence of factors (MICMAC analysis). The object of the study were eleven causes of food losses of fresh tomatoes, identified through the analysis of scientific sources. As a result of the study, all identified causes of food losses were divided into four classes: autonomous, dependent, linking, and independent. It was established that a differentiated approach is necessary for effective food loss management. For brown tomatoes, the priority is to address the key causes of "sorting and calibration errors," "overripe fruit storage," "lack of pre-cooling," and "failure to comply with storage conditions." For raspberry tomatoes, the priority is to address the causes of "sorting and calibration errors" and "overripe fruit storage." The development of targeted solutions, such as protective coatings, allows for the effective resolution of both stand-alone and critical issues (such as "insufficient protection against pathogens after harvest"), ensuring comprehensive product protection. Strategic investments in targeted technologies, such as protective film-forming coatings and optimization of critical stages (sorting, cooling), enable proactive interventions against identified root causes. This approach will ensure maximum impact in maintaining product quality and increasing the sustainability of the entire fresh tomato production and value chain.

Keywords: tomatoes, supply chain, food loss, loss causes, interpretive structural modeling, cross-factor influence method, independent causes

For citation: Chernyavskaya YN, Yakovleva TV, Pershakova TV, et al. Modelling the causes of food loss in fresh tomato supply chains. *Bulletin of KSAU*. 2026;(4):216-230. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-4-216-230.

Введение. Особенности томатов свежих, имеющих нежную ткань плода, являются малотранспортабельность и непродолжительный период хранения. Производственно-сбытовая цепочка томатов свежих представляет собой последовательность взаимосвязанных этапов, через которые проходит продукция от производства до конечного потребителя. Эти этапы включают: производство (выращивание) томатов, сбор и сортировку томатов, упаковку и подготовку к транспортированию, транспортирование к месту хранения или реализации, хранение (при необходимости), реализацию потребителям. Каждый этап производственно-сбытовой цепочки имеет свои особенности и задачи, и эффективная работа цепочки в целом зависит от слаженной работы всех ее участников.

Томаты свежие могут портиться и, соответственно, утилизироваться на всех этапах производственно-сбытовой цепочки в то время, как они выращиваются, собираются, транспортируются, хранятся, охлаждаются, обрабатываются, упаковываются, образуя при этом продовольственные потери и пищевые отходы. Изучение взаимодействия между причинами продовольственных потерь на всех этапах производственно-сбытовой цепочки необходимо для выявления ключевых этапов, на которых потери наиболее значительны. Знание того, какие факторы оказывают наибольшее влияние, позволяет сконцентрировать усилия на разработке решений именно для этих проблем. Устранение ключевых причин может предотвратить не только потери на конкретном этапе, но и снизить

риск потерь на последующих этапах, что в целом поможет оптимизировать производственно-сбытовую цепочку, сделав ее более эффективной и устойчивой. Таким образом, изучение взаимосвязей между причинами продовольственных потерь и выявление ключевых факторов является необходимым шагом для разработки эффективных мер по их снижению, что позволяет создать более устойчивую и эффективную систему производства и распределения продовольствия.

Однако существующие исследования, как правило, не учитывают внутривидовые морфологические различия, такие как окраска плодов, которая, согласно данным литературы, напрямую влияет на устойчивость к повреждениям, скорость проявления дефектов и физиологические процессы. Это приводит к тому, что рекомендации носят общий характер и могут быть неэффективны для конкретных сортов.

Применение методологии интерпретационного структурного моделирования (ISM) для сравнительного анализа томатов различной окраски позволит не только глубже понять их взаимосвязи, но и расставить дифференцированные управленческие приоритеты, что является новым шагом в оптимизации цепочек поставок скоропортящейся продукции.

Цель исследования – изучение взаимодействия причин продовольственных потерь томатов свежих различной окраски (коричневой и малиновой) с помощью интерпретационного структурного моделирования.

Задачи: анализ научно-технической литературы с целью выявления причин продовольственных потерь томатов свежих, возникающих на всех этапах производственно-сбытовой цепочки; проведение двух независимых сессий интерпретационного структурного моделирования (ISM) для томатов коричневой и малиновой окраски; сравнительный анализ построенных иерархий и классификационных матриц перекрестного влияния факторов (MICMAC-анализ).

Объекты и методы. Для выявления причин продовольственных потерь в цепочке поставок томатов свежих был проведен анализ научно-технической литературы. Поиск проводили в библиографических базах Scopus, Web of Science, eLibrary.Ru (РИНЦ). В обзор были включены публикации за период с 2010 по 2025 г. По ис-

следуемой теме проанализировано 346 источников, после исключения обобщены данные из 1 источника на русском и 13 источников на английском языках. Это позволило выявить одиннадцать основных причин продовольственных потерь томатов свежих коричневой и малиновой окраски и подготовить их к моделированию по методологии ISM, предназначенной для построения иерархий системных переменных. Причем для влияния окраски плодов методология ISM была адаптирована. На основе анализа литературных данных и выявленных особенностей томатов различной окраски (табл. 1) были независимо друг от друга построены две структурные матрицы взаимодействия переменных (SSIM) – для томатов коричневой и малиновой окраски. Это позволило получить две отдельные иерархические модели для последующего сравнительного анализа.

Результаты и их обсуждение. На основе проведенного анализа отечественных и зарубежных источников были выявлены и систематизированы основные причины продовольственных потерь томатов свежих различной окраски, так как данный морфологический признак влияет на устойчивость томатов свежих к повреждениям (табл. 1).

Таким образом, было выявлено 11 основных причин, которые оказывают влияние на качество томатов свежих в период подготовки к хранению, хранения и реализации. Установлено, что томаты с малиновой окраской более устойчивы к повреждениям и быстрее проявляют видимые симптомы повреждений, тогда как сорта с коричневой окраской характеризуются скрытым характером повреждений и большей потерей влаги. Данные различия предопределили необходимость отдельного моделирования причинно-следственных связей.

На следующем этапе, используя алгоритм интерпретационного структурного моделирования (ISM), установили влияние выявленных причин продовольственных потерь друг на друга для двух групп окраски. Для этого использовали следующие обозначения:

- V – причина *i* влияет на причину *j*;
- A – причина *j* влияет на причину *i*;
- X – причины *i* и *j* взаимно влияют друг на друга;
- O – между причинами *i* и *j* нет связи.

Основные причины продовольственных потерь томатов свежих на этапах послеуборочной обработки, хранения и реализации и влияние окраски плодов
The main causes of food losses of fresh tomatoes at the stages of post-harvest processing, storage and sale and the effect of fruit coloring

Причины продовольственных потерь	Влияние окраски плодов на продовольственные потери		Источник литературы
	Коричневая	Малиновая	
1	2	3	4
Послеуборочная обработка			
Недостаточная защита от патогенов после уборки (дезинфекция, применение покрытий)	Высокая уязвимость к патогенам из-за более нежной кожицы; требуется усиленная защита	Более устойчивая кожица; стандартных мер защиты, как правило, достаточно	Abera G. et al. (2020); Desta B. et al. (2022); Rai A. et al. (2022); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).
Ошибки сортировки и калибровки (пропуск дефектных плодов)	Сложно выявить скрытые дефекты/начало гнили	Дефекты/начало гнили очень заметны	Abera G. et al. (2020); Asrat F. et al. (2019); Saeed A.F. et al. (2010); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).
Закладка на хранение перезревших плодов	—	—	Abera G. et al. (2020); Asrat F. et al. (2019); Boiteau J.M. et al. (2022); Kader A.A.; Macheka L. et al. (2018); Saeed A.F. et al. (2010); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020).
Отсутствие предварительного охлаждения перед закладкой на хранение	Высокая чувствительность к тепловому стрессу	Устойчивость к тепловому стрессу	Abera G. et al. (2020); Boiteau J.M. et al. (2022); Saeed A.F. et al. (2010); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).
Хранение			
Несоблюдение условий хранения (температура, влажность, вентиляция, газовая среда)	Быстрая потеря влаги, чувствительность к перепадам	Устойчивость к колебаниям условий хранения	Abera G. et al. (2020); Al-Dairi M. et al. (2021); Asrat F. et al. (2019); Rai A. et al. (2022); Saeed A.F. et al. (2010); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).
Развитие микробиологической порчи (гнили)	Начало гнили малозаметно	Гниль заметна раньше, высокая устойчивость к гнили	Abera G. et al. (2020); McKenzie T.J. et al. (2017); Saeed A.F. et al. (2010); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Ускоренные физиологические процессы (дыхание, выделение этилена, созревание)	Активное дыхание/ выделение этилена → риск быстрого созревания и порчи	Процессы умеренные	Abera G. et al. (2020); Asrat F. et al. (2019); Boiteau J.M. et al. (2022); Desta B. et al. (2022); Kader A.A.; McKenzie T.J. et al. (2017); Tiwari I. et al. (2020).
Потеря влаги (усушка, сморщивание)	Высокая склонность к усушке (потеря влаги)	Хорошее удержание влаги	Macheke L. et al. (2018); Rai A. et al. (2022); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).
Механические повреждения при складировании/перекладке	Повреждения малозаметны	Повреждения заметнее	Abera G. et al. (2020); Boiteau J.M. et al. (2022); McKenzie T.J. et al. (2017); Zewdie T. et al. (2021).
Реализация			
Потеря товарного вида (усушка, сморщивание, появление гнили)	Дефекты больше остаются незаметными	Дефекты проявляются раньше	Abera G. et al. (2020); Rai A. et al. (2022); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021); Гудковский и др. (2011).
Воздействие этилена и перекрестное микробное заражение (контаминация) при хранении и реализации	Чувствительнее к этилену	Устойчивее к этилену	Asrat F. et al. (2019); Boiteau J.M. et al. (2022); Desta B. et al. (2022); Tadesse E.E. et al. (2021); Tiwari I. et al. (2020); Zewdie T. et al. (2021).

Результаты представлены в виде двух матриц структурного взаимодействия переменных (SSIM) (табл. 2, 3).

Затем данные из каждой ячейки SSIM конвертировали в бинарные значения 0 и 1 в соответствии с таблицей 4.

В таблицах 5, 6 приведены исходные матрицы достижимости (IRM), а в таблицах 7, 8 – итоговые матрицы достижимости, которые учитывают все (прямые и косвенные) отношения между причинами.

Анализ итоговых матриц достижимости (FRM) для двух окрасок томатов показал, что причины продовольственных потерь формируют различные иерархические структуры с выраженными причинно-следственными связями.

Томаты коричневой окраски чувствительны к тепловому стрессу и патогенам, а малозаметность повреждений приводит к тому, что эти первичные ошибки имеют критический характер, так как их последствия поздно обнаруживаются. Вследствие этого, для томатов коричневой окраски наибольшим потенциалом влияния обладают: «недостаточная защита от патогенов» (1) –

потенциал 10; «отсутствие предварительного охлаждения» (4) – потенциал 9.

Для томатов малиновой окраски наибольшим потенциалом влияния обладают: «ошибки сортировки и калибровки» (2) – потенциал 10; «закладка на хранение перезревших плодов» (3) – потенциал 9. Устойчивость томатов малиновой окраски к условиям хранения снижает вес причин (4) и (5). Однако раннее и четкое проявление дефектов означает, что ошибка на этапе сортировки (2) немедленно ведет к потере товарного вида (10), а закладка на хранение перезревших плодов (3) быстро запускает цепь физиологической порчи, которую легко заметить.

На основе анализа итоговых матриц достижимости (FRM) для томатов коричневой и малиновой окраски была построена сравнительная иерархия причин продовольственных потерь. Иерархия строилась с использованием метода интерпретационного структурного моделирования (ISM), который позволяет выявить уровни влияния причин в причинно-следственной цепи (табл. 9).

Структурная матрица взаимодействия переменных (SSIM) для томатов коричневой окраски
Structural Self-Interaction Matrix (SSIM) for brown tomatoes

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Пояснение (направление влияния i → j)
1	–	O	O	O	O	V	O	O	O	O	O	Недостаточная защита от патогенов (1) напрямую ведет к развитию гнили (6).
2	A	–	V	O	O	V	O	O	V	O	O	Ошибки сортировки (2) → закладка на хранение перезревших плодов (3), развитие гнили (6), механические повреждения (9).
3	O	A	–	O	V	V	V	O	O	O	V	Закладка на хранение перезревших плодов (3) → развитие гнили (6), ускоренные физиологические процессы (7), воздействие этилена (11).
4	O	O	O	–	V	O	V	V	O	O	O	Отсутствие охлаждения (4) → несоблюдение условий хранения (5), ускоренные физиологические процессы (7), усушка (8).
5	O	O	O	A	–	V	V	V	O	O	V	Несоблюдение условий хранения (5) → развитие гнили (6), ускоренные физиологические процессы (7), усушка (8), усиленное выделение этилена (11).
6	O	O	A	O	A	–	O	O	O	V	O	Развитие гнили (6) ↔ следствие ошибок сортировки (2), закладки на хранение перезревших плодов (3), нарушения условий хранения (5); ведет к потере товарного вида (10).
7	O	O	A	A	A	O	–	O	O	O	V	Ускоренные физиологические процессы (7) → усушка (8), воздействие этилена (11); являются следствием закладки на хранение перезревших плодов (3), отсутствия предварительного охлаждения (4), несоблюдения условий хранения (5).
8	O	O	O	A	A	O	O	–	A	V	O	Потеря влаги (8) → потеря товарного вида (10); также связана с механическими повреждениями (9).
9	O	A	O	O	O	V	O	A	–	V	O	Механические повреждения (9) → развитие гнили (6), усушка (8), потеря товарного вида (10).
10	O	A	O	O	O	A	O	A	A	–	O	Потеря товарного вида (10) → итоговое проявление множества факторов (2, 6, 8, 9).
11	O	O	A	O	O	O	A	O	O	O	–	Воздействие этилена (11) ↔ ускоряет созревание/порчу (7), само усиливается при созревании (3, 5, 7).

Уровни модели, представленной в таблице 9, наглядно демонстрируют, как различные причины влияют на формирование продовольственных потерь, выстраиваясь в четкую причинно-следственную цепь.

На первом уровне (I) находятся зависимые причины, которые являются результатом воздействия других причин. В обеих моделях это причина (10) «потеря товарного вида», так как это итоговое проявление всех проблем, ведущее к прямым потерям.

На втором уровне (II) расположены причины, непосредственно приводящие к потере товарного вида: причина (6) «развитие гнили» и причина (8) «потеря влаги». Они напрямую ухудшают внешний вид и сохранность плодов, приводя к быстрой порче.

На третьем уровне (III) находятся причины, которые вызывают проблемы уровня II или усугубляют их:

причина (7) «ускоренные физиологические процессы» (дыхание, созревание, выделение этилена) и причина (9) «механические повреждения».

На последующих уровнях (IV–VI) формируются причины, которые являются ключевыми факторами функционирования системы. Здесь наблюдаются основные различия:

– для томатов коричневой окраски цепочка длиннее, а фундаментальными (уровень VI) являются факторы, связанные с их физиологической уязвимостью (1 и 4);

– для томатов малиновой окраски цепочка несколько короче, а ключевой фундаментальной причиной (Уровень VI) является «ошибки сортировки» (2), что подчеркивает важность контроля качества на входе для устойчивых, но рано проявляющих дефекты сортов.

Таблица 3

Структурная матрица взаимодействия переменных (SSIM) для томатов малиновой окраски
Structural Self-Interaction Matrix (SSIM) for raspberry tomatoes

<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Пояснение (направление влияния $i \rightarrow j$)
1	–	O	O	O	O	V	O	O	O	O	O	Недостаточная защита от патогенов (1) напрямую ведет к развитию гнили (6)
2	A	–	V	O	O	V	O	O	V	V	O	Ошибки сортировки (2) → закладка на хранение перезревших плодов (3), развитие гнили (6), механические повреждения (9), потеря товарного вида (10)
3	O	A	–	O	V	V	V	O	O	O	V	Закладка на хранение перезревших плодов (3) → развитие гнили (6), ускоренные физиологические процессы (7), воздействие этилена (11)
4	O	O	O	–	V	O	V	V	O	O	O	Отсутствие охлаждения (4) → несоблюдение условий хранения (5), ускоренные физиологические процессы (7), усушка (8)
5	O	O	O	A	–	V	V	O	O	O	V	Несоблюдение условий хранения (5) → развитие гнили (6), ускоренные физиологические процессы (7), усиленное выделение этилена (11)
6	O	O	A	O	A	–	O	O	O	V	O	Развитие гнили (6) ↔ следствие ошибок сортировки (2), закладки на хранение перезревших плодов (3), несоблюдения условий хранения (5); ведет к потере товарного вида (10)
7	O	O	A	A	A	O	–	O	O	O	V	Ускоренные физиологические процессы (7) → усушка (8), воздействие этилена (11); являются следствием закладки на хранение перезревших плодов (3), отсутствия предварительного охлаждения (4), несоблюдения условий хранения (5)
8	O	O	O	A	A	O	O	–	A	V	O	Потеря влаги (8) → потеря товарного вида (10); также связана с механическими повреждениями (9)
9	O	A	O	O	O	O	O	A	–	V	O	Механические повреждения (9) → усушка (8), потеря товарного вида (10)
10	O	A	O	O	O	A	O	A	A	–	O	Потеря товарного вида (10) → итоговое проявление множества факторов (2, 6, 8, 9)
11	O	O	A	O	O	O	A	O	O	O	–	Воздействие этилена (11) ↔ ускоряет созревание/порчу (7), само усиливается при созревании (3, 5, 7)

Таблица 4

Правила конвертации ячеек SSIM в бинарные переменные
Rules for converting SSIM cell to binary variables

Значение ячейки (<i>i,j</i>) в SSIM*	Значение ячейки (<i>i,j</i>) в IRM	Значение ячейки (<i>j,i</i>) в IRM
V	1	0
A	0	1
X	1	1
O	0	0

Таблица 5

Исходная матрица достижимости (IRM) для томатов коричневой окраски
The Initial Reachability Matrix (IRM) for brown tomatoes

<i>i/j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
3	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
4	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 6

Исходная матрица достижимости (IRM) для томатов малиновой окраски
The Initial Reachability Matrix (IRM) for raspberry tomatoes

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0
3	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
4	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 7

Итоговая матрица достижимости (FRM) для томатов коричневой окраски
Final Reachability Matrix (FRM) for brown tomatoes

Причины i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Потенциал влияния
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3
2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	9
3	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	7
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	7
5	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	6
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
9	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	4
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Степень зависимости	1	1	2	1	4	7	5	6	2	9	6	

Таблица 8

Итоговая матрица достижимости (FRM) для томатов малиновой окраски
Final Reachability Matrix (FRM) for raspberry tomatoes

Причины i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Потенциал влияния
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	3
2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	9
3	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	6
4	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	7
5	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	5
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	2
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
9	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Степень зависимости	1	1	2	1	4	6	5	4	2	9	5	

Таблица 9

Итоговая иерархия причин
The final hierarchy of causes

Уровень	Окраска томатов		Характеристика
	Коричневая	Малиновая	
1	2	3	4
I	10	10	Конечный результат. Причина с максимальной степенью зависимости, являющаяся итоговым проявлением всех негативных процессов – «потеря товарного вида» (10)
II	6, 8	6, 8	Прямые дефекты. Причины, которые непосредственно делают продукцию неликвидной и ведут к потере товарного вида: «развитие гнили» (6) и «потеря влаги» (8)
III	7, 9	7, 9	Иницирующие факторы порчи. Ключевые процессы и повреждения, которые запускают или усугубляют прямые дефекты: ускоренные физиологические процессы (7) и механические повреждения (9)
IV	3, 5, 11	5, 11	Факторы условий хранения. Ошибки на этапе закладки на хранение (3), несоблюдение условий хранения (5) и воздействие этилена (11), которые создают благоприятную среду для развития порчи. Для коричневых томатов критически важны все три фактора, для малиновых – только условия хранения и этилен, так как закладка на хранение перезревших плодов (3) является более фундаментальной проблемой (Уровень V)
V	2	3	Ошибки управления. Для коричневых томатов – это ошибки сортировки (2), позволяющие дефектным плодам с малозаметными повреждениями попасть в партию. Для малиновых томатов – это закладка на хранение перезревших плодов (3), что быстро запускает цепную реакцию порчи

1	2	3	4
VI	1, 4	2, 4	Коренные (системные) причины. Фундаментальные факторы, задающие общий уровень риска. Для коричневых томатов – это недостаточная защита от патогенов (1) и отсутствие предварительного охлаждения (4), что обусловлено их высокой физиологической уязвимостью. Для малиновых томатов – это ошибки сортировки (2), так как их устойчивость смещает фокус на человеческий фактор, и отсутствие предварительного охлаждения (4)

Таким образом, модель показывает, что наиболее эффективное управление потерями достигается путем воздействия на базовые и промежуточные причины (уровни IV–VI). Стратегические инвестиции в мероприятия на этапах послеуборочной обработки и закладки на хранение позволят разорвать причинно-следственные связи и кардинально сократить количество продовольственных потерь.

Для выявления степени важности причин продовольственных потерь был применен метод MICMAC (метод перекрестного влияния факторов): степень зависимости показывает, насколько причина зависит от других причин, а потенциал влияния – насколько сильно данная причина влияет на другие причины (табл. 10).

Таблица 10

Факторы влияния и зависимости
Factors of influence and dependence

Номер	Переменная	Томаты коричневой окраски		Томаты малиновой окраски	
		Потенциал влияния	Степень зависимости	Потенциал влияния	Степень зависимости
1	Недостаточная защита от патогенов после уборки (дезинфекция, применение покрытий)	3	1	3	1
2	Ошибки сортировки и калибровки (пропуск дефектных плодов)	9	1	9	1
3	Закладка на хранение перезревших плодов	7	2	6	2
4	Отсутствие предварительного охлаждения перед закладкой на хранение	7	1	7	1
5	Несоблюдение условий хранения (температура, влажность, вентиляция, газовая среда)	6	4	5	4
6	Развитие микробиологической порчи (гниль)	2	7	2	6
7	Ускоренные физиологические процессы (дыхание, выделение этилена, созревание)	2	5	2	5
8	Потеря влаги (усушка, сморщивание)	2	6	2	4
9	Механические повреждения при складировании/перекладке	4	2	3	2
10	Потеря товарного вида (усушка, сморщивание, появление гнили)	1	9	1	9
11	Воздействие этилена и перекрестное инфицирование при хранении/реализации	1	6	1	5

На основе полученных данных, причины были разделены на четыре группы (рис. 1, 2).

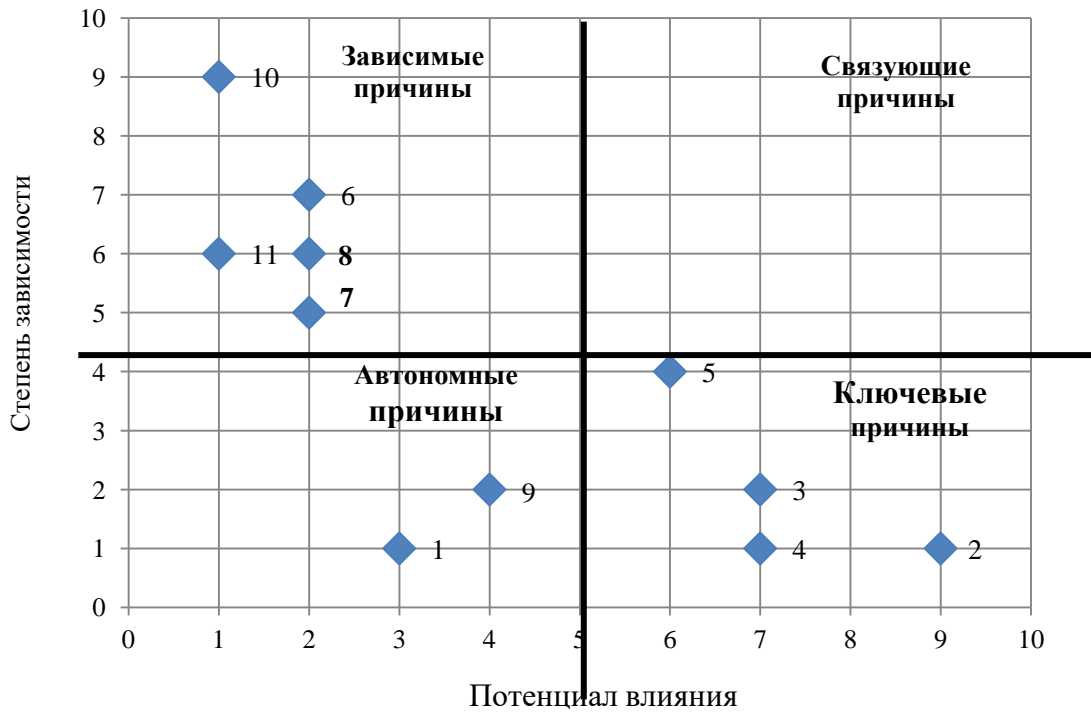


Рис. 1. Диаграмма «влияние – зависимость» (MICMAC) для томатов коричневой окраски
Influence – dependence Diagram (MICMAC) for brown tomatoes

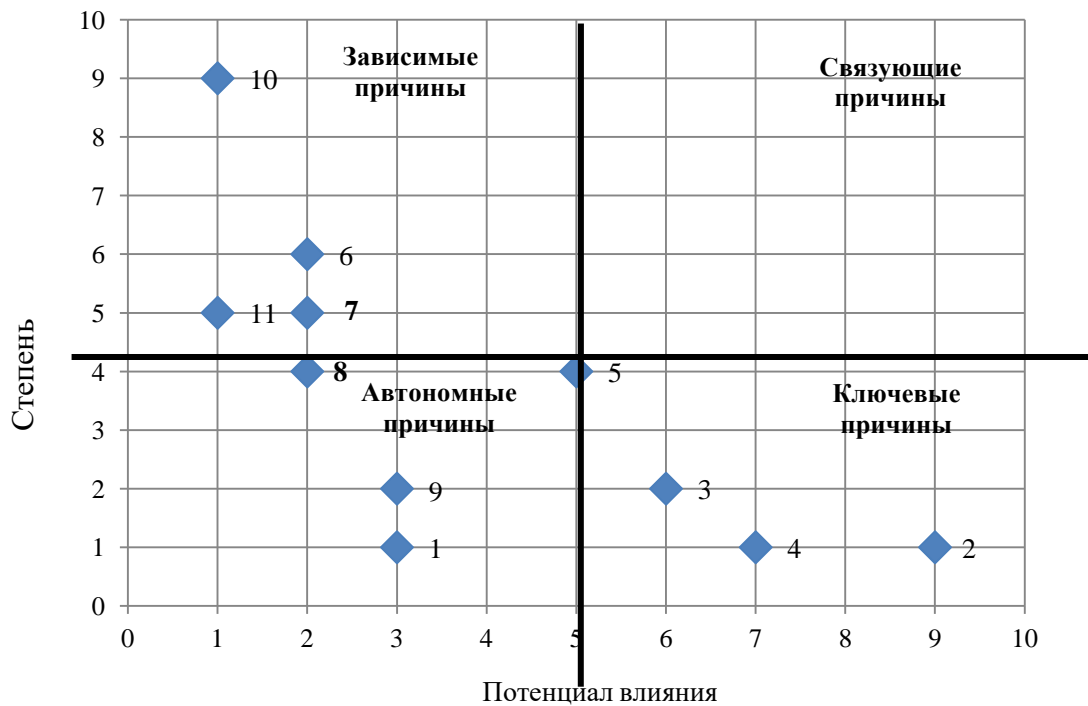


Рис. 2. Диаграмма «влияние – зависимость» (MICMAC) для томатов малиновой окраски
Influence – dependence Diagram (MICMAC) for raspberry tomatoes

Кластеризация причин на диаграмме «влияние – зависимость» (MCMAC) позволила выявить принципиально разные группы факторов, определяющих динамику продовольственных потерь, и подтвердила необходимость дифференцированного подхода к управлению для томатов свежих различной окраски.

Автономные причины. Данную группу с низкими показателями как влияния, так и зависимости составляют факторы, слабо связанные с общей системой. Для томатов коричневой окраски к ним относятся «недостаточная защита от патогенов после уборки» (1) и «механические повреждения при складировании/перекладке» (9), а для малиновых – причины (1), (8) и (9). Причина (7) «ускоренные физиологические процессы» для коричневых томатов и причины (7), (11) для малиновых находятся на стыке автономных и зависимых групп. Эти факторы, как правило, являются следствием внешних обстоятельств и требуют точечных корректирующих мер, но не требуют стратегических решений.

Ключевые причины. В эту группу с высоким потенциалом влияния и низкой степенью зависимости входят факторы, являющиеся иницирующими факторами проблем в цепочке. Именно здесь управленческие воздействия дают максимальный эффект.

Для томатов коричневой окраски ключевыми являются причины (2), (3), (4) и (5): «ошибки сортировки и калибровки», «закладка на хранение перезревших плодов», «отсутствие предварительного охлаждения» и «несоблюдение условий хранения». Это обусловлено высокой физиологической уязвимостью данной группы: ошибки на этих этапах слабо зависят от других факторов и запускают цепочку необратимых негативных последствий.

Для томатов малиновой окраски в группу ключевых входят причины (2), (3) и (4). Устойчивость малиновых томатов к абиотическим стрессам смещает фокус на этапы, связанные с человеческим фактором: «ошибки сортировки» и «закладка на хранение перезревших плодов» становятся фундаментальными ошибками, так как дефекты у этих томатов быстро проявляются и напрямую ведут к потере товарного вида. Причина (5) «несоблюдение условий хранения» для малиновых томатов находится на стыке ключевых и автономных, что указывает на ее меньшую критичность по сравнению с коричневыми томатами.

Зависимые причины. В эту группу с низким потенциалом влияния и высокой степенью зависимости вошли факторы, являющиеся итоговыми результатами воздействия других причин: «развитие микробиологической порчи» (6), «потеря влаги» (8) и, как итог, «потеря товарного вида» (10). Для коричневых томатов в эту группу также входит причина (11) «воздействие этилена». Эти причины представляют собой физическое проявление порчи, которое становится заметным на конечных этапах цепи. Управление ими неэффективно, так как они являются симптомами более глубоких проблем, коренящихся в ключевых причинах.

Перспективное технологическое решение. Наиболее эффективная стратегия снижения потерь должна быть нацелена на выявленные ключевые причины. Однако MCMAC-анализ выявил важную особенность: причина (1) «недостаточная защита от патогенов после уборки» является автономной. Это означает, что она, с одной стороны, слабо зависит от других факторов системы, а с другой – обладает невысоким потенциалом влияния на остальные причины. Данная характеристика не снижает ее важности, а, напротив, указывает на ее специфику: эта проблема может быть успешно решена целенаправленным, точечным вмешательством, без необходимости перестраивать всю цепочку. Именно таким высокоэффективным и целенаправленным решением является применение съедобных пленкообразующих покрытий. В отличие от сложных системных мер, требующих перестройки логистических цепочек и модернизации складской инфраструктуры, нанесение покрытия представляет собой единовременную операцию на этапе послеуборочной обработки, которая при этом одновременно решает несколько стратегических задач:

1) Прямое и эффективное воздействие на автономную причину (1). Покрытие создает на поверхности плода физико-химический барьер, предотвращающий проникновение и развитие возбудителей гнили. Это решение, которое действует независимо от других факторов, что соответствует автономному статусу данной причины. Таким образом, покрытие не «борется с системой», а точно нивелирует ключевой риск, связанный с микробиологической порчей.

2) Стратегическое воздействие на ключевые причины (4) и (5) («отсутствие предварительного охлаждения» и «несоблюдение условий хра-

нения»). Ингибируя дыхание и тепловыделение плодов, покрытие смягчает последствия теплового стресса и формирует на поверхности каждого плода индивидуальную модифицированную газовую среду (МГС). Это повышает устойчивость продукции к неизбежным нарушениям температурного режима в цепочке поставок, компенсируя макрофлуктуации в камере хранения. Здесь покрытие выполняет защитно-стабилизирующую функцию, снижая риски, связанные с отклонениями от заданных режимов хранения.

3) Профилактическое воздействие на зависимые причины. Подавляя развитие патогенов и замедляя физиологические процессы, покрытие опережающе блокирует цепную реакцию, ведущую к проявлению видимых дефектов – «развитию микробиологической порчи» (6), «ускоренному созреванию» (7) и, как итог, «потере товарного вида» (10).

Таким образом, применение пленкообразующего покрытия является универсальным инструментом, который:

- для автономной причины 1 служит прямым и высокоэффективным решением;
- для ключевых причин выполняет роль компенсирующего и стабилизирующего фактора;
- для зависимых причин действует как превентивная мера, разрывающая причинно-следственные связи на ранней стадии.

Такой комплексный и многоуровневый характер воздействия делает данную технологию исключительно перспективной для интеграции в производственно-сбытовые цепочки томатов свежих.

Заключение. Проведенное исследование с применением методологии интерпретационного структурного моделирования (ISM) и MICMAC-анализа позволило не только систематизиро-

вать взаимосвязи между причинами продовольственных потерь томатов свежих, но и впервые количественно оценить различия в структуре этих связей для плодов различной окраски.

Было установлено, что для томатов коричневой окраски, характеризующихся высокой уязвимостью, управленческие приоритеты должны быть сосредоточены на компенсации их физиологических особенностей через строгий контроль за сортировкой, степенью зрелости, обязательным предварительным охлаждением и соблюдением условий хранения (причины 2–5). В то же время для томатов малиновой окраски, обладающих большей устойчивостью к условиям хранения, ключевыми факторами риска становятся ошибки на этапах сортировки и закладки на хранение перезревших плодов (причины 2–4), так как их дефекты, будучи легко заметными, напрямую и быстро ведут к потере товарного вида.

Для эффективного управления продовольственными потерями необходим дифференцированный подход. Для томатов коричневой окраски приоритетом является воздействие на ключевые причины (2–5), в то время как для малиновых – на причины (2–4). При этом разработка целевых решений, таких как защитные покрытия, позволяет эффективно решать и автономные, но критически важные проблемы (причина 1), обеспечивая комплексную защиту продукции. Стратегические инвестиции в целевые технологии, такие как защитные пленкообразующие покрытия, и в оптимизацию критических этапов (сортировка, охлаждение) позволяют опережающе воздействовать на выявленные «корневые» причины. Такой подход обеспечит максимальный эффект для сохранения качества продукции и повышения устойчивости всей производственно-сбытовой цепочки томатов свежих.

Список источников

1. Abera G., Ibrahim A.M., Forsido S.F., et al. Assessment on post-harvest losses of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in selected districts of East Shewa Zone of Ethiopia using a commodity system analysis methodology // *Heliyon*. 2020. Vol. 6, N 4. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03749. EDN: KAUTRV.
2. Desta B., Tena N., Amare G. Preharvest Factors that Influence the Quality of Tomato // *Asian Journal of Research and Review in Agriculture*. 2022. Vol. 4, N 1. P. 6–12.
3. Rai A., Kumari Kh., Vashistha P. Umbrella review on chilling injuries: Post-harvest issue, cause, and treatment in tomato // *Scientia Horticulturae*. 2022. Vol. 293. Art. 110710. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110710. EDN: VFUXIV.

4. Tadesse E.E., Assaye H., Delele M.A., et al. Quantitative Postharvest Loss Assessment of Tomato Along the Postharvest Supply Chain in Northwestern Ethiopia. In: 8th EAI International Conference "Advances of Science and Technology: ICAST 2020", 2–4 Oct 2020. Bahir Dar, Ethiopia, 2020. P. 110–122.
5. Tiwari I., Shah K.K., Tripathi S., et al. Post-harvest practices and loss assessment in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Kathmandu, Nepal // Journal of Agriculture and Natural Resources. 2020. Vol. 3, N 2. P. 335–352. DOI: 10.3126/janr.v3i2.32545. EDN: TQVGFS.
6. Zewdie T., Desaiagn A., Olijira G., et al. Review on effects of pre and post-harvest factors affecting the quality and shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) // South Asian Journal of Agricultural Sciences. 2021. Vol. 1, N 1. P. 51–56.
7. Asrat F., Ayalew A., Degu A. Postharvest Loss Assessment of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Fogera, Ethiopia // Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology (TUR-JAF). 2019. Vol. 7, N 8. P. 1146–1155. DOI: 10.24925/turjaf.v7i8.1146-1155.2460.
8. Saeed A.F., Khan S.N. Post harvest losses of tomato in markets of district Lahore // Mycopath. 2010. Vol. 8, N 2. P. 97–99.
9. Boiteau J.M., Pingali P. Food loss of perishable produce from farm to retail: evidence from tomato supply chains in South India // The American Journal of Clinical Nutrition. 2022. Vol. 115, N 6. P. 1535–1548. DOI: 10.1093/ajcn/nqac039. EDN: BHNTCZ.
10. Kader A.A. Effects of postharvest handling procedures on tomato quality // ISHS Acta Horticulturae 190: Symposium on Tomato Production on Arid Land. P. 209–222. DOI: 10.17660/ActaHortic.1986.190.21.
11. Macheke L., Speltc E.J.H., Bakkerb E.J., et al. Identification of determinants of postharvest losses in Zimbabwean tomato supply chains as basis for dedicated interventions // Food Control. 2017. Vol. 87. P. 135–144. DOI: 10.1016/j.foodcont.2017.12.017.
12. Al-Dairi M., Pathare P.B., Al-Yahyai R. Chemical and nutritional quality changes of tomato during postharvest transportation and storage // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2021. Vol. 20, N 6. P. 401–408. DOI: 10.1016/j.jssas.2021.05.001. EDN: BLQZOB.
13. McKenzie T.J., Singh-Peterson L., Un-derhill S.J.R. Quantifying Postharvest Loss and the Implication of Market-Based Decisions: A Case Study of Two Commercial Domestic Tomato Supply Chains in Queensland, Australia // Horticulturae. 2017. Vol. 3, N 3. P. 44.
14. Гудковский В.А., Акишин Д.В., Невзорова А.В. Оценка агротехнических и технологических приемов повышения лежкоспособности плодов томата // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2011. № 2-2. С. 51–55. EDN: PCGFFB.

References

1. Abera G, Ibrahim AM, Forsido SF, et al. Assessment on post-harvest losses of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in selected districts of East Shewa Zone of Ethiopia using a commodity system analysis methodology. *Heliyon*. 2020;6(4):1-13. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03749.
2. Desta B, Tena N, Amare G. Preharvest Factors that Influence the Quality of Tomato. *Asian Journal of Research and Review in Agriculture*. 2022;4(1):6-12.
3. Rai A, Kumari Kh, Vashistha P. Umbrella review on chilling injuries: Post-harvest issue, cause, and treatment in tomato. *Scientia Horticulturae*. 2022;293:110710. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110710.
4. Tadesse EE, Assaye H, Delele MA, et al. Quantitative Postharvest Loss Assessment of Tomato Along the Postharvest Supply Chain in Northwestern Ethiopia. In: 8th EAI International Conference «Advances of Science and Technology: ICAST 2020», 2–4 Oct 2020. Bahir Dar, Ethiopia; 2020. P. 110–122. DOI: 10.1007/978-3-030-80621-7_8.
5. Tiwari I, Shah KK, Tripathi S, et al. Post-harvest practices and loss assessment in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Kathmandu, Nepal. *Journal of Agriculture and Natural Resources*. 2020;3(2):335-352. DOI: 10.3126/janr.v3i2.32545.
6. Zewdie T, Desaiagn A, Olijira G, et al. Review on effects of pre and post-harvest factors affecting the quality and shelf life of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *South Asian Journal of Agricultural Sciences*. 2021;1(1):51-56.

7. Asrat F, Ayalew A, Degu A. Postharvest Loss Assessment of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in Fogera, Ethiopia. *Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology (TUR-JAF)*. 2019;7(8):1146-1155. DOI: 10.24925/turjaf.v7i8.1146-1155.2460.
8. Saeed AF, Khan SN. Post harvest losses of tomato in markets of district Lahore. *Mycopath*. 2010;8(2):97-99.
9. Boiteau JM, Pingali P. Food loss of perishable produce from farm to retail: evidence from tomato supply chains in South India. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2022;115(6):1535-1548. DOI: 10.1093/ajcn/nqac039.
10. Kader AA. Effects of postharvest handling procedures on tomato quality. *ISHS Acta Horticulturae 190: Symposium on Tomato Production on Arid Land*. P. 209–222. DOI: 10.17660/ActaHortic.1986.190.21.
11. Macheke L, Speltc EJH, Bakkerb EJ, et al. Identification of determinants of postharvest losses in Zimbabwean tomato supply chains as basis for dedicated interventions. *Food Control*. 2019;87:135-144. DOI: 10.1016/j.foodcont.2017.12.017.
12. Al-Dairi M, Pathare PB, Al-Yahyai R. Chemical and nutritional quality changes of tomato during post-harvest transportation and storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2021;20(6):401-408. DOI: 10.1016/j.jssas.2021.05.001.
13. McKenzie TJ, Singh-Peterson L, Un-derhill SJR. Quantifying Postharvest Loss and the Implication of Market-Based Decisions: A Case Study of Two Commercial Domestic Tomato Supply Chains in Queensland, Australia. *Horticulturae*. 2017;3(3):44. DOI: 10.3390/horticulturae3030044.
14. Gudkovsky VA, Akishin DV, Nevzorova AV. Estimation of agricultural and technological methods of increasing tomato storage life. *The Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2011;(2-2):51-55. (In Russ.).

Статья принята к публикации 10.03.2026 / The article accepted for publication 10.03.2026

Сведения об авторах:

Юлия Николаевна Чернявская, младший научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья, аспирант

Татьяна Викторовна Яковлева, старший научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья, кандидат технических наук, доцент

Татьяна Викторовна Першакова, ведущий научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья, доктор технических наук, доцент

Григорий Анатольевич Купин, старший научный сотрудник отдела хранения и комплексной переработки сельскохозяйственного сырья, кандидат технических наук

Information about the authors:

Yulia Nikolaevna Chernyavskaya, Junior Researcher, Department of Storage and Complex Processing of Agricultural Raw Materials, Postgraduate Student

Tatyana Viktorovna Yakovleva, Senior Researcher, Department of Storage and Complex Processing of Agricultural Raw Materials, Candidate of Technical Sciences, Associate professor

Tatyana Viktorovna Pershakova, Leading Researcher, Department of Storage and Complex Processing of Agricultural Raw Materials, Doctor of Technical Sciences, Associate professor

Grigory Anatolyevich Kupin, Senior Researcher, Department of Storage and Complex Processing of Agricultural Raw Materials, Candidate of Technical Sciences

