

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

DOI 10.51885/1561-4212_2024_2_179
MPHTI 28.23.33

Ш.Ж. Сеилов¹, Д.С. Абильдинов¹, М.У. Байдельдинов¹, А.А. Нуржаубаев¹,
А.А. Конырханова¹, Б.Ш. Журсинбек², Е.Ш. Журсинбек²

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

E-mail: seilov1961@gmail.com

E-mail: abildinov_ds_1@enu.kz*

E-mail: baideldinov_mu@enu.kz

E-mail: nurzhaubayev.akniet@gmail.com

E-mail: erkeshank@mail.ru

²Казахская академия инфокоммуникаций, г. Астана, Казахстан

E-mail: zhursinbek99@gmail.com

E-mail: zhursinbek@gmail.com

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ХРАНЕНИЯ
ОВОЩЕЙ И ФРУКТОВ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ОБОНЯНИЯ

ЖАСАНДЫ ИІС СЕЗУ ЖҮЙЕСІН ҚОЛДАНУЫМЕН БАҚЫЛАНАТЫН ОРТАДА
КӨКӨНІСТЕР МЕН ЖЕМІСТЕРДІ САҚТАУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR STORING VEGETABLES AND FRUIT
IN A CONTROLLED ENVIRONMENT USING ARTIFICIAL OLFACTION SYSTEM

Аннотация. В данном исследовании рассматривается усовершенствование технологий хранения овощей и фруктов с помощью применения искусственного обоняния с целью улучшения практик хранения в Казахстане и за его пределами. Используя искусственный интеллект и электронный нос, наше исследование подчеркивает потенциал интеллектуальных систем хранения для значительного сокращения потерь и увеличения срока годности сельскохозяйственной продукции. Первоначальные эксперименты с прототипами электронных носов показали высокую точность в обнаружении стадий порчи картофеля, что указывает на перспективный путь интеграции в интеллектуальные системы хранения. В статье предлагается разработка компактных, интеллектуальных систем мониторинга, использующих искусственное обоняние для динамического контроля окружающей среды. Такие компактные решения для хранения особенно выгодны для малых ферм, требуя меньших инвестиций при одновременном повышении безопасности продукции, сокращении потерь и увеличении эффективности в цепочке холодного хранения. Внедрение централизованной сети интеллектуальных единиц хранения решает критическую нехватку современных систем хранения, поддерживает продовольственную безопасность и усиливает поддержку мелких фермеров за счет снижения инвестиционных и операционных расходов, а также облегчения географической доступности.

Ключевые слова: умное сельское хозяйство, холодильное хранение, искусственный интеллект, системы холодной цепи, хранилище с контролируемой атмосферой, электронный нос, газоаналитическая система.

Аңдатпа. Бұл зерттеу Қазақстанда және одан тыс жерлерде сақтау тәжірибелерінде серпіліс жасау мақсатында жасанды иіс сезу қолдануымен көкөніс пен жеміс сақтау технологияларын жетілдіруді зерттейді. Жасанды интеллект және электронды мұрындарды пайдалана отырып, біздің зерттеу ауыл шаруашылық өнімдерінің жарамдылық мерзімін едәуір ұзарту және шығындарды азайту үшін ақылды сақтау жүйелерінің әлеуетін көрсетеді. Электронды мұрын прототиптерімен жүргізілген алғашқы тәжірибелер картоптың бұзылу кезеңдерін анықтауда жовары дәлдік көрсетті, бұл ақылды сақтау жүйелеріне интеграциялаудың перспективті бағытын көрсетеді. Бұл мақалада жасанды иіс сезуді пайдалана отырып, динамикалық қоршаған орта бақылауын жүзеге асыратын компактты, ақылды бақылау жүйелерінің өзірленуі ұсынылады.

Мұндай компактты сақтау шешімдері шағын фермалар үшін ерекше тиімді, олар аз инвестиция талап етеді және өнім қауіпсіздігін арттыра отырып, шығындарды азайтады және суық сақтау тізбегіндегі тиімділікті жақсартады. Ақылды сақтау бірліктерінің орталықтандырылған желісін енгізу заманауи сақтау жүйелерінің айқын тапшылығын шешеді, азық-түлік қауіпсіздігін қолдайды және инвестициялық және операциялық шығындарды азайту арқылы, сондай-ақ географиялық қол жетімділікті жеңілдету арқылы шағын шаруашылықтарды қолдауға көмектеседі.

Түйін сөздер: ақылды ауыл шаруашылығы, салқындатқыш қойма, жасанды интеллект, суық тізбек жүйелері, басқарылатын атмосфера қоймасы, электронды мұрын, газ-аналитикалық жүйе.

Abstract. This study investigates the enhancement of vegetable and fruit storage technologies through the application of artificial olfaction, aimed at revolutionizing storage practices in Kazakhstan and beyond. By leveraging artificial intelligence and electronic noses, our research highlights the potential for smart storage systems to significantly mitigate losses and extend the shelf life of agricultural products. Initial experiments with electronic nose prototypes have shown high accuracy in detecting stages of potato spoilage, indicating a promising avenue for integration into intelligent storage systems. This paper proposes the development of compact, intelligent monitoring systems utilizing artificial olfaction for dynamic environmental control. Such compact storage solutions are particularly advantageous for small farms, requiring less investment while offering improved product safety, reduced losses, and enhanced efficiency in the cold storage chain. The implementation of a centralized network of smart storage units addresses the critical shortage of modern storage systems, supporting food security and empowering small-scale farmers by reducing investment and operational costs, and facilitating geographic accessibility.

Keywords: smart agriculture, cold storage, artificial intelligence, cold chain systems, controlled atmosphere storage, electronic nose, gas analysis system

Введение. В современном мире технологический прогресс стремительно преобразует практики ведения сельскохозяйственной деятельности и продовольственной промышленности, где внимание к инновациям становится одним из важнейших факторов обеспечения эффективного и устойчивого производства продуктов питания. Решения для сельского хозяйства на основе искусственного интеллекта (ИИ) на сегодняшний день находятся на ранней стадии, однако уже демонстрируют многообещающие результаты [1]. Благодаря передовым исследованиям в области ИИ, росту инвестиций в эту отрасль, экспоненциальному росту вычислительной мощности и повсеместному доступу облачных технологий, ИИ стал доступным технологическим решением для предприятий сельского хозяйства, способным многократно увеличить производительность труда, сократить влияние на окружающую среду и удовлетворить растущие потребности населения в продовольствии [2].

Актуальность данного направления исследований подтверждается динамикой роста количества научных публикаций по таким ключевым словам как «smart agriculture», «smart farming», «robotics in agriculture». Немаловажным фактором продовольственной безопасности является не только производство продовольствия, но и его как можно длительное хранение в межсезонье, когда продукция еще не созрела или не готова для употребления. Одним из таких приложений является использование смарт-хранилищ. Эти хранилища оборудованы системами контроля атмосферы и поддержания определенного температурно-влажностного режима. В современных условиях хранения пищевых продуктов применяются различные технологии, включая консервацию в модифицированной атмосфере, использование консервантов, покрытий и облучение, которые, однако, не способны в реальном времени адаптироваться к изменениям в окружающей среде или мониторить их.

В ответ на эту проблематику в научных кругах активно разрабатываются инновационные подходы, в том числе интеллектуальные системы управления холодильной цепью и датчики свежести, известные также как электронные носы [3]. Электронный нос заменяет обонятельную систему живых организмов. Аромат, формируемый различными летучими компонентами, является важным индикатором для оценки качества продукции и своевременного выявления признаков порчи [4]. В этом устройстве химические

отклики преобразуются в электрические сигналы с помощью матрицы газовых сенсоров. Полученные данные обрабатываются с использованием различных моделей машинного и глубокого обучения, что позволяет эффективно распознавать ароматы, анализировать различные параметры продуктов и условия окружающей среды для обеспечения контроля за свежестью продукции в реальном времени. Кроме того, современные исследования направлены на интеграцию интеллектуальных систем холодильных цепей с датчиками и системами реагирования, что позволяет регулировать условия хранения для продления срока службы продуктов [5].

Обширные исследования в области искусственного обоняния и интеллектуальных систем холодильной цепи продемонстрировали их значительный потенциал в пищевой промышленности. Благодаря развитию технологий Интернета вещей компоненты этих систем могут быть объединены в единую сеть для обмена данными и их анализа в режиме реального времени [6, 7]. Это позволяет оптимизировать параметры качества продуктов на всех этапах хранения и дистрибуции, своевременно реагировать на изменения окружающей среды и сокращать потери и расточительство на каждом этапе цепи поставок. В результате, такой подход способствует улучшению целостности и точности контроля в системах интеллектуального холодильного оборудования, обеспечивая высокий уровень качества и безопасности пищевых продуктов.

В контексте Республики Казахстан данный подход приобретает особую актуальность, учитывая значительную роль аграрного сектора в экономике страны и стремление правительства к повышению экспортного потенциала в области агропромышленного комплекса. Казахстан, обладая обширными сельскохозяйственными угодьями и благоприятными природными условиями для ведения сельского хозяйства, сталкивается с необходимостью внедрения передовых технологий для улучшения качества и увеличения объемов производства продовольствия [8, 9]. Использование интеллектуальных систем холодильной цепи и электронного носа на основе ИИ может способствовать оптимизации процессов хранения и транспортировки агропродукции, снижению потерь после сбора урожая и увеличению конкурентоспособности казахстанских продовольственных товаров на мировом рынке. Целью настоящего исследования является разработка и внедрение компактной интеллектуальной системы хранения с контролируемой атмосферой. Эта система призвана повысить эффективность длительного хранения агропродукции в условиях Казахстана, используя современные достижения в области искусственного интеллекта и технологий электронного носа. Основная задача системы – сокращение потерь агропродукции после сбора урожая и предоставление мелким фермерам доступного и эффективного решения для хранения овощей и фруктов, минимизируя тем самым необходимость в крупных начальных инвестициях и снижая необходимость стрессовой продажи продукции в период уборки урожая.

В данной работе приведен анализ текущей ситуации с технологическим процессом выращивания и хранения плодоовощной продукции в Казахстане, представлен обзор международного опыта использования технологий на основе ИИ для мониторинга состояния плодоовощных продуктов. Авторы работы делают акцент на исследовании и применении технологии искусственного обоняния в контексте ее применения для хранения картофеля, который является одним из ключевых продуктов и имеет схожие с луком, свеклой и морковью условия хранения. Следовательно, прототип оборудования электронного носа, обученный на основе данных о картофеле, может быть удачно адаптирован для применения на других видах овощей в будущем. В статье описана предлагаемая газоаналитическая программно-аппаратная система мониторинга хранения овощей и фруктов, даны заключение с приведением основных итогов исследования и предложения для дальнейшей разработки.

Анализ традиционной модели технологических процессов выращивания и хранения плодоовощных продуктов. Фрукты и овощи относятся к одним из основных продуктов первой необходимости, и обеспечение населения Казахстана качественными плодоовощными продуктами является важной задачей агропромышленного комплекса страны. Из-за климатических особенностей центральноазиатского региона на казахстанском плодо-овощном рынке свежие овощи доступны лишь в течение 4–6 месяцев в году, а остальное время они поступают в основном из хранилищ или после переработки во вторичные продукты. Например, согласно FAO, в 2022 году по таким плодам, как картофель, морковь, лук и помидоры, валовое производство превышало потребление на душу населения, однако присутствовали импорт и сезонная нехватка [10]. Это могло быть связано с несколькими факторами, включая сезонность производства, недостаточную емкость или качество хранения, инфраструктурные и логистические проблемы. Высокие уровни потерь продукции после уборки урожая, характерные для развивающихся стран, часто связаны с недостатками в технологиях сбора, ошибками при сортировке, неэффективным хранением, традиционными способами вызревания, отсутствием или несоответствием перерабаты-вающих мощностей, неэффективной транспортировкой или доставкой, избыточным производством и разрозненностью логистических цепочек, недостатком холодильных систем и, собственно, самих хранилищ [11]. Состояние собранных фруктов и овощей определяется как условиями их выращивания, так и физиологическими и биохимическими процессами, происходящими после уборки. В работе [12] проводились исследования основных болезней картофеля, которые показали, что бактериальное поражение преобладает над грибковыми заболеваниями. Разновидности бактериальных и грибковых заболеваний зависит от региона выращивания, методов обработки и хранения картофеля. Представляет научный интерес проведение подобных экспериментов на территории нашей страны с целью выявления основных патогенов и способов быстрого их детектирования.

В 2023 году урожай картофеля в Республике Казахстан, согласно данным Бюро национальной статистики, составил 4,08 млн тонн. Общая страновая потребность в картофеле при потреблении на душу населения чуть более 100 кг составляет 2 млн тонн ежегодно. Согласно основным статистическим показателям, объемы производства основных сельскохозяйственных культур полностью покрывали внутренние потребности страны, однако 54,9 тыс. тонн картофеля году было импортировано [13]. В основном это происходит перед получением нового урожая в летнее время, что напрямую связано с отсутствием надлежащей системы хранения, когда определенная часть урожая сразу после сбора продается в соседние страны и запасы преждевременно истощаются [14]. Эта проблема характерна для большинства видов овощей, что подчеркивает необходимость улучшения инфраструктуры хранения для обеспечения продовольственной безопасности страны. По данным министерства сельского хозяйства, на сегодняшний день в Казахстане имеется 901 объект хранения овощей и фруктов мощностью 1,8 млн тонн при среднем общем объеме урожая плодоовощных культур 8 млн тонн ежегодно, где 60 % овощехранилищ не оборудованы холодильными установками, а срок эксплуатации 30 % хранилищ превышает 20 лет [15]. В таких хранилищах в основном используется навальный тип хранения, когда картофель хранится насыпной грудой или в лучшем случае упакован в мешки. (Рис. 1). Как следствие, общие потери при хранении достигают 35 - 40 % от объема готовой продукции [16]. Такая ситуация требует безотлагательного принятия решений по строительству и модернизации овощехранилищ, оборудованных установками для контроля атмосферы и температуры.



Рисунок 1. Традиционные технологии хранения овощей в Казахстане

Основные последствия нехватки необходимой инфраструктуры и овощехранилищ сказываются на средних и малых предприятиях, которые не имеют средств для строительства собственных систем хранения [17], [18]. Казахстанские сельхозпроизводители, в основном мелкие землевладельцы, сталкиваются с рядом проблем, включая ограниченный доступ к ресурсам, что влияет на объемы и качество продукции [10]. Для максимального сохранения собранного урожая производителям необходимо соблюдать цепочку поставки продукции с соблюдением технологических процедур хранения, включая предварительное охлаждение, длительное холодильное хранение, упаковку и транспортировку к дилерам (Рис. 2). Однако реальная ситуация показывает, что производители сельскохозяйственной продукции из-за нехватки холодильных систем вынуждены пропустить основные шаги и поспешно реализовать урожай сразу после сбора (красная стрелка) [19]. Это приводит к стрессовым продажам, увеличению потерь продукции, снижению прибыли и дохода фермера. Потери продовольствия имеют мультипликативный эффект на другие затраты, такие как вода, электричество, потери удобрений.

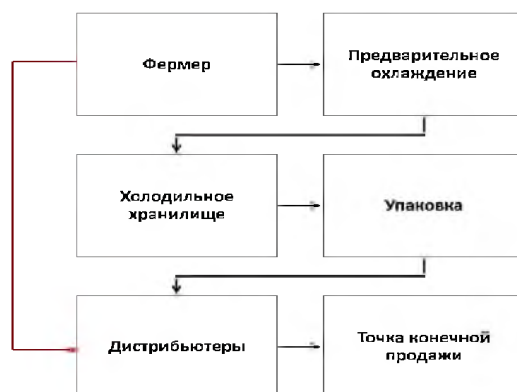


Рисунок 2. Цепочка поставок фруктов и овощей основными производителями

К основным причинам низкого внедрения систем холодильного хранения можно отнести такие факторы, как необходимость больших инвестиций, эксплуатационные расходы, необходимость обеспечения бесперебойного электроснабжения, отсутствие необходимой инфраструктуры и неравномерное географическое распределение [20].

Для решения проблемы низкого проникновения технологии холодильного хранения доступного для средних и мелких производителей в статье представлена предлагаемая программно-аппаратная система хранения продукции.

Усовершенствованная система мониторинга хранения овощей и фруктов. Современные технологии хранения овощей и фруктов базируются на международных стандартах [21], [22], [23], которые основаны на создании специальных хранилищ, где помимо контроля

температуры и влажности в хранилищах используют регулируемые газовые среды (РГС). В РГС для хранения осуществляется тщательное контролирование газового состава: содержание кислорода снижается до заранее определённого уровня, а уровень углекислого газа, соответственно, увеличивается. Это регулирование позволяет достигать общей доли кислорода и углекислого газа в 21 % для определённых видов растительных продуктов. В зависимости от конкретных требований к условиям хранения суммарное содержание этих двух газов может быть скорректировано до уровня ниже 21 %. Снижение кислорода и повышение содержания углекислого газа в контролируемой среде хранилища влияет на следующие факторы:

- уменьшение процессов окисления;
- замедление процессов дозревания овощей и фруктов;
- изменение структуры тканей растительных продуктов;
- замедление большинства химических и биологических процессов;
- появление нежелательных запахов;
- развитие специфических болезней (замедление и снижение);
- снижение степени образования этилена и подавление его воздействия;
- увеличение сроков хранения.

Важным компонентом в системе мониторинга и регулируемого контроля в подобных хранилищах является мультисенсорная газоаналитическая система, которая позволяет в режиме реального времени определять типы газов и их концентрацию. К существующим стационарным хранилищам предлагается создание и автономных (возможно передвижных) систем мониторинга и регулируемого хранения овощей и фруктов (Рис. 3). Автономные хранилища овощей и фруктов найдут свое применение, например, в фермерских хозяйствах с небольшим объемом продукции, при транспортировке выращенных растительных культур с полей в стационарные овоще- и фруктохранилища.

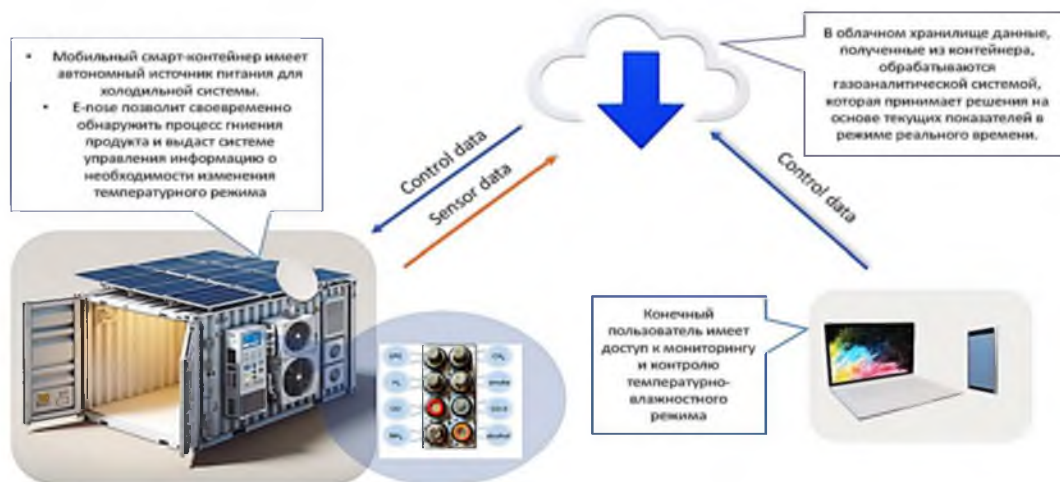


Рисунок 3. Структурная схема автономной системы мониторинга и регулируемого хранения овощей и фруктов

В качестве основы автономного хранилища овощей и фруктов предлагается использовать контейнеры, классифицируемые стандартом ISO 668:2020 [24]. В контейнере расположены стойки с коробами, наполненными овощами или фруктами, в каждой стойке установлена матрица газовых сенсоров с датчиком температуры и влажности, данные с которых после съема информации сохраняются центральным

контролером смарт-контейнера, откуда далее передаются в облачную газоаналитическую систему. Отдельным блоком установлено холодильное оборудование и системы регулировки газовой атмосферы хранилища. После обработки данных в облачной системе газоаналитическая система генерирует корректирующие команды и передает их в центральный контроллер. Центральный контроллер осуществляет управляющие воздействия, необходимые для регулирования газовой атмосферы смарт-хранилища. Диспетчерский пункт может быть развернут на базе персонального компьютера или мобильного устройства (планшета, смартфона). Разработанное программное обеспечение позволяет подключиться к сервисам облачной газоаналитической системы, посредством которой достаточно просто отслеживать и регулировать все процессы смарт-хранилища в режиме реального времени. Облачная газоаналитическая система реализована посредством web-сервисов, функционал которых при необходимости можно относительно быстро модифицировать. Разработанная газоаналитическая система использует технологии машинного обучения для определения состава целевых газов и их концентрации.

Существующие на территории нашей республики хранилища овощей и фруктов контролируют только два параметра: температуру и влажность. Для контроля газовой атмосферы требуется дорогостоящее зарубежное оборудование и соответствующее программное обеспечение. Разрабатываемая мультисенсорная газоаналитическая система позволит относительно незатратно модернизировать имеющиеся хранилища овощей и фруктов без масштабной переделки существующих систем хранения.

Вывод. В данной работе были рассмотрены возможности совершенствования технологий хранения овощей и фруктов с использованием инновационных подходов, таких как искусственное обоняние. Современные подходы к хранению, включая разработанные в данной работе интеллектуальные системы мониторинга и использование искусственного обоняния, могут значительно уменьшить потери и увеличить сроки хранения продукции. В рамках дальнейшей разработки планируется создание рабочего прототипа умного хранилища с автоматизированным контролем температурно-влажностного состояния и мониторингом газового состава. Это будет способствовать минимизации потерь продукции и улучшению сохранности урожая. Осуществление централизованной сети стационарных и мобильных смарт-хранилищ на основе последних достижений в области протоколов связи и защиты данных улучшит координацию и эффективность системы хранения на национальном уровне. Компактные размеры и автономное энергообеспечение предлагаемых хранилищ помогут снизить инвестиционные издержки, эксплуатационные расходы и нивелировать недостатки географической удаленности для небольших хозяйств. Автоматизация процессов во всей системе холодильного хранения позволит повысить эффективность и надежность поставок продукции. В итоге, данные инновации направлены на обеспечение продовольственной безопасности страны, поддержку малых хозяйств и решение проблемы критической нехватки современных систем хранения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы грантового финансирования по научным и научно-техническим проектам № AP19680157.

References

1. FAO, "The State of Food and Agriculture 2022 Leveraging agricultural automation for transforming agrifood systems," FAO. FAO, pp. 16–17, 2022. doi: <https://doi.org/10.4060/cb9479en>.
2. M. Ryan, G. Isakhanyan, and B. Tekinerdogan, "An interdisciplinary approach to artificial intelligence in agriculture," *NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences*, vol. 95, no. 1, p. 2168568, Dec. 2023, doi: [10.1080/27685241.2023.2168568](https://doi.org/10.1080/27685241.2023.2168568).
3. L. Bai, M. Liu, and Y. Sun, "Overview of Food Preservation and Traceability Technology in the Smart Cold Chain System," *Foods*, vol. 12, no. 15, 2023, doi: [10.3390/foods12152881](https://doi.org/10.3390/foods12152881).

4. R. md, R. Yaacob, M. Mohamed, T. Azahar, and F. A. Rahim, "Food Freshness Using Electronic Nose and Its Classification Method: A Review," *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, vol. 7, pp. 49–53, Feb. 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.28.20964.
 5. [W. Huang et al., "Flexible sensing enabled agri-food cold chain quality control: A review of mechanism analysis, emerging applications, and system integration," *Trends Food Sci Technol*, vol. 133, pp. 189–204, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.010>.
 6. Q. Chen, J. Qian, H. Yang, and W. Wu, "Sustainable food cold chain logistics: From microenvironmental monitoring to global impact," *Compr Rev Food Sci Food Saf*, vol. 21, no. 5, pp. 4189–4209, 2022, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13014>.
 7. W. Lang and R. Jedermann, "What Can MEMS Do for Logistics of Food? Intelligent Container Technologies: A Review," *IEEE Sens J*, vol. 16, no. 18, pp. 6810–6818, Sep. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2576287.
 8. L. and K. S. Tokbergenova Aigul and Kiyassova, "Sustainable Development Agriculture in the Republic of Kazakhstan," *Pol J Environ Stud*, vol. 27, no. 5, pp. 1923–1933, 2018, doi: 10.15244/pjoes/78617.
 9. S.M., M. S. Baktgereyeva A., "Fruit and vegetable production in Kazakhstan: status, problems and ways of solution," *Problems of AgriMarket*, vol. 4, pp. 159–169, 2023.
 10. FAO, *Overview of the fruit and vegetable sector in Eurasian and Economic Union countries*, vol. 98. FAO, 2023.
 11. L. Xue and G. Liu, "1 - Introduction to global food losses and food waste," in *Saving Food*, C. M. Galanakis, Ed., Academic Press, 2019. – Pp. 1-31. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815357-4.00001-8>.
 12. T. Xie, S. Shen, Y. Hao, W. Li, and J. Wang, "Comparative Analysis of Microbial Community Diversity and Dynamics on Diseased Tubers During Potato Storage in Different Regions of Qinghai China," *Front Genet*, vol. 13, 2022, doi: 10.3389/fgene.2022.818940.
 13. Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan., "Статистика внешней, взаимной торговли и товарных рынков [Statistics on foreign, mutual trade and commodity markets]." Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://stat.gov.kz/ru/industries/economy/foreign-market/>
 14. Sayat Shortan, "Food losses and waste in Kazakhstan," Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/reu/europe/documents/FLW/FLW_assessment_Kazakstan.pdf
 15. B. of N. Statistics. Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan, "Статистика сельского, лесного, охотничьего и рыбного хозяйства / Матер.-техн. база сельского хоз-ва / Сельскохозяйственные постройки и сооружения," Taldau Statistical Platform. Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://taldau.stat.gov.kz/ru/NewIndex/GetIndex/701396>
 16. "Токаев: Казахстан теряет при хранении 40 % сельхозпродукции." Accessed: Feb. 05, 2024. [Online]. Available: <https://eldala.kz/novosti/ovoshchi-i-frukty/14237-tokaev-kazahstan-teryaet-pri-hrannerii-40-selhozprodukcii>
 17. V. Stukach, G. Saparova, G. Sultanova, and S. Saginova, "Infrastructural Development of Agricultural Products in the Republic of Kazakhstan," *Economy of Region*, vol. 15, pp. 561–575, Feb. 2019, doi: 10.17059/2019-2-19.
 18. E. Rutta, "Understanding barriers impeding the deployment of solar-powered cold storage technologies for post-harvest tomato losses reduction: Insights from small-scale farmers in Tanzania," *Front Sustain Food Syst*, vol. 6, Feb. 2022, doi: 10.3389/fsufs.2022.990528.
 19. M. Kirci, O. Isaksson, and R. Seifert, "Managing Perishability in the Fruit and Vegetable Supply Chains," *Sustainability*, vol. 14, p. 5378, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14095378.
 20. W. Amjad et al., "Decentralized solar-powered cooling systems for fresh fruit and vegetables to reduce post-harvest losses in developing regions: a review," *Clean Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 635–653, Jun. 2023, doi: 10.1093/ce/zkad015.
 21. International Organization for Standardization, "ISO 2169:1981 Fruits and vegetables. Physical conditions in cold stores. Definitions and measurement.," ISO. 2014. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/ru/standard/6964.html>
 22. International Organization for Standardization, "ISO 3659:1977 Fruits and vegetables. Ripening after cold storage," ISO. 2019. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/11278.html>.
 23. International Organization for Standardization, "ISO 6949:1988 Fruits and vegetables. Principles and techniques of the controlled atmosphere method of storage.," ISO. 2016. Accessed: Feb. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/ru/standard/13496.html>.
 24. "ISO 668:2020." Accessed: May 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/76912.html>
-