

<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s311>

УДК 663.12

Клеточная стенка дрожжей как основа биоконтроля постуборочных болезней плодовоовощного сырья (Систематический обзор предметного поля)

Л. Ч. Бурак

ООО «БЕЛПРОСАКВА», Минск,
Республика Беларусь

Корреспонденция:
Бурак Леонид Чеславович,
ООО «Белпросаква», 220015,
Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Пономаренко, 35а
E-mail: leonidburak@gmail.com

Конфликт интересов:
автор заявляет об отсутствии
конфликта интересов.

Поступила: 25.02.2026

**Поступила после
рецензирования:** 25.04.2026

Принята: 30.06.2026

Copyright: © 2026 Автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Постуборочная микробная порча остается одной из ключевых причин потерь плодовоовощного сырья и снижения их товарного качества, увеличивая экономические издержки и ресурсный след производства. В связи с этим растет интерес к экологически безопасным технологиям биоконсервации, которые включают дрожжевые продукты, не приводящие к образованию нежелательных остатков.

Цель. Систематизировать данные о составе, биологической активности и направлениях применения производных клеточной стенки дрожжей (КСД) для снижения постуборочной заболеваемости фруктов, сохранения показателей качества и уменьшения рисков, связанных с микотоксинами, а также оценить технологические подходы, повышающие эффективность таких решений.

Материалы и методы. Обзор выполнен на основе структурированного поиска, отбора и синтеза литературных данных. Поиск проводили в Web of Science Core Collection, Scopus, PubMed и Google Scholar; дополнительно анализировали релевантные русскоязычные публикации, отобранные в РИНЦ. Учитывали работы на русском и английском языках за период 2005–2025 гг. Отбор выполняли в два этапа (по названиям/аннотациям и по полным текстам) с фиксацией причин исключения на этапе работы с полными текстами.

Результаты и обсуждение. Функциональные свойства КСД определяются архитектурой и составом (β-глюканы, маннаны/маннопротеины, хитин), что обуславливает сорбционные характеристики и возможность использования КСД как матрицы для доставки активных соединений. Обобщены данные о снижении выраженности постуборочных гнилей и поддержании качества при хранении, а также о потенциале уменьшения риска микотоксинов за счет подавления токсигенных патогенов и/или сорбции токсинов. Перспективными направлениями являются стандартизация сырья и режимов применения, оптимизация получения полисахаридных фракций и разработка комбинированных решений с природными антимикробными агентами, антагонистическими микроорганизмами и съедобными покрытиями. Ограничения доказательной базы связаны с вариабельностью исходных материалов, неоднородностью протоколов и недостатком данных, полученных в условиях, близких к производственным.

Выводы. Дальнейшие исследования должны быть направлены на унификацию характеристик производных клеточной стенки дрожжей, оптимизацию составов и подтверждение их эффективности в реальных логистических цепочках. Это позволит реализовать их потенциал как основы устойчивых постуборочных технологий для фруктов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

биоконтроль, клеточная стенка дрожжей, полисахариды, индуцированная устойчивость, антимикробные агенты, микотоксины, экстракция, съедобные покрытия, функциональные свойства

Для цитирования: Бурак, Л. Ч. (2026). Клеточная стенка дрожжей как основа биоконтроля постуборочных болезней плодовоовощного сырья (Систематический обзор предметного поля). *Health, Food & Biotechnology*, 8(2), 66–89. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s311>



<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s311>

Yeast Cell Walls as the Basis for Biocontrol of Post-Harvest Diseases in Fruit and Vegetables (Systematic Scoping Review)

Leonid Ch. Burak

LLC "BELROSAKVA", Minsk,
Republic of Belarus

Correspondence:

Leonid Ch. Burak,
Belrosakva LLC, 35a, Ponomarenko St.,
Minsk, 220015, Republic of Belarus
E-mail: leonidburak@gmail.com

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 25.02.2026

Received in revised form: 25.04.2026

Accepted: 30.06.2026

Copyright: © 2026 The Author

ABSTRACT

Introduction. Post-harvest microbial spoilage remains one of the key causes of losses in fruit and vegetable raw materials and the decline in their market quality, increasing economic costs and the resource footprint of production. Consequently, there is a growing interest in environmentally safe bioconservation technologies that include yeast products, which do not leave undesirable residues.

Purpose. To systematise data on the composition, biological activity, and applications of yeast cell wall (YCW) derivatives for reducing post-harvest diseases in fruits, maintaining quality parameters, and minimising risks associated with mycotoxins, as well as to assess technological approaches that enhance the effectiveness of these solutions.

Materials and Methods. This review is based on a structured search, selection, and synthesis of literature data. The search was conducted in the Web of Science Core Collection, Scopus, PubMed, and Google Scholar; additionally, relevant Russian-language publications identified in the Russian Science Citation Index (RSCI) were analysed. Works published in Russian and English from 2005 to 2025 were considered. The selection was carried out in two stages (by titles/abstracts and by full texts) with documentation of reasons for exclusion during the full-text stage.

Results and Discussion. The functional properties of YCW are determined by their architecture and composition (β -glucans, mannan/mannoproteins, and chitin), which influence their sorption characteristics and the potential use of YCW as a matrix for delivering active compounds. Data on the reduction of post-harvest decay severity and maintenance of quality during storage are summarised, along with the potential for reducing mycotoxin risk through the suppression of toxigenic pathogens and/or the sorption of toxins. Promising directions include the standardisation of raw materials and application regimes, optimisation of polysaccharide fraction extraction, and the development of combined solutions with natural antimicrobial agents, antagonistic microorganisms, and edible coatings. Limitations of the evidence base are related to the variability of raw materials, heterogeneity of protocols, and a lack of data obtained under conditions close to production.

Conclusions. Further research should focus on unifying the characteristics of yeast cell wall derivatives, optimising compositions, and confirming their effectiveness in real logistics chains. This will enable the realisation of their potential as the foundation for sustainable post-harvest technologies for fruits.

KEYWORDS

biocontrol, yeast cell wall, polysaccharides, induced resistance, antimicrobial agents, mycotoxins, extraction, edible coatings, functional properties



To cite: Burak, L. Ch. (2026). Yeast cell walls as the basis for biocontrol of post-harvest diseases in fruit and vegetables (Systematic scoping review). *Health, Food & Biotechnology*, 8(2), 66-89. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s311>

ВВЕДЕНИЕ

После сбора урожая фрукты и овощи остаются восприимчивыми к микробному загрязнению, физиологическому старению, дыхательным потерям и окислительным процессам, что снижает пищевую ценность и срок хранения (Burak, 2025; Chowdhury et al., 2025; Zhang et al., 2024). Постуборочные потери означают не только прямые экономические убытки, но и утрату ресурсов, затраченных на производство (вода, энергия, удобрения), что усиливает экологические и социальные последствия продовольственных потерь (Mabusela et al., 2022; Mditshwa et al., 2023; Burak et al., 2025). В этих условиях биологический контроль рассматривается как безопасная и экологически приемлемая альтернатива или дополнение к традиционным подходам постуборочной защиты (Dwibedi et al., 2024; Lieu et al., 2024; Wu et al., 2025). Однако применение живых микробных антагонистов нередко сопровождается вариабельностью эффекта при изменении условий среды, технологическими трудностями масштабирования и хранения, а также ограничениями, связанными с необходимостью поддержания жизнеспособности культуры (Li et al., 2025; Manowan et al., 2025). Это стимулирует поиск стабильных нежизнеспособных биоматериалов, сохраняющих целевые функции биоконтроля. Установлено, что антагонистические дрожжи могут подавлять постуборочные заболевания посредством конкуренции за субстраты и пространство, секреции ферментов, адсорбции и других механизмов (Pétriacoq et al., 2018). Особое значение придается индукции устойчивости плодов, поскольку она активирует собственные защитные физиолого-биохимические ответы растения-хозяина (Prusky & Wilson, 2018). Существенная часть такого эффекта связывается с компонентами клеточной стенки дрожжей: β -глюканы и хитин описаны как структурные элиситоры, способные запускать защитные реакции (Sun et al., 2018a; Sun et al., 2018b; Sun et al., 2018c). Хотя индуцированная устойчивость, вызванная компонентами КСД, может проявляться менее быстро по сравнению с применением живых дрожжей, подход на основе нежизнеспособных фракций потенциально выигрывает по стабильности, воспроизводимости и технологичности. Дополнительно некоторые фракции (например, маннансодержащие компоненты) могут проявлять прямую противогрибковую активность (Sun et al., 2011). Практическую значимость усиливает то, что КСД может быть получена как побочный продукт пищевых производств (например, пивоварения), что соответствует принципам циркулярной экономики и теоретически снижает себестоимость решений. Вместе с тем литература по постуборочному применению КСД остается фрагментированной: результаты зависят от вида/штамма дрожжей, способа выделения и модификации фракций, режимов обработки плодов и условий хранения, а сопоставимость исследований ограничена неоднородностью протоколов.

Следовательно, требуется систематизация данных, ориентированная не только на механизмы, но и на технологические форматы применения и готовность к масштабированию.

Цель данного обзора — провести всесторонний анализ клеточной стенки дрожжей как платформы биоконтроля постуборочных заболеваний фруктов и овощей, включая состав и структуру КСД, методы получения фракций, механизмы действия, влияние на показатели качества при хранении, потенциал в контексте микотоксинов, а также технологические форматы применения и ограничения внедрения. Для достижения цели сформулированы следующие исследовательские вопросы:

1. RQQ#1. Какие компоненты и структурные особенности клеточной стенки дрожжей определяют её функциональные свойства и вариабельность состава (раздел 2)?
2. RQQ#2. Какие методы подготовки, экстракции и получения фракций клеточной стенки дрожжей наиболее значимы для выхода, чистоты и сохранения биоактивности целевых полисахаридов (раздел 3)?
3. RQQ#3. Какими механизмами КСД обеспечивают биоконтроль постуборочных патогенов, включая индукцию устойчивости и влияние на сигнальные пути защиты плодов (раздел 4.1)?
4. RQQ#4. Как применение КСД влияет на сохранение свежести плодов и показатели качества при хранении (раздел 4.2)?
5. RQQ#5. Каков потенциал КСД в снижении рисков микотоксинов в постуборочном контексте (подавление патогенов-продуцентов и/или адсорбция токсинов) (раздел 4.3)?
6. RQQ#6. Какие технологические форматы применения (упаковочные материалы, системы доставки/инкапсуляции, эмульсии, съедобные покрытия) и какие факторы масштабирования/безопасности определяют готовность решений на основе КСД к промышленному внедрению (раздел 5 и заключительные разделы)?

Терминология. В настоящем обзоре термин «производные клеточной стенки дрожжей (КСД)» используется как обобщающий для инактивированных дрожжевых клеток, изолированной клеточной стенки и отдельных фракций (β -глюканы, маннаны/маннопротеины, хитин), а также растворимых полисахаридных экстрактов.

МЕТОДОЛОГИЯ

Обзор выполнен с применением прозрачной процедуры поиска, отбора и последующего синтеза данных. Поиск научных публикаций осуществлялся в Web of Science Core Collection, Scopus и PubMed, а также в Google Scholar для расширения охвата. Дополнительно были проанализированы релевантные русскоязычные публикации из РИНЦ. Применялись ограничения по периоду (2010–2025) и языку (английский/русский). Процедура отбора включала удаление дубликатов, двухэтапный скрининг (по названиям и аннотациям, затем по полным текстам) и документирование причин исключения на этапе анализа полных текстов. Всего было идентифицировано 932 публикации (n = 932), включая 867 записей из баз данных (n = 867) и 65 записей из дополнительных источников (n = 65). После удаления дубликатов была исключена 371 публикация (n = 371); к скринингу осталось 561 (n = 561). На этапе скрининга были исключены 294 публикации (n = 294). Полнотекстовую оценку проводили 267 источников (n = 267). По итогам полнотекстовой оценки были исключены 120 публикаций (n = 120), в настоящий обзор в итоге вошли 147 публикаций (n = 147).

Источники информации
и стратегия поиска

Стратегия поиска была сформирована на основе сочетания трех концептуальных блоков: (1) дрожжи и производные клеточной стенки дрожжей (компоненты/ фракции), (2) постуборочный контекст и плоды, (3) биологический контроль / противогрибковый эффект и/или индуцирование устойчивости, включая технологические форматы применения (растворы, покрытия, пленки / активная упаковка, комбинированные системы). Внутри

каждого концептуального блока термины объединялись оператором OR, а концептуальные блоки — оператором AND. Применялись усечения и варианты написания терминов (например, postharvest/post-harvest).

В каждой базе данных поисковая строка адаптировалась под требования синтаксиса и доступные фильтры. Для Google Scholar, учитывая ограничения расширенного поиска, использовались укороченные запросы на английском и русском языках с последующим ручным отбором релевантных записей. Дополнительно выполнялся ручной поиск по спискам литературы ключевых публикаций, отобранных на этапе работы с полными текстами, для повышения полноты охвата. Структура поискового запроса и ключевые слова представлены в Таблице 1.

Критерии отбора
и проверка соответствия

Для определения соответствия найденных записей критериям включения был проведен двухэтапный процесс отбора: (1) скрининг названий и аннотаций; (2) оценка полных текстов. На этапе идентификации удалялись дубликаты. Причины исключения фиксировались на этапе анализа полных текстов. Критерии обеспечения качества были интегрированы в процесс отбора и включали оценку достаточности описания методики и результатов для интерпретации вклада КСД в наблюдаемые эффекты. Критерии включения и исключения для систематического обзора представлены в Таблице 2.

Таблица 1
Структура поискового запроса и ключевые слова
Table 1
Search query structure and keywords

Концептуальный столп	Ключевые слова и поисковая строка
Концепция 1: дрожжи и клеточная стенка/производные	(yeast ИЛИ Saccharomyces ИЛИ "antagonistic yeast*" ИЛИ "yeast cell wall*" ИЛИ "cell wall component*" ИЛИ "cell wall derivative*" ИЛИ "cell wall fraction*" ИЛИ glucan* ИЛИ "beta-glucan*" ИЛИ chitin* ИЛИ mannan* ИЛИ mannoprotein*)
Концепция 2: постуборочный контекст и объект (плоды)	(postharvest ИЛИ "post-harvest" ИЛИ storage ИЛИ "shelf life" ИЛИ decay ИЛИ rot ИЛИ "postharvest disease*") И (fruit* ИЛИ berry* ИЛИ apple* ИЛИ citrus ИЛИ grape* ИЛИ mango* ИЛИ "stone fruit*")
Концепция 3: биоконтроль / механизм / формат применения	(biocontrol ИЛИ "biological control" ИЛИ antagonist* ИЛИ antifungal ИЛИ "fungal inhibition" ИЛИ "induced resistance" ИЛИ elicitor* ИЛИ coating* ИЛИ "edible coating*" ИЛИ film* ИЛИ formulation ИЛИ "active packaging")

Таблица 2
Критерии включения и исключения для систематического обзора
Table 2
Inclusion and exclusion criteria for the systematic review.

Категория критериев	Критерии включения	Критерии исключения
Этап 1: тематическая направленность	Исследования по компонентам / фракциям / производным клеточной стенки дрожжей (например, β-глюканы, хитин, маннаны/маннопротеины) и их роли / применению для постуборочной защиты плодов (контроль грибной порчи, снижение заболеваемости, индуцирование устойчивости, технологические форматы применения)	Работы вне постуборочного контекста плодов; исследования, где рассматриваются только живые дрожжи без акцента на КСД; исследования в неплодовых системах без обоснования применимости к постуборочной сохранности плодов
Этап 1: язык, период и тип	Рецензируемые публикации (оригинальные статьи и обзоры) на английском или русском языке, 2010–2025	Публикации до 2010; языки, отличные от англ./рус.; нерцензируемые материалы (редакционные заметки, комментарии, письма), тезисы без полнотекстовых данных
Этап 2: объем и доказательность	Полный текст содержит методически описанные данные: источник/тип КСД или способ получения, условия эксперимента, показатели эффективности (in vitro и/или на плодах)	Недостаточное описание методики; отсутствие измеримых исходов эффективности/качества/маркеров; КСД упомянуты без данных, подтверждающих их роль
Этап 2: релевантность результатам обзора	Работа связывает КСД с биоконтролем постуборочных патогенов и/или индуцированной устойчивостью плодов, включая технологические аспекты применения	Работы без связи с постуборочной защитой плодов и овощей (например, только нутрицевтика/корм); исследования покрытий без участия КСД как активного фактора

Извлечение данных

Извлечение данных проводилось по унифицированной форме и фиксировалось в рабочей таблице. Для каждой включенной публикации извлекались: библиографические сведения (авторы, год, источник); объект (вид/сорт плодов), патоген(ы) и модель заражения; условия хранения; тип КСД, источник и способ получения/обработки, степень характеристики; формат применения, дозировка и способ нанесения; показатели эффективности; показатели качества плодов; биохимические/физиологические маркеры защитного ответа; ключевые выводы и ограничения исследования.

Тематический синтез

Результаты включенных исследований обобщались методом тематического синтеза с использованием кодирования по четырем блокам: механизм действия, формат применения, факторы вариабельности эффекта и масштабирование/стандартизация. При наличии достаточного числа сопоставимых результатов фиксировалась частота упоминания тем и направление эффектов; такие подсчеты использовались для оценки представленности темы и не интерпретировались как количественная оценка величины эффекта.

РУЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методы послеуборочной обработки плодов

Послеуборочная консервация направлена на замедление физиологического старения плодов, ограничение развития фитопатогенов и сохранение потребительских показателей. В исследованиях и на практике доминируют три группы подходов: физические воздействия, химические обработки и биологический контроль. Их сопоставление важно для обоснования интереса к альтернативным решениям, включая КСД, которые могут сочетать биологическую активность с потенциально более высокой стандартизируемостью и совместимостью с покрытиями и упаковочными системами (Burak, 2023; Li et al., 2024b; Burak et al., 2024)

Физические методы

Физические методы продления срока хранения включают хранение при пониженных температурах, модифицированную/контролируемую газовую среду, термообработку, различные виды облучения и иные воздействия, не предполагающие прямого внесения химических консервантов (Burak, 2024; Burak et al., 2024). Hong et al. (2023), сравнивая хранение плодов ананаса при 10 °C и 25 °C, показали, что низкотемпературное хранение может повышать устойчивость к внутреннему потемнению; эффект связывали с поддержанием уровня мембранных

фосфолипидов, уменьшением накопления фосфатидной кислоты и снижением перекисного окисления мембранных липидов. Ju et al. (2025) продемонстрировали, что атмосфера с 5 % O₂ и 12 % CO₂ замедляет потемнение корейских дынь, одновременно улучшая сенсорные характеристики и снижая образование нежелательных соединений. Langer et al. (2018) установили, что у клубники после обработки при 45 °C в течение 3 часов подавлялась экспрессия генов, связанных с разложением пектина и размягчением, тогда как экспрессия генов, ассоциированных с укреплением клеточной стенки, повышалась. Wang et al. (2023) сообщали, что нетепловой эффект микроволнового излучения может уменьшать холодовое повреждение персиков. Zhou et al. (2024) показали, что обработка УФ-С при 1,5 кДж/м² замедляет ухудшение качества персиков за счет сохранения твердости, снижения потери массы, ингибирования дыхания и поддержания вкусоароматических характеристик. Универсальность физических методов ограничена зависимостью результата от вида плодов, степени зрелости и исходного физиологического состояния. Неверно подобранные параметры способны усиливать стрессовые реакции и ухудшать органолептические показатели; дополнительным ограничением является потребность в специализированной инфраструктуре.

Химические методы

Химические методы основаны на применении веществ, подавляющих развитие микроорганизмов, регулирующих созревание или замедляющих физиологическое старение. Традиционные фунгициды обеспечивают выраженное подавление патогенов, но сопряжены с рисками остаточных количеств, формированием устойчивости и экологическими последствиями; ряд веществ ограничен или запрещен из-за токсикологических рисков. Отдельное место занимает 1-метилциклопропен (1-MCP), применяемый для регулирования этилен-зависимого созревания. Ozkaya et al. (2014) предварительно охлаждали инжир до 1 °C в течение 6 часов, а затем обрабатывали 500 или 1000 нл/л 1-MCP в течение 24 часов. Обработанные плоды хранили в течение 10 дней при температуре 1 °C и относительной влажности 90–95 %, после чего проводили оценку. Обработка 1-MCP показала, что выработка этилена, скорость дыхания, потеря веса и концентрации глюкозы, фруктозы и общего количества растворимых сухих веществ (TSS) отрицательно коррелировали с дозами 1-MCP во время холодного хранения (за исключением TSS в первый год эксперимента и скорости дыхания во второй год эксперимента). Напротив, твердость мякоти и цвет (h_a) во время хранения в холодильнике положительно коррелировали с дозами применяемого 1-метилциклопропена. Wu et al. (2024) сообщили, что 20-часовая фумигация яблок 1-MCP подавляет активность целлюлазы и экс-

прессию соответствующих генов и одновременно усиливает активность антиоксидантных ферментов (SOD, POD, CAT). Однако в производственных условиях сложно строго контролировать концентрацию и экспозицию, а отклонения от режима способны нарушать нормальное созревание и ухудшать вкус (Ding et al., 2019). Растет интерес к природным консервантам, включая полисахариды и эфирные масла. Nimitkeatkai et al. (2024) применяли хитозан в качестве покрытия манго и показали снижение потери массы и лучшее сохранение окраски кожуры, твердости и титруемой кислотности. Prasad et al. (2024) продемонстрировали, что ряд эфирных масел поддерживает качество манго и снижает гниение (наиболее выраженный эффект — масло тимьяна). При этом природные консерванты нередко характеризуются вариабельностью состава, меньшей стабильностью и сложностью стандартизации.

Биологические методы

Биологические подходы используют антагонистические микроорганизмы для подавления возбудителей гнилей. Shen et al. (2019) показали, что инокуляция 1 × 10⁸ клеток/мл *Sporidiobolus pararoseus* ZMY-1 в раны клубники снижала заболеваемость серой гнилью. Zou et al. (2021) сообщили, что отдельные штаммы дрожжей ингибировали *Botrytis cinerea* in vitro и снижали заболеваемость серой гнилью клубники in vivo. Ji et al. (2024) показали высокую колонизационную способность *Hannaella sinensis* на груше и подавление *Penicillium expansum*. Ограничения биоконтроля живыми дрожжами включают зависимость эффективности от условий хранения и инфекционной нагрузки, требования к жизнеспособности культур и необходимость подтверждения безопасности конкретных штаммов (Li et al., 2024a). На этом фоне КСД рассматриваются как более управляемая и технологичная альтернатива/компонент комбинированных решений.

Структура клеточной стенки дрожжей

Клеточная стенка дрожжей является наружной оболочкой клетки, составляет около 15–35% сухой массы и имеет толщину приблизительно 0,1–0,3 мкм. Она представляет собой высокополярную двухслойную матрицу, где внешний слой преимущественно образован маннопротеинами, а внутренний слой состоит главным образом из β-D-глюкана с небольшой долей хитина (Free, 2013; Ma, 2024; Wang, C. et al., 2025; Li et al., 2024c). Клеточная стенка — динамическая структура: количественное соотношение полисахаридов и белков варьирует в зависимости от условий культивирования; часто приводится среднее соотношение порядка 85 : 15 (Zhang et al., 2025; Chraniuk, et al., 2025). Эта вариабельность

имеет прямое значение для получения КСД, поскольку влияет на состав фракций и, следовательно, на воспроизводимость биологического эффекта. Маннопротеины составляют примерно 30–50 % сухой массы клеточной стенки и представлены маннанами, ковалентно связанными с белками (Zhang et al., 2025). Эти высокогликозилированные полипептиды содержат 50–95 % углеводов (Bastos et al., 2022). Маннопротеины ковалентно связаны с сеткой β -1,3-глюкана и визуализируются в виде фибриллярных выступов при трансмиссионной электронной микроскопии (Mekoue Nguela et al., 2015). Выделяют N-гликозилированные и O-гликозилированные маннопротеины (Kalebina et al., 2023; Aronbaev et al., 2013). В N-гликозилированных вариантах длинные (α -1,6) и короткие (α -1,2 или α -1,3) цепи маннозы присоединены через N-гликозидные связи между остатками N-ацетилглюкозамина (GlcNAc) и аспарагина. O-гликозилированные маннопротеины содержат относительно короткие цепи маннанных единиц; по данным Bastos et al. (2022), они характеризуются более высокой долей белка (около 50 %). Функционально маннопротеины критичны для взаимодействия клетки с окружающей средой, распознавания и формирования иммуномодулирующих свойств дрожжей (Rodrigues et al., 2012), что важно в контексте обсуждения КСД как потенциальных элиситоров защитных реакций плодов. β -D-глюканы составляют примерно 30–60 % сухой массы клеточной стенки и включают β -1,3-глюкан (около 90 %) и β -1,6-глюкан (около 10 %) (Caruso et al., 2022; Pengkumsri et al., 2017). По растворимости их подразделяют на водорастворимые, щелочерастворимые и щелоченерастворимые фракции (Bastos et al., 2022; Caruso et al., 2022). Структурная целостность β -глюкановой сети связана с тройной спиральной конформацией, формируемой основной цепью с β -1,3-связями и боковыми цепями с β -1,6-связями (Al-Sahlany et al., 2022; Qin et al., 2013). β -1,3-глюкан как крупный полимер (порядка 1500 звеньев глюкозы) ковалентно связывается с хитином, образуя сетчатую структуру, обеспечивающую механическую прочность и эластичность. Более короткие цепи β -1,6-глюкана (примерно 150 звеньев) выполняют роль связующих элементов между β -1,3-глюканом и белками клеточной стенки. Хитин представлен линейным полимером N-ацетилглюкозамина с β -1,4-связями и локализован преимущественно рядом с плазматической мембраной (Chagas et al., 2014). Хотя его доля в сухой массе клеточной стенки невелика (около 1–3 %), хитин играет важную роль в поддержании морфологии клетки и адаптации к стрессу (Levin, 2011; Baek et al., 2024). Он может связываться с β -1,6-глюканом, а его синтез усиливается при стрессовых воздействиях на клеточную стенку (Levin, 2011), что подтверждает динамичность этой структуры. Таким образом, клеточная стенка дрожжей является сложной двухслойной системой с переменным составом, функциональные свойства которой определяются архитектурой и взаимодействием маннопротеинов, β -глюканов

и хитина. Химическая природа и растворимость этих компонентов одновременно задают как биологическую активность (включая потенциальные элиситорные и барьерные эффекты производных), так и практические ограничения при выделении, очистке и стандартизации — критичные для применения материалов на основе КСД в послеуборочных технологиях

Экстракция веществ клеточной стенки дрожжей

Выбор стратегии экстракции напрямую определяет выход, чистоту, сохранность нативной структуры и, как следствие, биологическую активность целевых компонентов клеточной стенки дрожжей. Это особенно важно для последующего применения в послеуборочной консервации, где эффективность зависит не только от химического состава, но и от молекулярной массы, растворимости и конформации полисахаридов, а также от воспроизводимости партий сырья.

Подготовка КСД

КСД обычно получают из дрожжевого осадка в виде светло-желтых/желтовато-коричневых порошков без выраженного запаха. Типовая технологическая схема включает несколько последовательных этапов. Сначала проводят разбавление и промывку для снижения вязкости и удаления примесей, затем — седиментацию и разделение для концентрирования биомассы. Далее используют процедуры удаления горечи и дезодорации (часто водно-солевые растворы), формируя очищенную дрожжевую суспензию. Следующий ключевой этап — автолиз при контролируемых температуре, времени и pH, ослабляющий клеточные структуры. Для более полного разрушения клеток применяют ферментативную обработку (ферменты, разрушающие клеточную стенку) при строгом контроле pH, температуры, времени и дозировки ферментов. Затем смесь подвергают термообработке для стерилизации и инактивации ферментов. После этого центрифугированием отделяют нерастворимую фракцию клеточной стенки от растворимых дрожжевых экстрактов. Нерастворимый остаток концентрируют и сушат (чаще распылительной сушкой; возможны также барабанная или камерная), получая готовый продукт КСД (Patterson et al., 2022).

Извлечение полисахаридов из клеточной стенки дрожжей

Подходы к извлечению полисахаридов из клеточной стенки дрожжей условно разделяют на физические, химические и ферментативные (Borchani et al., 2014; Mirza

et al., 2017; Martins et al., 2018; Zheng et al., 2019). Физические методы (горячая вода / солевые растворы, механическое разрушение, гомогенизация под давлением) технологически просты и позволяют минимизировать использование реагентов. Их ограничение — снижение выхода и/или чистоты и вариабельность результата при изменении сырья. Химические методы (кислотная или щелочная экстракция) удобны для масштабирования и нередко обеспечивают высокую чистоту, однако жесткие условия могут разрушать полисахаридные структуры и снижать биоактивность.

Ферментативные подходы (автолиз, экзогенные ферменты, микробная ферментация) протекают в мягких условиях и обладают высокой селективностью. Недостаток — стоимость ферментов и контроля процесса (Xin et al., 2022). Поэтому актуальной задачей остается разработка экономичных и «зеленых» схем экстракции, обеспечивающих стабильное качество целевых фракций.

Комбинированные стратегии позволяют повысить выход и сохранить функциональную структуру полисахаридов. Freimund et al. (2003) получили β -глюкан с высокой чистотой (92 %) и выходом (87 %). Magnani et al. (2009) использовали ультразвук после автолиза и высокотемпературной экстракции; выход глюкана составил 11,1 %. Liu et al. (2018) получили маннан с выходом 18 % и чистотой 96,15 %. Zheng et al. (2019) при ферментативном расщеплении после предварительной ультразвуковой или щелочной обработки получили выход β -глюкана 32,3 % и 36,2 % соответственно. Snyman et al. (2021) показали преимущество последовательности «ультразвук → ферменты» для выделения маннопротеинов.

Развиваются также нетермические и более устойчивые технологии. Импульсное электрическое поле (ИЭП) облегчает автолиз и ускоряет высвобождение компонентов, снижая риск деградации полисахаридов (Martínez et al., 2016; Berzosa et al., 2024). Сверхкритическая флюидная экстракция (СФЭ) показала потенциал для извлечения β -глюкана; сообщалось о выходе более 53 % при сохранении высокой молекулярной массы (Benito-Román et al., 2013). Таким образом, экстракция определяет не только выход и чистоту, но и свойства, критичные для биологической функции (растворимость, молекулярная масса, конформация). Для задач послеуборочной консервации приоритетны интегрированные и/или мягкие технологии, обеспечивающие воспроизводимость и сохранение биоактивности фракций.

Использование КСД при хранении фруктов после сбора урожая

Компоненты клеточной стенки дрожжей и продукты их переработки рассматриваются как перспективные

средства послеуборочной защиты по трем взаимосвязанным направлениям: (1) повышение устойчивости плодов к патогенам через индукцию защитных реакций, (2) сохранение свежести за счет формирования полупроницаемых покрытий и модуляции метаболизма, (3) потенциальное снижение рисков микотоксинов как через подавление развития продуцирующих грибов, так и через адсорбцию токсинов.

Борьба с послеуборочными заболеваниями путем повышения устойчивости плодов

Введение в индукцию резистентности

Иммунная система растений включает локальные и системные механизмы защиты. Локальные реакции активируются в зоне контакта с патогеном и могут включать базовую устойчивость, а также более специфичные ответы в зависимости от характера взаимодействия «хозяин — патоген» (Shine et al., 2019). На ранних этапах распознавания патоген-ассоциированных молекулярных паттернов (PAMP) рецепторы распознавания образов (PRR) инициируют PAMP-индуцированный иммунитет, сопровождающийся быстрыми сигнальными событиями и включением защитных программ (Sánchez-Vallet et al., 2015; Zhou et al., 2023; Smith & Murphy, 2020). При развитии инфекции эффекторы патогена, попадая в клетки растения, могут распознаваться белками устойчивости (R-белками), что приводит к эффектор-индуцированному иммунитету (ETI) (Fesel & Zuccaro, 2016; Oliveira et al., 2016). Системные реакции формируют широкоспектральную устойчивость в удаленных тканях. Индуцированную устойчивость традиционно разделяют на системную приобретенную устойчивость (SAR) и индуцированную системную устойчивость (ISR) (Romanazzi et al., 2016; Li et al., 2025). SAR обычно ассоциируется с сигналингом салициловой кислоты и индукцией PR-белков; экспрессия PR1 часто рассматривается как маркер SAR (Kachroo & Kachroo, 2020; Wang et al., 2018). Существенную роль играет NPR1 как центральный регулятор транскрипции защитных генов через взаимодействия с транскрипционными факторами (например, TGA) (Kour et al., 2024). ISR, напротив, преимущественно опирается на пути жасмоновой кислоты и этилена и формирует устойчивость широкого спектра, часто без обязательного накопления SA, хотя сигнальные сети могут пересекаться (Walters & Fountaine, 2009; Walters et al., 2013; Gogoi et al., 2025). Для послеуборочной биологии важно, что многие элиситоры способны «подготовить» ткань плода к стрессу и инфекционной нагрузке, усиливая антиоксидантные и защитные реакции.

**КСД как элиситоры устойчивости:
снижение послеуборочных заболеваний**

Инактивированные дрожжи и фракции их клеточной стенки рассматриваются как источники элиситоров, способных запускать защитные реакции плодов без необходимости колонизации поверхности живыми микроорганизмами. В отличие от живых антагонистов, КСД потенциально проще стандартизировать по составу и дозировке, а также интегрировать в покрытия и комбинированные формуляции. В ряде систем КСД проявляют эффект преимущественно *in vivo* (на плодах), тогда как прямое антифунгальное действие *in vitro* выражено слабо или отсутствует, что указывает на ведущую роль индуцированной устойчивости. Sun et al. (2018b) показали, что обработка ран на груше автоклавированными дрожжевыми клетками (1×10^8 клеток/мл) при экспозиции 24 часа снижала заболеваемость синей плесенью более чем на 66 %, при этом прямого ингибирования прорастания спор *P. expansum* не наблюдали. Sun et al. (2018c) сообщили, что клеточная стенка *Rhodospiridium paludigenum* повышает устойчивость груши к *P. expansum*, что сопровождалось повышением активности защитных ферментов и усилением экспрессии PR-белков.

Для томатов черри Guo et al. (2021) показали, что клеточная стенка дрожжей и β -глюкан активируют элементы каскада митоген-активируемых протеинкиназ (МАРК), включая митоген-активируемую протеинкиназу 3 томата (*Solanum lycopersicum*) (SIMAPK3), и индуцируют экспрессию генов белков, связанных с патогенезом (PR-гены), а также ряда транскрипционных факторов (ТФ). Sun et al. (2023) дополнили эти наблюдения, указав на быстрый запуск сигналов раннего ответа (в том

числе с участием жасмоновой кислоты (JA) и салициловой кислоты (SA), а также брассиностероидов (БС)) и на перекрестную регуляцию ветвей жасмонатного/салицилатного сигналинга (JA/SA) и МАРК-каскадов (МАРК). Сравнение отдельных фракций КСД показывает, что элиситорная активность может быть связана с химической природой и структурной организацией полисахаридов. Yu et al. (2012) показали, что кратковременное замачивание персиков в растворе дрожжевого экстракта (0,5 мг/л, 5 мин) подавляет развитие синей плесени. Авторы связывали эффект со стимуляцией эндогенного образования оксида азота (NO), активацией фенольного обмена и повышением активности защитных ферментов, включая хитиназу (CHI), β -1,3-глюканазу (GLU), пероксидазу (POD) и фенилаланин-аммиак-лиазу (PAL).

Хитин из *S. cerevisiae* повышал устойчивость томата к *B. cinerea*, индуцируя накопление ROS и отложение каллозы, а также активируя защитные ферменты и гены, включая элементы SA-сигналинга (Sun et al., 2018a). β -1,3-D-глюкан из *S. cerevisiae* усиливал экспрессию защитных генов и коррелировал с подавлением прорастания спор в зоне повреждения (Sun et al., 2019). Маннан дрожжей при 1,0 г/л снижал гниль томатов, вызванную *A. alternata*; после 8 дней хранения частота заболевания была ниже на 43,4 % по сравнению с контролем (Li et al., 2021). Wu et al. (2024) показали, что SCWP из *K. marxianus* (преимущественно маннановой природы) может индуцировать более выраженную устойчивость груши к *P. expansum*, чем аналогичная фракция из *S. cerevisiae*. Ограничения сопоставимости результатов связаны с недостаточной характеристикой фракций (молекулярная масса, степень разветвления, соотношение β -1,3/ β -1,6-связей, примеси белка/липидов), а также с вариабельностью моделей

Таблица 3
Вещества клеточной стенки дрожжей, обладающие потенциалом для борьбы с послеуборочными заболеваниями плодов и овощей

Table 3

Yeast cell wall compounds with potential for controlling postharvest diseases of fruits and vegetables

КСК / фракции дрожжевой клетки	Исходные дрожжи	Фитопатоген	Наименование сырья	Ссылки
Автоклавированные дрожжевые клетки	<i>R. paludigenum</i>	<i>P. expansum</i>	Груша	Sun et al. (2018b)
Клеточная стенка дрожжей	<i>R. paludigenum</i>	<i>P. expansum</i>	Груша	Sun et al. (2018c)
Клеточная стенка дрожжей	<i>S. cerevisiae</i>	<i>B. cinerea</i>	Томаты черри	Guo et al. (2021)
Клеточная стенка дрожжей	н/у	<i>B. cinerea</i>	Томаты черри	Sun et al. (2023)
Дрожжевой экстракт	н/у	<i>P. expansum</i>	Персики	Yu et al. (2012)
β -глюкан	<i>S. cerevisiae</i>	<i>P. expansum</i>	Томаты черри	Sun et al. (2019)
β -глюкан	<i>S. cerevisiae</i>	<i>B. cinerea</i>	Томаты черри	Guo et al. (2021)
Хитин	<i>S. cerevisiae</i>	<i>B. cinerea</i>	Томаты черри	Sun et al. (2018a)
Маннан дрожжей	Отработанные пивные дрожжи	<i>A. alternata</i>	Томаты	Li et al. (2021)
Растворимый полисахарид клеточной стенки (РПКС)	<i>K. marxianus</i>	<i>P. expansum</i>	Груши	Wu et al. (2024)

Примечание. Н/у — не указано в результатах исследования
Note. NR — not reported in the study results

заражения и условий хранения. Требуются стандартизованные исследования, сочетающие (а) химическую/структурную характеристику фракций, (б) сопоставимые протоколы заражения и хранения, (в) унифицированные биомаркеры иммунного ответа и качества плодов. В Таблице 3 представлены вещества клеточной стенки дрожжей, обладающие потенциалом для борьбы с послеуборочными заболеваниями плодов и овощей.

Сохранение свежести и замедление физиологического старения

Помимо индукции устойчивости к патогенам, КСД и отдельные полисахаридные фракции дрожжевой клеточной стенки рассматриваются как средства для поддержания качества плодов при хранении. Эффект связывают (1) с барьерным действием пленки и (2) с модуляцией дыхания, этилен-зависимого созревания и окислительного статуса тканей. Sun et al. (2011) показали, что обработка слив маннаном дрожжей снижала потерю массы и интенсивность дыхания и замедляла изменение окраски. Dong et al. (2012) сообщили, что обработка огурцов раствором дрожжевых полисахаридов (0,5 г/л) уменьшала холодовое повреждение при 4 °С, снижала содержание малонового диальдегида и утечку ионов; эффект связывали с усилением эндогенного накопления NO. Xie et al. (2015) показали, что вакуум-инфильтрация маннана одновременно подавляла развитие *A. alternata* и замедляла созревание томатов (сохранение твердости, снижение этилена и дыхания, задержка окрашивания). Xie et al. (2017) сообщили о снижении активности ферментов модификации клеточной стенки (пектинметилэстераза, полигалактуроназа, β-галактозидаза). Li et al. (2021) показали, что маннан может снижать синтез этилена за счет подавления активности синтазы 1-аминоциклопропан-1-карбоновой кислоты (АЦК-синтазы, ACS) и оксидазы 1-аминоциклопропан-1-карбоновой кислоты (АЦК-оксидазы, ACO). Сопоставимость результатов ограничена различиями в способах внесения (замачивание, распыление, вакуум-инфильтрация), дозировках, характеристиках фракций КСД и условиях хранения. Для практической оценки потенциала КСД необходимы стандартизованные исследования с параллельной фиксацией дыхания, этилена, потери массы, текстуры и биомаркеров окислительного стресса.

Снижение риска микотоксинов: подавление продуцентов и биосорбция

Послеуборочные фитопатогенные грибы могут продуцировать микотоксины, что повышает риски для безопасности пищевых продуктов (Jiang et al., 2024). В контексте КСД релевантны два подхода: (1) косвенный — снижение развития токсигенных грибов, (2) пря-

мой — связывание микотоксинов компонентами КСД. Zhu et al. (2015) показали, что обработка *R. paludigenum* снижала заболеваемость синей плесенью на 67 % и содержание патулина на 100 %. Результаты исследований показывают, что индуцированная устойчивость плодов позволяет эффективно подавлять прорастание патогенов в местах механических повреждений за счет воздействия клеточных стенок и полисахаридов дрожжей (Sun et al. 2018a; Sun et al., 2019). Следовательно, выработка микотоксинов может снижаться, но достаточных сведений о доминировании элиситорного действия КСД и о количественной динамике микотоксинов в ткани плода недостаточно, поскольку во многих работах измеряется выраженность болезни без прямого определения токсинов в зоне повреждения и прилегающих тканях. Pereyra et al. (2013) показали адсорбцию афлатоксина В1 и зеараленона препаратами КСД в условиях, имитирующих pH желудочно-кишечного тракта (ЖКТ). Bahrami et al. (2025) сообщили, что инактивированный порошок *S. boulardii*, обогащенный селеном, удалял около 87,19 % патулина из яблочного сока (10 мл) за 10 часов при дозировке 0,02 г. Переносимость этих результатов на плоды требует осторожности из-за сложности матрицы плода и зоны раны. Приоритетными являются исследования, приближенные к реальным условиям хранения, с одновременным измерением развития патогена, содержания токсина, стабильности комплекса «КСД— токсин» и влияния обработки на сенсорные параметры.

КСД как функциональная матрица для формуляций и активной упаковки

КСД обладают выраженным потенциалом как иммуноиндукторы, однако их применение в качестве единственного средства послеуборочной защиты имеет ограничения. КСД требуют времени на развитие ответа хозяина, формируя «окно уязвимости» между обработкой и достижением максимального уровня защиты. Поэтому перспективно рассматривать КСД как матрицу/носитель для активных соединений и систем доставки. Благодаря адсорбционным, эмульгирующим и пленкообразующим свойствам компоненты КСД могут интегрироваться с природными антимикробными и антиоксидантными веществами, формируя микрокапсулы, эмульсии (включая эмульсии Пикеринга) и съедобные покрытия.

Инкапсуляция активных веществ (микрокапсулы на основе КСД)

Природные биоактивные соединения перспективны для послеуборочной защиты, но часто ограничены летучестью, низкой стабильностью и слабой растворимостью. Микрокапсулы, полученные с использованием дрожжевых клеток в качестве инкапсулирующего материала,

обладают однородным размером, превосходной биосовместимостью и легко биоразлагаемыми свойствами. Активные вещества, инкапсулированные в дрожжи, демонстрируют повышенную стабильность, биодоступность и характеристики высвобождения. Этот подход был применен для инкапсуляции различных активных компонентов, включая полифенолы, флавоноиды, витамины и эфирные масла (Soto et al., 2023; Soto et al., 2022; Tan et al., 2021a). Дрожжевые клетки и компоненты КСД рассматриваются как пищевая матрица для инкапсуляции; предобработка (плазмолиз/аутолиз, щелочная обработка) изменяет проницаемость и влияет на эффективность инкапсуляции (Tan et al., 2021a). Примеры представлены в Таблице 4.

Эмульгирующие свойства КСД и эмульсии (включая системы Пикеринга)

Полисахариды КСД (маннаны, β-глюканы) и маннопротеины могут стабилизировать эмульсии за счет повышения вязкости водной фазы и формирования межфазных слоёв. Примеры систем приведены в Таблице 5.

Маннан и глюкан в клеточных стенках дрожжей содержат множество гидрофильных групп, таких как гидроксильные, что обеспечивает им сильную гидрофильность. Их активность на границе раздела фаз масло-вода относительно низка, что ингибирует движение капель за счет повышения вязкости водной фазы и ста-

Таблица 4
Дрожжевые микрокапсулы/стенки для инкапсуляции активных веществ
Table 4
Yeast microcapsules/cell walls for encapsulation of active compounds

Активное вещество	Предварительная обработка	Соотношение ядро : стенка	Эффективность инкапсуляции, %	Основные результаты	Источник
Хлорогеновая кислота	Плазмолиз: 54 °C, 24 ч, 5 % NaCl	1 : 1	12,6	Рост стабильности в условиях влажности и высокой температуре	Shi et al. (2007)
Ресвератрол	Плазмолиз: 54 °C, 24 ч, 5 % NaCl	1 : 3	~14,2	Рост водорастворимости и фотостабильности; усиление DPPH-активности	Shi et al. (2008)
Масло семян портулака	Плазмолиз: 48 ч, 10 % NaCl	1 : 1	60,27	Снижение перекисного числа; повышение загрузки	Kavosi et al. (2017)
Эфирное масло <i>Mentha pulegium</i>	Экстракция 40 °C, 2 % NaCl, 48 ч; затем 85 °C, 15 мин	1,5 : 1	~27,2–37,5	Усиление биоцидного эффекта (модель вредителя)	Kavetsu et al. (2019)
Антоцианин	Гидролиз1 М NaOH, 80 °C, 1 ч; pH 5,0, 55 °C, 1 ч	1 : 12,5	94,7	Устойчивость к стрессам; замедление деградации	Tan et al. (2021b)
Куркумин	Термоинактивация: 97 °C, 30 мин	н/у	37	С УФ-А: инактивация <i>L. monocytogenes</i> 93,3 %	Dou et al. (2021)
Куркумин	Гидролиз1 М NaOH, 80 °C, 1 ч; pH 4–5, 55 °C, 1 ч	н/у	18	С УФ-А: инактивация до 99,2 %	Dou et al. (2021)
Смесь гераниола/эвгенола/тимола	н/у	1 : 1,1–1 : 5	>90	Ингибирование <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>C. albicans</i>	Soto et al. (2022)
Эфирное масло базилика	Гидролиз1 М NaOH, 80 °C, 1 ч; затем HCl, pH 4,2, 55 °C, 1 ч	1,75 : 1	н/у	Подавление микробов in vitro; замедление роста на листьях базилика	Ru et al. (2024)
Карвакрол	Промывание стенок деионизированной водой	1 : 1	74,5	Репеллентная активность (модель клещей)	da Silva Costa et al. (2024)

Примечание. Н/у — не указано в исследовании
Note. NR — not reported in the study results

Таблица 5
Материалы на основе дрожжей/КСД для стабилизации пищевых эмульсий
Table 5
Yeast/yeast cell wall-based materials for stabilizing food emulsions

Источник	Эмульгирующий материал	Дозировка	Масляная фаза	Размер капель / частиц, мкм	Ссылка
<i>S. cerevisiae</i>	Инактивированные целые клетки (эмульсия Пикеринга)	7–9 мас. %	Оливковое масло (60–70 % мас.)	10–250	Firoozmand & Rousseau (2016)
<i>S. cerevisiae</i> / <i>S. boulardii</i>	Инактивированные целые клетки	15 мас. % (водная фаза)	МСТ-масло (50 мас. %)	n/y	Nejadmansouri et al. (2023)
<i>S. cerevisiae</i>	Маннопротеин (после β -1,3-глюканазы)	2–8 мас. %	Оливковое масло (50 % мас.)	<150	Nejadmansouri et al. (2023)
<i>S. cerevisiae</i>	Стенки, модифицированные лауриновой кислотой (YC-LA)	15 мас./об. % (водная фаза)	Соевое масло (50 об./об. %)	14,17	Wang et al. (2025)
N/y	Дрожжевые пищевые волокна	8 мас. % (водная фаза)	Кукурузное масло (75 об. %)	1,55	Kong et al. (2025)

Примечание. МСТ — среднецепочечные триглицериды; n/y — не указано в исследовании
Note. MCT, medium-chain triglycerides; NR, not reported in the study.

билизирует эмульсии. Хитин, содержащий гидрофильные и липофильные ацетильные группы, обладает более сильными эмульгирующими свойствами по сравнению с гидрофильными полисахаридами (Narsipur et al., 2025; Nerome et al., 2021). Полисахариды, выступая в роли эмульгаторов, образуют стабильные слои внутри эмульсий, предотвращая агрегацию капель и демонстрируя превосходную стабильность в различных физических условиях (Таблица 5). Маннан-гликопротеин из клеточной стенки *S. cerevisiae* KA01 показал эмульгирующую активность в отношении пальмового масла на уровне 65 % при критической концентрации 20 г/л, сопоставимую с эмульгаторами, такими как гуммиарабик и лецитин, без значительного влияния температуры (Dikit et al., 2010). Salgado et al. (2017) применили метод соэмульгирования, комбинируя дрожжевой β -глюкан с лецитином для инкапсуляции ресвератрола, что позволило достичь степени инкапсуляции в 93 % и получить антимикробную формулу, эффективно ингибирующую *B. cinerea*. Wang et al. (2025) продемонстрировали, что наночастицы β -глюкана, полученные методом гомогенизации под высоким давлением, обладают превосходной маслоудерживающей способностью и эмульгирующими свойствами, увеличившись на 42,9 % и 260 % соответственно по сравнению с неповрежденными частицами β -глюкана. Полисахариды, как ключевой компонент клеточной стенки, обеспечивают ей гидрофильно-липофильную структуру благодаря ковалентной связи маннана и глюкана с белковым остовом, что напоминает структуру поверхностно-активных веществ. Firuzman and Russo (2016) создали пищевую эмульсию Пикеринга с оливковым маслом, где

размер капель эмульсии составлял 10–100 мкм при содержании масла — 60 мас.%, воды — 31 мас.% и дрожжей — 9 мас.%. Угол смачивания клеточной стенки варьировался от 16° до 44°, что указывает на способность этих гидрофильных частиц формировать стабильные эмульсии типа «масло в воде». Moreira et al. (2016) подтвердили, что промытые активные дрожжевые клетки улучшают адгезию к границам раздела капель, снижая поверхностное натяжение и адсорбируясь на масляных каплях. Однако присутствие маннопротеинов в непромытых клетках обеспечивает долговременную стабильность эмульсии. Kong et al. (2025) использовали дрожжевые пищевые волокна для эмульгирования кукурузного масла, продемонстрировав наименьший размер частиц эмульсии (1,55 мкм) и низкую скорость миграции капель (0,34 мм/ч) при концентрации 8 %. Стабильность эмульсии достигается совместной адсорбцией белков и полисахаридов на границе раздела фаз. Модифицированные лауриновой кислотой частицы клеточной стенки *S. cerevisiae* (YC-LA) обладают повышенной эмульгирующей способностью, образуя плотную межфазную пленку, удерживающую капли размером менее 20 мкм. Эмульсии Пикеринга, приготовленные с YC-LA, демонстрируют отличную термическую и pH-стабильность даже после 35 дней хранения при 4 °C (Wang et al., 2025). Хотя клеточные стенки дрожжей имеют потенциал в качестве альтернативы традиционным поверхностно-активным веществам, исследования факторов, влияющих на их эмульгирующую стабильность, остаются ограниченными. Для применения эмульгирующей способности клеточных стенок в консервации фруктов крайне важно

сохранить их биоконтрольные свойства. Неправильная обработка может снизить резистентность, что требует интеграции эмульгирующей способности с биоконтрольными характеристиками для создания подходящих эмульгаторов.

Съедобные покрытия и пленки на основе КСД

Съедобные покрытия формируются из пищевых полисахаридов, белков и липидов и выполняют барьерную функцию при сохранении экологичности и безопасности. Полисахаридные пленки обладают хорошими барьерными свойствами по отношению к кислороду, но их антимикробная эффективность остается низкой. Для улучшения характеристик пленок могут быть добавлены антимикробные агенты. При приготовлении пленочных растворов часто возникают проблемы с недостаточной растворимостью в воде, низкой стабильностью и восприимчивостью активных веществ к внешним воздействиям. Эти факторы ограничивают эффективность сохранения (Bajaj et al., 2023; Yadav et al., 2022). В последние годы для активных упаковочных пленок всё чаще используют наноэмульсии или эмульсии Пикеринга в качестве носителей функциональных агентов. Благодаря своей стабильности и антиоксидантной активности эти эмульсионные методы показывают значительный потенциал (Li et al., 2024; Wardana et al., 2021; Yuan et al., 2022). Антимикробные эмульсии могут быть приготовлены с использованием эмульгирующих свойств клеточных стенок дрожжей. Однако при их применении для консервирования фруктов возникают две основные проблемы: во-первых, антибактериальный эффект зависит от высвобождения активных веществ на поверхности плода, что приводит к снижению их концентрации и уменьшению эффективности. Во-вторых, эмульсии на основе полисахаридов могут накапливаться у основания плодов с гладкой кожурой, что снижает защиту и может вызывать повреждения. Сочетание антимикробной эмульсии из клеточной стенки дрожжей с такими покрытиями, как хитозан, целлюлоза, желатин, соевый белок и кукурузный глютеиновый белок, улучшает функциональность консервирующей пленки и свойства эмульсии. Такой подход помогает решить проблемы, возникающие при использовании технологий консервации на основе покрытий. Полисахариды КСД благодаря реологическим свойствам и биосовместимости могут использоваться как пленкообразователи самостоятельно или в композициях (Burak, 2023; Cottet et al., 2020). Novák et al. (2012) получили пленки из β -глюкана пекарских дрожжей с глицерином; пленки были плотными, водонерастворимыми и сохраняли структуру при длительном хранении. Delgado et al. (2018) изготовили тонкие пленки из дисперсий дрожжевой биомассы; взаимодействие белков и полисахаридов формировало пленочную

сеть с выраженными барьерными свойствами. Hou et al. (2019) сообщали об уменьшении потемнения яблок при маннановом покрытии; для винограда композиция (маннан + пропионат кальция + аскорбиновая кислота) снижала потерю массы и увеличивала долю здоровых плодов. Ограничением многих полисахаридных пленок является относительно слабая собственная антимикробная активность; для усиления эффекта вводят антимикробные агенты. Однако гидрофобные активы (включая эфирные масла) часто нестабильны и плохо совместимы с водной матрицей покрытия, что снижает воспроизводимость эффекта (Bajaj et al., 2023; Burak et al., 2023; Yadav et al., 2022). В этом контексте эмульсии и наноэмульсии (в том числе на основе КСД) рассматриваются как технологический путь повышения дисперсности и контролируемого высвобождения активов, но требуют оптимизации адгезии и равномерности нанесения на плоды.

Комплексирование с ионами металлов: функционализация и вопросы безопасности

Компоненты дрожжей и КСД несут функциональные группы, способные координировать катионы металлов и формировать комплексы (Chen et al., 2021; He et al., 2022; Khanzada et al., 2024; Kihara et al., 2023). Это обеспечивает потенциал КСД как биосорбентов и как матрицы для включения функциональных ионов. Например, Chen et al. (2021) показали способность дрожжевых клеток адсорбировать Cu^{2+} , а Shahzadi et al. (2023) продемонстрировали высокую ёмкость композитного сорбента на основе дрожжевой биомассы и хитозановых нановолокон по Cd^{2+} . Для послеуборочной консервации прикладной интерес может представлять создание покрытий / упаковочных компонентов, содержащих антимикробные ионы (например, Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ag^{+}) в связанном/контролируемо высвобождаемом виде. Однако для плодовых систем критичны вопросы миграции ионов, токсикологической безопасности, влияния на сенсорные свойства и соответствия регуляторным ограничениям; такие решения требуют отдельной комплексной оценки безопасности и эффективности в условиях, приближенных к реальному хранению.

Технологические аспекты промышленного внедрения

Масштабирование культивирования

Чтобы сделать дрожжи/КСД и их полисахариды коммерчески применимыми в послеуборочной обработке, необходимо увеличить выход биомассы и снизить стоимость получения целевых фракций (Gao et al., 2024; Wu et al.,

2024). Ключевым условием является масштабирование культивирования дрожжей — переход от лабораторных условий к промышленным при сохранении стабильных параметров роста и качества продукта. Масштабирование обычно реализуют поэтапно: оптимизация состава питательной среды в лабораторных условиях (включая статистические планы оптимизации), затем отработка параметров в лабораторных ферментёрах с контролем pH, температуры и растворённого кислорода, далее — пилотный уровень и промышленная ферментация. На каждом этапе требуется согласование режимов аэрации/перемешивания и стратегии подачи субстратов, поскольку биосинтез клеточной стенки и накопление биомассы чувствительны к составу среды и условиям культивирования (Droby et al., 2009). Перспективным направлением является культивирование с высокой плотностью клеток (HCDC, от англ. high cell density cultivation), повышающее производительность и снижающее удельные затраты за счет более эффективного использования сырья и оборудования (Poontawee et al., 2023; Lu et al., 2025). HCDC требует оптимизации штамма, состава среды (источники C/N и соли), параметров процесса (pH, температура, растворённый кислород) и режима кормления по технологическим индикаторам (например, остаточный сахар). Показано, что при интенсификации аэрации/перемешивания и использовании концентрированных субстратов возможно достижение 55,17 г/л биомассы в 5-л ферментёре (Malairuang et al., 2020), а при оптимизации подачи субстрата — до 200 г/л и производительности 5 г/(л·ч) (Ibañez et al., 2021).

Повышение содержания активных компонентов

Полисахариды клеточной стенки (прежде всего β-глюканы и хитин) рассматриваются как ключевые действующие компоненты, связанные с индукцией устойчивости. Поэтому увеличение их доли в клеточной стенке является одним из прямых путей усиления эффективности препаратов на основе КСД.

Модуляция условий культивирования

Клеточная стенка дрожжей — динамическая структура, перестраивающаяся в ответ на pH, осмотический и температурный стресс, аэрацию и обеспеченность питательными веществами. Управляя этими факторами, можно направленно изменять толщину стенки и содержание полисахаридов. Так, при скрининге УФ-мутантов пивных дрожжей были получены стрессоустойчивые варианты с повышенным содержанием глюкана, маннана и хитина (Li et al., 2014). При культивировании в депротеинизированном картофельном соке показана связь синтеза β-глюкана/маннопротеинов с глицерином и pH; при 5–10 % глицерина и pH 7,0 толщина стенки и слой

β-глюкана у *S. cerevisiae* R9 возрастали примерно в 2 раза и на 120 % соответственно (Bzducha-Wróbel et al., 2018). Кратковременная акклиматизация в среде с высоким сахаром (0,6 г/мл) увеличивала содержание хитина (с 6 до 6,9 мкг/мг) и глюкана (со 128 до 138 мкг/мг) в пересчете на сухую массу клеточной стенки (Guo et al., 2020).

Штаммовая модификация

Реконфигурация клеточной стенки при стрессах регулируется сигнальным путем целостности клеточной стенки (CWI, от англ. cell wall integrity), включающим мембранные сенсоры (Wsc1-3, Mid2, Mtl1) и каскад Rom2–Rho1–Pkc1–MAPK (Bck1–Mkk1/2–Slr2) с активацией транскрипционных факторов Rlm1 и SBF (Rodicio & Heinisch, 2010; Du et al., 2026). Активация CWI обычно сопровождается ростом доли глюканов и изменениями в синтезе хитина. Развитие молекулярных подходов позволяет получать штаммы с заданным составом стенки (Jofre et al., 2024). Rho1 рассматривается как центральный регулятор CWI, влияющий на β-1,3-глюкансинтазу и транспорт Chs3, необходимый для синтеза хитина. Показано, что экспрессия *rho1* (клонированного из *Cryptococcus*) в *S. cerevisiae* увеличивала доли хитина и глюкана и усиливала индуцирование устойчивости плодов груши к *P. expansum* (Lin et al., 2018). Генетические регуляторные решения, использующие элементы Rho1/Pkc1 и их мутантные формы, позволяли многократно (до 5 раз) повышать содержание хитина в клеточной стенке при совместном получении других продуктов (Nguyen et al., 2025).

В целом сочетание масштабируемой ферментации и управляемого повышения доли β-глюканов/маннопротеинов формирует технологическую базу для стабильного, воспроизводимого и экономически оправданного производства препаратов КСД, ориентированных на послеуборочное консервирование фруктов.

Безопасность применения

Доказанная безопасность

КСД в целом рассматриваются как безопасный пищевой материал, что поддерживается регуляторной практикой: ряд видов дрожжей (в т. ч. *S. cerevisiae*, *K. marxianus*) имеет статус GRAS в США, одобряется европейскими структурами и допускается в качестве пищевых добавок в Китае; соответственно, их клеточные стенки наследуют высокий базовый профиль безопасности (Ceugniet et al., 2017; Li et al., 2024). Основу КСД составляют полисахаридные полимеры, которые, как правило, не проявляют токсичности по «химическому» механизму; эффекты

обусловлены рецепторными взаимодействиями и/или ферментацией микробиотой. Отдельно отмечают низкую аллергенность дрожжевого хитина по сравнению с хитином ракообразных из-за отсутствия типичных аллергенных белков (Farinha et al., 2015; Muñoz et al., 2015). В практическом применении вещества КСД выполняют множество технологических функций. Благодаря своим эмульгирующим и водоудерживающим свойствам, они добавляются в различные продукты, такие как молочные продукты, выпечка и заправки, для улучшения текстуры, стабильности и питательной ценности. Fouchse et al. (2019) продемонстрировали, что кормление отъемышей рационом, содержащим 800 мг/кг маннана в течение 21 дня, положительно повлияло на структуру микробного сообщества в слепой кишке и увеличило высоту ворсинок в тощей кишке. Компоненты КСД уже используются как технологические ингредиенты (эмульгирующие/водоудерживающие компоненты) в пищевых продуктах и кормах. Описаны функциональные свойства в пищевых матрицах (например, устойчивость эмульсий, улучшение текстуры), а также иммуномодулирующее действие у животных. Результаты показали, что добавление маннитолгликопротеина улучшает состояние кожи при сухости. Анализ кишечной микробиоты показал, что по сравнению с плацебо маннитовый гликопротеин избирательно увеличивал относительную численность *Bacteroides thetaiotaomicron* и *Bacteroides ovatus*, снижал фекальные концентрации п-крезола, индола и метилиндола и повышал уровень эквола в моче (Tanihiro et al., 2020).

Потенциальные риски

Профили безопасности нетрадиционных антагонистических дрожжей (например, *Meyerozyma guilliermondii*, *Hanseniaspora sinensis*, *Cryptococcus laurentii*) изучены хуже, чем у *S. cerevisiae*: ограничены данные токсикологии, канцерогенности и клинической оценки. На практике ключевые риски чаще связаны не с КСД как таковыми, а с производством: возможное накопление тяжелых металлов из субстратов (например, мелассы), остаточные реагенты экстракции/очистки, микробиологическая контаминация при недостаточном санитарном контроле, а также редкий теоретический риск реакций у высокосенсибилизированных лиц (маннопротеины наружного слоя). Следует учитывать и риск ухудшения качества плодов при чрезмерной стимуляции защитных реакций: высокие дозы / частые обработки могут смещать метаболизм в сторону синтеза защитных соединений и сопровождаться нежелательными эффектами (горечь, локальное потемнение, нарушения созревания). Кроме того, полисахариды способны изменять микробное сообщество поверхности плода, что требует подбора дозировок и режимов применения. В целом риск, обусловленный самим материалом КСД, оценивается

как относительно низкий; критичны стандарты производства, контроль примесей и научно обоснованные режимы применения.

Ограничения исследования

Во-первых, несмотря на использование принципов систематического обзора, в работе не проводился количественный метаанализ. Это обусловлено существенной неоднородностью включенных исследований по объектам (вид/сорт плодов), патогенам, моделям инфицирования, условиям хранения, формату применения КСД (растворы, покрытия, пленки, комбинированные системы), а также по показателям результата (заболеваемость, индекс поражения, маркеры защитного ответа, параметры качества). В связи с этим сопоставление эффективности различных фракций КСД и технологических решений носит преимущественно качественный характер. Во-вторых, значительная часть доступных данных получена в лабораторных условиях или пилотных установках, часто на стандартизованных моделях ран и искусственного заражения, и реже — в условиях, приближенных к промышленным (реальные партии, вариабельность исходного сырья, колебания температуры/влажности, логистические цепочки, смешанные микробные сообщества). Следовательно, обобщенные выводы об эффективности КСД-подходов требуют дальнейшей валидации на уровнях пилотных и производственных испытаний. В-третьих, для части публикаций характерны ограниченная химическая характеристика КСД и недостаточная стандартизация сырья (штамм, условия культивирования, способ инактивации/экстракции, степень очистки). Это затрудняет установление связей «структура–функция» (например, роль молекулярной массы, степени разветвления β-глюкана или архитектуры маннана) и снижает воспроизводимость сравнения результатов между работами.

В-четвертых, раздел, посвященный безопасности, опирается преимущественно на регуляторный статус пищевых дрожжей и обобщенные данные по дрожжевым ингредиентам. Однако для конкретных препаратов КСД критически важны параметры производства и контроля качества (примеси, остаточные реагенты, микробиологическая чистота, тяжелые металлы), которые в публикациях описаны не всегда полно. Поэтому оценка безопасности и технологической применимости должна уточняться для каждой конкретной технологии получения и рецептуры. Наконец, ограничения могли быть обусловлены языковыми и базовыми рамками поиска (английский/русский; выбранные базы данных), а также неполнотой «серой» литературы и внутренних отраслевых отчетов, которые потенциально содержат результаты прикладных испытаний, но ограниченно доступны для научного анализа.

ВЫВОДЫ

Производные клеточной стенки дрожжей (КСД) и их полисахариды представляют перспективную биооснову для устойчивой послеуборочной обработки фруктов, позволяющую снижать зависимость от химических фунгицидов при сохранении качества продукции. Основные функционально значимые компоненты КСД — хитин, β -глюканы и маннопротеины — обеспечивают комплексное действие, включающее индукцию устойчивости плодов, вклад в ограничение развития патогенов, потенциальную адсорбцию отдельных микотоксинов и модуляцию физиологического метаболизма плодов. Материалы на основе КСД могут выступать не только как биоэлиситоры, но и как технологические матрицы: служить носителями биоактивных соединений, компонентами съедобных покрытий и систем контролируемого высвобождения, а также эмульгирующими агентами. Такой подход повышает стабильность активных веществ и обеспечивает сочетание быстрого поверхностного антимикробного эффекта (за счет введенных активов) и более длительной защиты, связанной с индуцированной резистентностью. Перспективы промыш-

ленного использования КСД-препаратов определяются возможностью крупномасштабного культивирования дрожжей и снижением затрат на получение целевых фракций. К ключевым направлениям относятся: высокоплотное культивирование, оптимизация условий ферментации и целенаправленное повышение доли β -глюканов и хитина за счет подбора режимов культивирования и разработки специализированных штаммов, влияющих на путь поддержания целостности клеточной стенки. Суммарно доступные данные указывают, что КСД, полученные из пищевых дрожжей, характеризуются приемлемым уровнем безопасности для применения в пищевых системах при условии соблюдения регламентов производства и контроля качества (примеси, остаточные реагенты, микробиологическая чистота, тяжелые металлы). Дальнейшие исследования целесообразно направить на стандартизацию составов и методов характеристики, валидацию эффективности в условиях промышленной логистики и оптимизацию технологических схем, обеспечивающих воспроизводимость и технологическую реализуемость решений на основе КСД.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCE

- Al-Sahlany, S. T. G., Al-Kaabi, W. J., AlManhel, A. J. A., et al. (2022). Effects of β -glucan extracted from *Saccharomyces cerevisiae* on the quality of bio-yoghurts: In vitro and in vivo evaluation. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 16(5), 3607–3617. <http://dx.doi.org/10.1007/s11694-022-01468-1>
- Aronbaev, S. D., Nasimov, A. M., Aronbaev D. M. (2013). Application of physicochemical methods in the study of cell walls of *Saccharomyces cerevisiae* yeast. *Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*, 2, 83–88.
- Baek, K.-R., Ramakrishnan, S. R., Kim, S.-J., & Seo, S.-O. (2024). Yeast cell wall mannan structural features, biological activities, and production strategies. *Heliyon*, 10(6), e27896. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27896>
- Bahrami, R., Ebrahimi, B., Hameed Awlqadr, F., et al. (2025). Assessment of selenium-enriched deactivated probiotic yeast efficiency in patulin detoxification in apple juice. *Food Control*, 168, 110880. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110880>
- Bajaj, K., Adhikary, T., Gill, P. P. S., & Kumar, A. (2023). Edible coatings enriched with plant-based extracts preserve postharvest quality of fruits: A review. *Progress in Organic Coatings*, 182, 107669. <http://dx.doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107669>
- Bastos, R., Oliveira, P. G., Gaspar, V. M., Mano, J. F., Coimbra, M. A., & Coelho, E. (2022). Brewer's yeast polysaccharides: A review of their exquisite structural features and biomedical applications. *Carbohydrate Polymers*, 277, 118826. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118826>
- Benito-Román, Ó., Alonso, E., & Cocero, M. J. (2013). Pressurized hot water extraction of β -glucans from waxy barley. *The Journal of Supercritical Fluids*, 73, 120–125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2012.09.014>
- Berzosa, A., Marín-Sánchez, J., Álvarez, I., Sánchez-Gimeno, C., & Raso, J. (2024). Pulsed electric field technology for the extraction of glutathione from *Saccharomyces cerevisiae*. *Foods*, 13(12), 1916. <http://dx.doi.org/10.3390/foods13121916>
- Borchani, C., Fonteyn, F., Jamin, G., Paquot, M., Blecker, C., & Thonart, P. (2014). Enzymatic process for the fractionation of baker's yeast cell wall (*Saccharomyces cerevisiae*). *Food Chemistry*, 163, 108–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.086>

- Burak, L. Ch. (2025). Modern methods of blanching and their influence on the process of drying fruits and vegetables. *Proceedings of Murmansk State Technical University*, 28(2), 273–295. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-2-273-295>
- Burak, L. Ch., Ermoshina, T. V., Samankova, N. V. (2025). Sustainable production. quality concept 4.0. *Fundamental research*, 9, 81–90. <https://doi.org/10.17513/fr.43905>
- Burak, L. Ch. (2024). Using modern processing technologies to extend the shelf life of fruits and vegetables. summary of the subject field. *Polzunovsky Vestnik*, 1, 99–119. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>
- Burak, L. Ch., Zavaalei A.P. (2024). The effectiveness of the combined effects of ultrasound and microwaves in food processing. *Review Equipment and technology of food production*, 54(2), 342–357. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>
- Burak, L. Ch. (2023). A review of the development of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovsky Vestnik*, 1, 91–105. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012>
- Burak, L. Ch., Sapach, A. N., Pisarik, M. I. (2023). Intelligent Packaging for Fruits and Vegetables, Classification and Application Prospects: A Review of the Subject Field. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 51–80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>
- Bzducha-Wróbel, A., Błażej, S., Kieliszek, M., Pobiega, K., Falana, K., & Janowicz, M. (2018). Modification of the cell wall structure of *Saccharomyces cerevisiae* strains during cultivation on waste potato juice water and glycerol towards biosynthesis of functional polysaccharides. *Journal of Biotechnology*, 281, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiotec.2018.06.305>
- Caruso, M. A., Piermaria, J. A., Abraham, A. G., & Medrano, M. (2022). β -Glucans obtained from beer spent yeasts as functional food grade additive: Focus on biological activity. *Food Hydrocolloids*, 133, 107963. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107963>
- Ceugniet, A., Coucheney, F., Jacques, P., Daube, G., Delcenserie, V., & Drider, D. (2017). Anti-Salmonella activity and probiotic trends of *Kluyveromyces marxianus* S-2-05 and *Kluyveromyces lactis* S-3-05 isolated from a French cheese, Tomme d'Orchies. *Research in Microbiology*, 168(6), 575–582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resmic.2017.03.004>
- Chagas, B., Farinha, I., Galinha, C. F., Freitas, F., & Reis, M. A. M. (2014). Chitin–glucan complex production by *Komagataella (Pichia) pastoris*: Impact of cultivation pH and temperature on polymer content and composition. *New Biotechnology*, 31(5), 468–474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nbt.2014.06.005>
- Chraniuk, P., & Bzducha-Wróbel, A. (2025). Functional Properties of Yeast Mannoproteins—Current Knowledge and Future Perspectives. *Fermentation*, 11(7), 374. <https://doi.org/10.3390/fermentation11070374>
- Chen, X., Tian, Z., Cheng, H., Xu, G., & Zhou, H. (2021). Adsorption process and mechanism of heavy metal ions by different components of cells, using yeast (*Pichia pastoris*) and Cu^{2+} as biosorption models. *RSC Advances*, 11(28), 17080–17091. <http://dx.doi.org/10.1039/d0ra09744f>
- Chowdhury, R., Mim, S. J., Tasnim, A., Ng, K. T. W., & Richter, A. (2025). Supply-disposition storage of fresh fruits and vegetables and food loss in the Canadian supply chain. *Ecological Indicators*, 170, 113063. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113063>
- Cottet, C., Ramirez-Tapias, Y. A., Delgado, J. F., de la Osa, O., Salvay, A. G., & Peltzer, M. A. (2020). Biobased materials from microbial biomass and its derivatives. *Materials (Basel)*, 13(6), 1263. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13061263>
- da Silva Costa, J. R., do Vale, T. L., da Silva, G. F., et al. (2024). Encapsulation of carvacrol and thymol with yeast cell wall and its repellent activity against *Amblyomma sculptum* and *Rhipicephalus sanguineus* (sensu lato). *Experimental and Applied Acarology*, 92(3), 555–565. <http://dx.doi.org/10.1007/s10493-023-00896-y>
- de Melo, A. N. F., de Souza, E. L., da Silva Araujo, V. B., & Magnani, M. (2015). Stability, nutritional and sensory characteristics of French salad dressing made with mannoprotein from spent brewer's yeast. *LWT—Food Science and Technology*, 62(1), 771–774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.050>
- Delgado, J. F., Peltzer, M. A., Salvay, A. G., de la Osa, O., & Wagner, J. R. (2018). Characterization of thermal, mechanical and hydration properties of novel films based on *Saccharomyces cerevisiae* biomass. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 48, 240–247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.017>
- Dikit, P., Maneerat, S., Musikasang, H., & H-kittikun, A. (2010). Emulsifier properties of the mannoprotein extract from yeast isolated from sugar palm wine. *ScienceAsia*, 36(4), 312–318. <http://dx.doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2010.36.312>
- Ding, X., Zhu, X., Ye, L., et al. (2019). The interaction of CpEBF1 with CpMADSs is involved in cell wall degradation during papaya fruit ripening. *Horticulture Research*, 6(1), 13. <http://dx.doi.org/10.1038/s41438-018-0095-1>

- Dong, J., Yu, Q., Lu, L., & Xu, M. (2012). Effect of yeast saccharide treatment on nitric oxide accumulation and chilling injury in cucumber fruit during cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 68, 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.01.005>
- Dou, F., Huang, K., & Nitin, N. (2021). Targeted photodynamic treatment of bacterial biofilms using curcumin encapsulated in cells and cell wall particles. *ACS Applied Bio Materials*, 4(1), 514–522. <http://dx.doi.org/10.1021/acsabm.0c01051>
- Droby, S., Wisniewski, M., Macarisin, D., & Wilson, C. (2009). Twenty years of postharvest biocontrol research: Is it time for a new paradigm? *Postharvest Biology and Technology*, 52(2), 137–145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.11.009>
- Du, J., Zhao, Y., Meng, L., et al. (2026). Cell wall integrity pathway regulates red pigment secretion in Antarctic fungi *Geomyces Wnf-18c*. *Food Microbiology*, 133, 104890. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fm.2025.104890>
- Dwibedi, V., Kaur, G., George, N., Rana, P., Ge, Y., & Sun, T. (2024). Research progress in the preservation and packaging of fruits and vegetables: From traditional methods to innovative technologies. *Food Packaging and Shelf Life*, 46, 101385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fpsl.2024.101385>
- Farinha, I., Duarte, P., Pimentel, A., et al. (2015). Chitin-glucan complex production by *Komagataella pastoris*: Downstream optimization and product characterization. *Carbohydrate Polymers*, 130, 455–464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.034>
- Fesel, P. H., & Zuccaro, A. (2016). β -Glucan: Crucial component of the fungal cell wall and elusive MAMP in plants. *Fungal Genetics and Biology*, 90, 53–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2015.12.004>
- Firoozmand, H., & Rousseau, D. (2016). Microbial cells as colloidal particles: Pickering oil-in-water emulsions stabilized by bacteria and yeast. *Food Research International*, 81, 66–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2015.10.018>
- Fouhse, J. M., Dawson, K., Graugnard, D., Dyck, M., & Willing, B. P. (2019). Dietary supplementation of weaned piglets with a yeast-derived mannan-rich fraction modulates cecal microbial profiles, jejunal morphology and gene expression. *Animal*, 13(8), 1591–1598. <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731118003361>
- Free, S. J. (2013). Chapter Two—Fungal cell wall organization and biosynthesis. In T. Friedmann, J. C. Dunlap, & S. F. Goodwin (Eds.), *Advances in Genetics* (Vol. 81, pp. 33–82). Academic Press.
- Freimund, S., Sauter, M., Käppeli, O., & Dutler, H. (2003). A new non-degrading isolation process for 1,3- β -D-glucan of high purity from baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Carbohydrate Polymers*, 54(2), 159–171. [http://dx.doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00162-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00162-0)
- Gao, S., Zhang, Y., Sun, Q., Guo, Z., Zhang, D., & Zou, X. (2024). Enzyme-assisted patulin detoxification: Recent applications and perspectives. *Trends in Food Science & Technology*, 146, 104383. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104383>
- Gogoi, P., Ali, A., Sarkar, A., Bharali, P., & Saikia, R. (2025). Rhizobacteria induced systemic resistance in *Capsicum* spp.: Strategies to improve biotic stress tolerance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 102930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102930>
- Guo, H., Qiu, Y., Wei, J., Zhang, Y., Yuan, Y., & Yue, T. (2020). Hyperosmotic stress response of *Saccharomyces cerevisiae* cell wall and cell membrane. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51(06), 346–352. <http://dx.doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.037>
- Guo, J., Sun, K., Zhang, Y., et al. (2021). SIMAPK3, a key mitogen-activated protein kinase, regulates the resistance of cherry tomato fruit to *Botrytis cinerea* induced by yeast cell wall and β -glucan. *Postharvest Biology and Technology*, 171, 111350. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111350>
- He, L., Guo, J., Wang, Y., et al. (2022). Effects of dietary yeast β -glucan supplementation on meat quality, antioxidant capacity and gut microbiota of finishing pigs. *Antioxidants*, 11(7), 1340. <http://dx.doi.org/10.3390/antiox11071340>
- He, M., Xu, Y., Qiao, Y., et al. (2022). A novel yeast strain *Geotrichum* sp. CS-67 capable of accumulating heavy metal ions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 236, 113497. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113497>
- Hong, K., Yao, Q., Golding, J. B., et al. (2023). Low temperature storage alleviates internal browning of 'Comte De Paris' winter pineapple fruit by reducing phospholipid degradation, phosphatidic acid accumulation and membrane lipid peroxidation processes. *Food Chemistry*, 404, 134656. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134656>
- Hou, Y., Mengchen, X., Wu, P., et al. (2019). Extraction and purification of mannan from yeast and its used for fruit preservation. *Chemical Research*, 30(02), 197–201. <http://dx.doi.org/10.14002/j.hxya.2019.02.016>
- Ibáñez, F., Saa, P. A., Bárzaga, L., et al. (2021). Robust control of fed-batch high-cell density cultures: A simulation-based assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 155, 107545. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107545>

- Ji, Q., Yang, Q., Dhanasekaran, S., Ma, J., & Zhang, H. (2024). Hannaella sinensis, a promising biocontrol agent for combating postharvest pear fruit diseases and patulin degradation. *Food Control*, 164, 110618. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110618>
- Jiang, Y., Wu, Y., Zheng, X., Yu, T., & Yan, F. (2024). Current insights into yeast application for reduction of patulin contamination in foods: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(6), e70044. <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.70044>
- Jofre, F. M., Queiroz, S. d. S., Sanchez, D. A., Arruda, P. V., d. Santos, J. C., & Felipe, M. d. G. d. A. (2024). Biotechnological potential of yeast cell wall: An overview. *Biotechnology Progress*, 40(6), e3491. <http://dx.doi.org/10.1002/btpr.3491>
- Ju, W., Lee, J.-H., Do, E., et al. (2025). Controlled atmosphere storage enhances Korean melon shelf life and quality: A comparative metabolic analysis with reefer container export. *Postharvest Biology and Technology*, 219, 113238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.113238>
- Kachroo, A., & Kachroo, P. (2020). *Current Opinion in Plant Biology*, 58, 41–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2020.10.004>
- Kavetsou, E., Koutsoukos, S., Daferera, D., et al. (2019). Mobile signals in systemic acquired resistance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(17), 4746–4753. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05149>
- Kalebina T.S., Kulakovskaya E. V., Rekstina V. V, et al. (2023). Effect of deletion of genes encoding Pho3p and Bgl2p on polyphosphate levels, stress adaptation, and cell wall anchoring of these proteins in *Saccharomyces cerevisiae*. *Biochemistry*, 88(1), 125–135. <https://doi.org/10.31857/S0320972523010098>
- Kavosi, M., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, R., Khaksar, R., & Hosseini, S. M. (2017). Characterization and oxidative stability of purslane seed oil microencapsulated in yeast cells biocapsules. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(7), 2490–2497. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.8696>
- Khanzada, A. K., Al-Hazmi, H. E., Kurniawan, T. A., et al. (2024). Hydrochar as a bio-based adsorbent for heavy metals removal: A review of production processes, adsorption mechanisms, kinetic models, regeneration and reusability. *Science of the Total Environment*, 945, 173972. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173972>
- Kihara, M., Ojima, Y., & Azuma, M. (2023). Adsorption of rare earth ions from synthetic seawater and hot spring water using phosphorylated yeast. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103093. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2023.103093>
- Kong, Y., Chen, J., Hong, Z., Guo, R., & Huang, Q. (2025). Insights into the Pickering emulsions stabilized by yeast dietary fiber: Interfacial adsorption kinetics, rheological characteristics, and stabilization mechanisms. *Food Chemistry*, 464, 141924. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141924>
- Kour, D., Negi, R., Khan, S. S., et al. (2024). Microbes mediated induced systemic response in plants: A review. *Plant Stress*, 11, 100334. <http://dx.doi.org/10.1016/j.stress.2023.100334>
- Langer, S. E., Oviedo, N. C., Marina, M., et al. (2018). Effects of heat treatment on enzyme activity and expression of key genes controlling cell wall remodeling in strawberry fruit. *Plant Physiology and Biochemistry*, 130, 334–344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.015>
- Lesage, G., & Bussey, H. (2006). Cell wall assembly in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 70(2), 317–343. <http://dx.doi.org/10.1128/MMBR.00038-05>
- Levin, D. E. (2011). Regulation of cell wall biogenesis in *Saccharomyces cerevisiae*: The cell wall integrity signaling pathway. *Genetics*, 189(4), 1145–1175. <http://dx.doi.org/10.1534/genetics.111.128264>
- Li, C., Xia, Y., Xiang, F., et al. (2025).). β -Aminobutyric acid activates SA-signalling systemic acquired resistance in peach fruit by suppressing the circadian clock associated protein1. *International Journal of Biological Macromolecules*, 300, 140040. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140040>
- Li, G., Liang, H., Gao, R., et al. (2024). Yeast metabolism adaptation for efficient terpenoids synthesis via isopentenol utilization. *Nature Communications*, 15(1), 9844. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-54298-8>
- Li, H., Liu, M., Han, S., et al. (2024). Edible chitosan-based Pickering emulsion coatings: Preparation, characteristics, and application in strawberry preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130672. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130672>
- Li, Q., Xie, F., Zhao, Y., & Cao, J. (2021). Inhibitory effect of postharvest yeast mannan treatment on *Alternaria* rot of tomato fruit involving the enhancement of hemicellulose polysaccharides and antioxidant metabolism. *Scientia Horticulturae*, 277, 109798. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109798>
- Li, X., Chen, O., Wang, W., et al. (2025). Advances and perspectives in biological control of postharvest fungal decay in citrus fruit utilizing yeast antagonists. *International Journal of Food Microbiology*, 432, 111093. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2025.111093>

- Li, X. E., Wang, J. J., Phornsanthia, S., Yin, X., & Li, Q. (2014). Strengthening of cell wall structure enhances stress resistance and fermentation performance in lager yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 72(2), 88–94. <http://dx.doi.org/10.1094/ASBCJ-2014-0320-01>
- Li, Y., Wang, X., Zhou, N.-Y., & Ding, J. (2024). Yeast surface display technology: Mechanisms, applications, and perspectives. *Biotechnology Advances*, 76, 108422. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108422>
- Lieu, M. D., Phuong, T. V., Nguyen, T. T. B., Dang, T. K. T., & Nguyen, T. H. (2024). A review of preservation approaches for extending avocado fruit shelf-life. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101102>
- Lin, M., Zhang, Y., Sun, C., et al. (2018). Characterization and overexpression of RH01 from *Cryptococcus laurentii* ZJU10 activates CWI signaling pathway on enhancing the inhibition of blue mold on pears. *International Journal of Food Microbiology*, 278, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.04.022>
- Liu, Y., Huang, G., & Lv, M. (2018). Extraction, characterization and antioxidant activities of mannan from yeast cell wall. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 952–956. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.145>
- Lu, T., Liu, F., Jiang, C., Cao, J., Ma, X., & Su, E. (2025). Strategies for cultivation, enhancing lipid production, and recovery in oleaginous yeasts. *Bioresource Technology*, 416, 131770. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131770>
- Ma, P., Jia, X., Zhang, X., et al. (2024). Ion-chelated porous chitosan nanocrystal for highly efficient postharvest preservation. *Matter*, 7(7), 2567–2580. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matt.2024.06.004>
- Mabusela, B. P., Belay, Z. A., Godongwana, B., Pathak, N., Mahajan, P. V., & Caleb, O. J. (2022). Advances in vacuum ultraviolet photolysis in the postharvest management of fruit and vegetables along the value chains: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 15(1), 28–46. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-021-02703-1>
- Magnani, M., Calliari, C. M., de Macedo, F. C., Mori, M. P., de Syllos Cólus, I. M., & Castro-Gomez, R. J. H. (2009). Optimized methodology for extraction of (1→3)(1→6)-β-D-glucan from *Saccharomyces cerevisiae* and in vitro evaluation of the cytotoxicity and genotoxicity of the corresponding carboxymethyl derivative. *Carbohydrate Polymers*, 78(4), 658–665. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.05.023>
- Malairuang, K., Krajang, M., Sukna, J., Rattanapradit, K., & Chamsart, S. (2020). High cell density cultivation of *Saccharomyces cerevisiae* with intensive multiple sequential batches together with a novel technique of fed-batch at cell level (FBC). *Processes*, 8(10), 1321. <http://dx.doi.org/10.3390/pr8101321>
- Manowan, P., Anh To, H. T., & Prakitchaiwattana, C. (2025). Biocontrol mechanisms and antimicrobial gene expression of *Bacillus* 63–10 and impact on microbial ecosystems of fruit; quality and shelf life. *Food Control*, 172, 111160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111160>
- Martínez, J. M., Cebrián, G., Álvarez, I., & Raso, J. (2016). Release of mannoproteins during *Saccharomyces cerevisiae* autolysis induced by pulsed electric field. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1435. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2016.01435>
- Martins, Z. E., Pinho, O., & Ferreira, I. (2018). Impact of new ingredients obtained from brewer's spent yeast on bread characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 55(5), 1966–1971. <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-018-3107-0>
- Mditshwa, A., Khaliq, G., Hussein, Z., & Ejaz, S. (2023). Editorial: Sustainable postharvest management practices for fresh produce. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1143759. <http://dx.doi.org/10.3389/fsufs.2023.1143759>
- Mekoue Nguela, J., Vernhet, A., Sieczkowski, N., & Brillouet, J. M. (2015). Interactions of condensed tannins with *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells and cell walls: Tannin location by microscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(34), 7539–7545. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.5b02241>
- Mirza, Z., Soto, E. R., Dikengil, F., Levitz, S. M., & Ostroff, G. R. (2017). Beta-glucan particles as vaccine adjuvant carriers. *Methods in Molecular Biology*, 1625, 143–157. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-7104-6_11
- Moreira, T. C. P., da Silva, V. M., Gombert, A. K., & da Cunha, R. L. (2016). Stabilization mechanisms of oil-in-water emulsions by *Saccharomyces cerevisiae*. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 143, 399–405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.03.043>
- Muñoz, G., Valencia, C., Valderruten, N., Ruiz-Durántez, E., & Zuluaga, F. (2015). Extraction of chitosan from *Aspergillus niger* mycelium and synthesis of hydrogels for controlled release of betahistidine. *Reactive and Functional Polymers*, 91–92, 1–10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2015.03.008>
- Narsipur, S., He, Q., Kew, B., Ferreira, C., & Sarkar, A. (2025). Utilisation of yeast biomass to stabilise oil-in-water emulsions. *Food Chemistry*, 495, 146572. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146572>

- Nejadmansouri, M., Eskandari, M. H., Yousefi, G. H., Riazi, M., & Hosseini, S. M. H. (2023). Promising application of probiotic microorganisms as Pickering emulsions stabilizers. *Scientific Reports*, 13(1), 15915. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-43087-w>
- Nerome, S., Yokota, N., Ojima, Y., & Azuma, M. (2021). Evaluating β -1,3-glucan synthesis inhibition using emulsion formation as an indicator. *Journal of Microbiological Methods*, 190, 106327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106327>
- Nguyen, A., Tunn, I., Penttilä, M., & Frey, A. D. (2025). Enhancing chitin production as a fermentation byproduct through a genetic toolbox that activates the cell wall integrity response. *ACS Synthetic Biology*, 14(1), 113–128. <http://dx.doi.org/10.1021/acssynbio.4c00436>
- Nimitkeatkai, H., Apiwatanapiwat, W., Janchai, P., et al. (2024). Valorization of freshwater crab shell residues to chitosan for postharvest quality of mango (*Mangifera indica* L.) by fruit coating. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101441. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101441>
- Novák, M., Synytsya, A., Gedeon, O., et al. (2012). Yeast β (1-3),(1-6)-D-glucan films: Preparation and characterization of some structural and physical properties. *Carbohydrate Polymers*, 87(4), 2496–2504. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.031>
- Oliveira, M. D. M., Varanda, C. M. R., & Félix, M. R. F. (2016). Induced resistance during the interaction pathogen X plant and the use of resistance inducers. *Phytochemistry Letters*, 15, 152–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.phytol.2015.12.011>
- OZKAYA, O., ÇÖMLEKÇIOĞLU, S., & DEMIRCIÖĞLU, H. (2014). Assessment of the Potential of 1-Methylcyclopropene Treatments to Maintain Fruit Quality of the Common Fig (*Ficus carica* L. cv. 'Bursa Siyahi') during Refrigerated Storage. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42(2), 516–522. <https://doi.org/10.15835/nbha4229647>
- Patterson, R., Rogiewicz, A., Kiarie, E. G., & Slominski, B. A. (2022). Yeast derivatives as a source of bioactive components in animal nutrition: A brief review. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1067383. <http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2022.1067383>
- Pengkumsri, N., Sivamaruthi, B. S., Sirilun, S., et al. (2017). Extraction of β -glucan from *Saccharomyces cerevisiae*: Comparison of different extraction methods and in vivo assessment of immunomodulatory effect in mice. *Food Science and Technology (Brazil)*, 37(1), 124–130. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457X.10716>
- Pereyra, C. M., Cavaglieri, L. R., Chiacchiera, S. M., & Dalcero, A. (2013). The corn influence on the adsorption levels of aflatoxin B1 and zearalenone by yeast cell wall. *Journal of Applied Microbiology*, 114(3), 655–662. <http://dx.doi.org/10.1111/jam.12082>
- Pétriaccq, P., López, A., & Luna, E. (2018). Fruit decay to diseases: Can induced resistance and priming help? *Plants*, 7(4), 77. <http://dx.doi.org/10.3390/plants7040077>
- Poontawee, R., Lorliam, W., Polburee, P., & Limtong, S. (2023). Oleaginous yeasts: Biodiversity and cultivation. *Fungal Biology Reviews*, 44, 100295. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbr.2022.11.003>
- Prasad, K., Asrey, R., Sethi, S., et al. (2024). Preservation potential of essential oils on the postharvest quality and shelf-life attributes of mango fruit. *South African Journal of Botany*, 172, 8–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sajb.2024.07.016>
- Prusky, D. B., & Wilson, R. A. (2018). Does increased nutritional carbon availability in fruit and foliar hosts contribute to modulation of pathogen colonization? *Postharvest Biology and Technology*, 145, 27–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.05.001>
- Qin, F., Sletmoen, M., Stokke, B. T., & Christensen, B. E. (2013). Higher order structures of a bioactive, water-soluble (1→3)- β -D-glucan derived from *Saccharomyces cerevisiae*. *Carbohydrate Polymers*, 92(2), 1026–1032. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.10.013>
- Rodicio, R., & Heinisch, J. J. (2010). Together we are strong: Cell wall integrity sensors in yeasts. *Yeast*, 27(8), 531–540. <http://dx.doi.org/10.1002/yea.1785>
- Rodrigues, A., Ricardo-Da-Silva, J. M., Lucas, C., & Laureano, O. (2012). Effect of commercial mannoproteins on wine colour and tannins stability. *Food Chemistry*, 131(3), 907–914. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.075>
- Romanazzi, G., Sanzani, S. M., Bi, Y., Tian, S., Gutiérrez Martínez, P., & Alkan, N. (2016). Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 122, 82–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.08.003>
- Ru, Y., Zhu, Y., Wang, X., Dong, Q., & Ma, Y. (2024). Edible antimicrobial yeast-based coating with basil essential oil for enhanced food safety. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 93, 103612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103612>

- Sánchez-Vallet, A., Mesters, J. R., & Thomma, B. P. H. J. (2015). The battle for chitin recognition in plant–microbe interactions. *FEMS Microbiology Reviews*, 39(2), 171–183. <http://dx.doi.org/10.1093/femsre/fuu003>
- Shahzadi, I., Wu, Y., Lin, H., et al. (2023). Yeast biomass ornamented macro-hierarchical chitin nanofiber aerogel for enhanced adsorption of cadmium(II) ions. *Journal of Hazardous Materials*, 453, 131312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131312>
- Shen, H., Wei, Y., Wang, X., Xu, C., & Shao, X. (2019). The marine yeast *Sporidiobolus pararoseus* ZMY-1 has antagonistic properties against *Botrytis cinerea* in vitro and in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 150, 1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.12.009>
- Shi, G., Rao, L., Yu, H., et al. (2007). Yeast-cell-based microencapsulation of chlorogenic acid as a water-soluble antioxidant. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1060–1067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.038>
- Shi, G., Rao, L., Yu, H., Xiang, H., Yang, H., & Ji, R. (2008). Stabilization and encapsulation of photosensitive resveratrol within yeast cell. *International Journal of Pharmaceutics*, 349(1), 83–93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpharm.2007.07.044>
- Shine, M. B., Xiao, X., Kachroo, P., & Kachroo, A. (2019). Signaling mechanisms underlying systemic acquired resistance to microbial pathogens. *Plant Science*, 279, 81–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.01.001>
- Smith, H., Grant, S., Parker, J., & Murphy, R. (2020). Yeast cell wall mannan rich fraction modulates bacterial cellular respiration potentiating antibiotic efficacy. *Scientific Reports*, 10(1), 21880. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-78855-5>
- Snyman, C., Mekoue Nguela, J., Sieczkowski, N., Marangon, M., & Divol, B. (2021). Optimised extraction and preliminary characterisation of mannoproteins from non-*Saccharomyces* wine yeasts. *Foods*, 10(5), 924. <http://dx.doi.org/10.3390/foods10050924>
- Soto, E. R., Rus, F., & Ostroff, G. R. (2022). Yeast particles hyper-loaded with terpenes for biocide applications. *Molecules*, 27(11), 3580. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules27113580>
- Soto, E. R., Rus, F., Mirza, Z., & Ostroff, G. R. (2023). Yeast particles for encapsulation of terpenes and essential oils. *Molecules*, 28(5), 2273. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules28052273>
- Sun, C., Fu, D., Jin, L., Chen, M., Zheng, X., & Yu, T. (2018). Chitin isolated from yeast cell wall induces the resistance of tomato fruit to *Botrytis cinerea*. *Carbohydrate Polymers*, 199, 341–352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.045>
- Sun, C., Fu, D., Lu, H., Zhang, J., Zheng, X., & Yu, T. (2018). Autoclaved yeast enhances the resistance against *Penicillium expansum* in postharvest pear fruit and its possible mechanisms of action. *Biological Control*, 119, 51–58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.01.010>
- Sun, C., Jin, L., Cai, Y., Zheng, X., & Yu, T. (2019). 1,3-β-D-glucan from yeast cell wall: Characteristic and potential application in controlling postharvest disease of pear. *Postharvest Biology and Technology*, 154, 105–114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.04.021>
- Sun, C., Lin, M., Fu, D., et al. (2018). Yeast cell wall induces disease resistance against *Penicillium expansum* in pear fruit and the possible mechanisms involved. *Food Chemistry*, 241, 301–307. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.092>
- Sun, K., Zhang, X., Wei, Z., et al. (2023). Analysis of metabolic and transcription levels provides insights into the interactions of plant hormones and crosstalk with MAPKs in the early signaling response of cherry tomato fruit induced by the yeast cell wall. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 6, 100160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100160>
- Sun, X., Cao, J., Chen, N., Long, L., & Yang, X. (2011). Effect of yeast mannan treatment on storage characteristics and brown rot disease of plum fruits. *Food Science*, 32(06), 261–264. <http://dx.doi.org/10.7506/spkx1002-6630-201106060>
- Tan, C., Huang, M., McClements, D. J., Sun, B., & Wang, J. (2021). Yeast cell-derived delivery systems for bioactives. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 362–373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.020>
- Tan, C., Wang, J., & Sun, B. (2021). Polysaccharide dual coating of yeast capsules for stabilization of anthocyanins. *Food Chemistry*, 357, 129652. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129652>
- Tanihiro, R., Sakano, K., Oba, S., et al. (2020). Effects of yeast mannan which promotes beneficial *Bacteroides* on the intestinal environment and skin condition: A randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Nutrients*, 12(12), 3673. <http://dx.doi.org/10.3390/nu12123673>
- Walters, D. R., & Fountaine, J. M. (2009). Practical application of induced resistance to plant diseases: An appraisal of effectiveness under field conditions. *Journal of Agricultural Science*, 147(5), 523–535. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859609008806>

- Walters, D. R., Ratsep, J., & Havis, N. D. (2013). Controlling crop diseases using induced resistance: Challenges for the future. *Journal of Experimental Botany*, 64(5), 1263–1280. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ert026>
- Wang, C., Hou, X., Liu, J., Sun, X., & Zhao, G. (2025). Investigation on physicochemical properties and biological activities of yeast nanosized β -glucan. *LWT*, 225, 117939. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117939>
- Wang, K., Zhu, G., Li, Y.-l., et al. (2023). Non-thermal effects of microwave irradiation alleviates postharvest chilling injury of peach fruit by retarding phenolic accumulation and enhancing membrane stability. *Food Chemistry*, 411, 135448. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135448>
- Wang, X.-d., Bi, W.-s., Gao, J., Yu, X.-m., Wang, H.-y., & Liu, D.-q. (2018). Systemic acquired resistance, NPR1, and pathogenesis-related genes in wheat and barley. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(11), 2468–2477. [http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61852-5](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61852-5)
- Wang, Y., Huang, J., Luo, Y., Wang, Y., & Liu, Y. (2025). Lauric acid surface modification enhances interfacial properties of natural yeast particles for stabilizing Pickering emulsions. *Food Chemistry*, 493, 145883. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145883>
- Wardana, A. A., Koga, A., Tanaka, F., & Tanaka, F. (2021). Antifungal features and properties of chitosan/sandalwood oil Pickering emulsion coating stabilized by appropriate cellulose nanofiber dosage for fresh fruit application. *Scientific Reports*, 11(1), 18412. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-98074-w>
- Wu, F., Wang, H., Lin, Y., Feng, S., & Li, X. (2025). Biocontrol mechanisms of antagonistic yeasts on postharvest fruits and vegetables and the approaches to enhance the biocontrol potential of antagonistic yeasts. *International Journal of Food Microbiology*, 430, 111038. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.111038>
- Wu, L., Liu, C., Yan, Z., Tang, H., Sun, H., & Zhu, Z. (2024). Effect of 1-MCP treatment on cellulase activity and its gene expression to improve postharvest quality of custard apple fruit. *Process Biochemistry*, 139, 58–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2024.02.001>
- Wu, Y., Zhao, N., Jiang, Y., Zheng, X., Yu, T., & Yan, F. (2024). Positive effects of yeast soluble cell wall polysaccharide on fruit postharvest control through resistance response. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136003. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136003>
- Xie, F., Pan, H., Yuan, S., Wang, J., Hou, Q., & Cao, J. (2015). Effects of infiltration with yeast mannan on postharvest storage of tomato fruit. *Food Science*, 36(02), 221–225. <http://dx.doi.org/10.7506/spkx1002-6630-201502043>
- Xie, F., Yuan, S., Pan, H., Wang, R., Cao, J., & Jiang, W. (2017). Effect of yeast mannan treatments on ripening progress and modification of cell wall polysaccharides in tomato fruit. *Food Chemistry*, 218, 509–517. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.086>
- Xin, Y., Ji, H., Cho, E., et al. (2022). Immune-enhancing effect of water-soluble beta-glucan derived from enzymatic hydrolysis of yeast glucan. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 30, 101256. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbrep.2022.101256>
- Yadav, A., Kumar, N., Upadhyay, A., Sethi, S., & Singh, A. (2022). Edible coating as postharvest management strategy for shelf-life extension of fresh tomato (*Solanum lycopersicum* L.): An overview. *Journal of Food Science*, 87(6), 2256–2290. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.16145>
- Yu, Q., Chen, Q., Chen, Z., et al. (2012). Activating defense responses and reducing postharvest blue mold decay caused by *Penicillium expansum* in peach fruit by yeast saccharide. *Postharvest Biology and Technology*, 74, 100–107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.07.005>
- Zhang, B., Gao, X., Zhou, Y., You, S., Qi, W., & Wang, M. (2025). Surface Display Technologies for Whole-Cell Biocatalysts: Advances in Optimization Strategies, Food Applications, and Future Perspectives. *Foods*, 14(10), 1803. <https://doi.org/10.3390/foods14101803>
- Zhang, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Chen, Y. (2024). From farm to market: Research progress and application prospects of artificial intelligence in the frozen fruits and vegetables supply chain. *Trends in Food Science & Technology*, 153, 104730. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104730>
- Zheng, Z., Huang, Q., Luo, X., Xiao, Y., Cai, W., & Ma, H. (2019). Effects and mechanisms of ultrasound- and alkali-assisted enzymolysis on production of water-soluble yeast β -glucan. *Bioresource Technology*, 273, 394–403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.035>
- Zhou, D., Liu, Q., Zhu, T., et al. (2024). Effects of ultraviolet C on the quality and aroma volatile in peach fruit during postharvest storage. *Food Chemistry*, 456, 139906. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139906>

- Zhou, J., Fu, Y., Qi, G., et al. (2023). Yeast cell-wall polysaccharides improve immunity and attenuate inflammatory response via modulating gut microbiota in LPS-challenged laying hens. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 407–421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.133>
- Zhu, R., Yu, T., Guo, S., Hu, H., Zheng, X., & Karlovsky, P. (2015). Effect of the yeast *Rhodosporidium paludigenum* on postharvest decay and patulin accumulation in apples and pears. *Journal of Food Protection*, 78(1), 157–163. <http://dx.doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-14-218>
- Zou, X., Wei, Y., Dai, K., Xu, F., Wang, H., & Shao, X. (2021). Yeasts from intertidal zone marine sediment demonstrate antagonistic activities against *Botrytis cinerea* in vitro and in strawberry fruit. *Biological Control*, 158, 104612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104612>