



КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТЬ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ
И ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ

QUALITY CONTROL AND SAFETY
OF AGRICULTURAL RAW MATERIALS
AND PROCESSED PRODUCTS

УДК 663.05

DOI:10.31677/2311-0651-2025-48-2-6-25

ВЛИЯНИЕ ФЕРМЕНТАЦИИ *LACTOBACILLUS PLANTARUM* НА ХИМИЧЕСКИЙ
СОСТАВ И ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ ПЛОДОВОЯГОДНОГО СЫРЬЯ

Л. Ч. Бурак, доктор философии в области пищевых наук
Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛПРОСАКБА»
E-mail: leonidburak@gmail.com

Ключевые слова: молочнокислые бактерии, фрукты, ферментация, *L. plantarum*, биоактивные соединения, фенольные кислоты, флавоноиды, антоцианы, кислоты, спирты, антиоксидантная активность.

Реферат. Ферментация считается традиционным методом обработки для увеличения срока годности продуктов питания и улучшения вкуса пищевого сырья. Плоды и ягоды содержат многие питательные вещества и являются приемлемым субстратом для ферментации молочнокислыми бактериями. *Lactiplantibacillus plantarum* используется в качестве закваски или дополнительной культуры для процесса ферментации сырья растительного и животного происхождения из-за ее устойчивости к окружающей среде и метаболической универсальности. Представлен обзор результатов научных исследований влияния ферментации *L. plantarum* на химический состав, биоактивные соединения, летучие соединения и органолептические свойства фруктов и ягод. Материалом для исследования послужили 49 научных публикаций. Поиск научной литературы на английском и русском языке по теме исследования проводили в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций принят период 2019–2025 гг. Для обзора предметного поля исследования применён алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA. Научный поиск и обзор научных публикаций по теме исследования показал, что *L. plantarum* является эффективным пробиотиком для ферментации богатых углеводами фруктовых субстратов с целью улучшения вкуса и функциональности фруктовых продуктов за счет микробной активности. Фрукты, ферментированные с помощью *L. plantarum*, содержат многие летучие вещества, обладают более высоким содержанием функциональных соединений и проявляют лучшую биологическую активность, включая антиоксидантное, противовоспалительное действие на кишечную микрофлору, по сравнению с неферментированными фруктами. Обзор и анализ химического состава ферментированных продуктов, их пищевой ценности дает необходимую информацию для разработки функциональных продуктов питания на основе фруктов, обработанных путем ферментации с использованием *L. plantarum*. Вместе с тем, следует отметить отсутствие анализа и научных выводов о штаммовой специфичности *L. plantarum* в метаболизме, безопасности ферментированных *L. plantarum* фруктовых продуктов, характеристике изменения аромата различных фруктов после ферментации *L. plantarum*. Будущие исследования должны быть сосредоточены на токсикологии, иммунологии и методах молекулярного питания с целью детального анализа функциональности различных ферментированных фруктовых и овощных продуктов и установления метаболических характеристик различных штаммов *L. plantarum*. Результаты таких исследований будут способствовать всестороннему пониманию преимуществ ферментированных *L. plantarum* фруктовых продуктов для здоровья человека и, как следствие, а также разработке и производству качественных функциональных продуктов.

INFLUENCE OF *LACTOBACILLUS PLANTARUM* FERMENTATION ON THE CHEMICAL COMPOSITION AND NUTRITIONAL VALUE OF FRUIT AND BERRY RAW MATERIALS

L. Ch. Burak, PhD in Food Science
Limited Liability Company «BELROSAKVA»

Keywords: lactic acid bacteria, fruits, fermentation, *L. plantarum*, bioactive compounds, phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, acids, alcohols, antioxidant activity

Abstract. Fermentation is considered a traditional processing method to increase the shelf life of food products and improve the taste of food raw materials. Fruits and berries contain many nutrients and are an acceptable substrate for fermentation by lactic acid bacteria. *Lactiplantibacillus plantarum* is used as a starter or additional culture for the fermentation process of raw materials of plant and animal origin due to its environmental stability and metabolic versatility. The aim of the study is to review the results of scientific studies of the effect of *L. plantarum* fermentation on the chemical composition, bioactive compounds, volatile compounds and organoleptic properties of fruits and berries. The material for this study was 49 scientific publications. The search for scientific literature in English and Russian on the topic of the study was carried out in the bibliographic databases Scopus, Web of science, PubMed and Google Scholar. The period 2019–2025 was adopted as the time frame for the review of scientific publications. An algorithm in accordance with the PRIZMA protocol was used to review the subject field of the conducted study. Scientific search and review of scientific publications on the topic of the study showed that *L. plantarum* is an effective probiotic for the fermentation of carbohydrate-rich fruit substrates in order to improve the taste and functionality of fruit products due to microbial activity. Fruits fermented with *L. plantarum* contain many volatile substances, have a higher content of functional compounds and exhibit better biological activity, including antioxidant, anti-inflammatory effects on intestinal microflora, compared with unfermented fruits. Review and analysis of the chemical composition of fermented products, their nutritional value provides the necessary information for the development of functional foods based on fruits processed by fermentation using *L. plantarum*. At the same time, it should be noted that there is no analysis and scientific conclusions about the strain specificity of *L. plantarum* in metabolism, the safety of *L. plantarum* fermented fruit products, and the characteristics of changes in the aroma of various fruits after fermentation with *L. plantarum*. Future research should focus on toxicology, immunology and molecular nutrition techniques to analyze in detail the functionality of various fermented fruit and vegetable products and to establish the metabolic characteristics of different *L. plantarum* strains. The results of future research will contribute to a comprehensive understanding of the health benefits of *L. plantarum* fermented fruit products for humans and to the development and production of quality functional foods.

Среди различных технологий переработки ферментация молочнокислыми бактериями (МКБ) широко используется в качестве традиционного способа переработки свежих фруктов. МКБ производят молочную кислоту путем разложения источников сахаров в ферментируемой среде, в ходе которого высвобождаются различные летучие и функциональные соединения, придавая продукту уникальный вкус и питательные свойства [1]. Ввиду высокого содержания углеводов, витаминов и минералов, фрукты являются подходящими матрицами для ферментации МКБ [2]. Ферментируя мякоть гуавы смесью *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* и *Lactobacillus casei*, Каурет. ал обнаружили, что ферментация значительно увеличивает содержание ликопина и биодоступность фенольных соединений в мякоти, а также активность по удалению радикалов DPPH [3]. Кроме того, антиоксидантная активность смешанного сока зизифуса и дерезы значительно возросла после ферментации с помощью *Lactobacillus plantarum* 9-2, а уникальный вкус плодов усилился [4]. Молочнокислые бактерии можно в целом классифицировать в соответствии с их морфологией и средой обитания и разделить на следующие роды: *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Bifidobacterium*, *Lactococcus* и *Pediococcus*. Молочнокислые бактерии разных родов филогенетически тесно связаны и, следовательно,

имеют высокую степень совпадения в своих метаболических путях. *Lactobacillus*, основная группа молочнокислых бактерий, представляет собой род грамположительных, очищенных, ферментирующих молочную кислоту, не образующих спор и неподвижных бацилл. *L. plantarum* как пробиотический ферментер занимает центральное положение в ферментации растительных продуктов [5]. Он не только играет ключевую роль в ферментации фруктовых соков и молочных продуктов, оптимизируя вкус продуктов, но и значительно повышает их функциональную и пищевую ценность. *L. plantarum* посредством яблочно-молочного брожения (ЯМБ) преобразует яблочную кислоту в молочную кислоту, которая может заменить неприятные привкусы более мягким и приемлемым вкусом [6]. *L. plantarum* часто используется при ферментации вина для улучшения вкуса продукта. Несколько исследований показали, что *L. plantarum* обладает пробиотическими свойствами в ферментированных продуктах. *L. plantarum* характеризуется эффективной кислото- и желчеустойчивостью, превосходя в этом другие молочнокислые бактерии, а его генетическая адаптация состава клеточной поверхности и транспортеров придает ему более сильную способность к кишечной адгезии, что позволяет ему преимущественно колонизировать кишечный тракт. Конкурируя за места связывания и генерируя ингибирующие компоненты, он подавляет рост вредных бактерий, улучшая здоровье хозяина [7]. Таким образом, *L. plantarum* превосходит многие другие молочнокислые бактерии в ферментировании фруктов с точки зрения его пробиотических свойств, и эти свойства обеспечивают значительные преимущества продукта в улучшении здоровья кишечника, повышении антиоксидантной способности и регулировании метаболизма человека. Продукты ферментации из *L. plantarum* проявляли различные биоактивные свойства, включая облегчение диабета 2 типа, гипертонии, гиперлипидемии и гастроэнтерита, что может быть связано с продуктами метаболизма, образующимися во время ферментации фруктов или овощей [8]. Растительное сырье содержит большое количество фенольных соединений, которые могут участвовать в метаболизме *L. plantarum* на протяжении всего процесса ферментации и образовывать различные производные, одновременно преобразуя полимеризованные или связанные фенольные соединения в свободные фенольные соединения, тем самым повышая биологическую активность продуктов ферментации. Было проведено значительное количество исследований ферментированных фруктов, большинством из которых изучалось влияние ферментации на качество продукта посредством анализа вкусовых веществ, фитохимического состава, различных биоактивностей и других физико-химических показателей и органолептических свойств. Несмотря на растущее количество исследований *L. plantarum* как ферментирующего агента, характеристики ферментации *L. plantarum* в различных фруктах или овощах, его влияние на химический состав матрицы ферментации и улучшение биоактивных свойств рассматривались редко. Целью данного исследования является обзор результатов научных исследований влияния ферментации *L. plantarum* на химический состав, биоактивные соединения, летучие соединения и органолептические свойства фруктов и ягод.

Поиск научной литературы на английском и русском языке по теме исследования проводили в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar с применением дескрипторов: «ферментация фруктовых соков», «молочнокислые бактерии», «*L. plantarum*», «микроорганизмы», «ферменты», «биологически активные соединения», «пищевая ценность», «антиоксидантная активность». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2019–2025 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы применяли методы анализа, систематизации и обобщения. Изначально было отобрано и изучено 257 научных публикаций. Среди статей, соответствующих критериям включения, для составления данного обзора было выбрано 49 исследований.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими.

Критерии включения:

- 1) статья написана в период 2019–2025 гг.;
- 2) статья соответствует теме исследования;
- 3) типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи и краткие отчеты.

Критерии исключения:

- 1) статья не соответствует теме данного обзора (не касается тематики ферментации молочнокислыми бактериями фруктов и ягод);
- 2) содержание статьи дублируется (если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз).

Влияние процесса ферментации *L. plantarum* на органолептические свойства продукта. Ферментированные продукты более привлекательны, чем другие продукты, из-за их уникальных вкусов, которые в значительной степени обусловлены метаболической активностью ферментирующих штаммов. Метаболическую активность *L. plantarum* рода молочнокислых бактерий, можно в целом разделить на три метаболических пути, которые влияют на вкус фруктовых продуктов: метаболизм сахара, метаболизм белка и метаболизм липидов. *L. plantarum*, потребляя восстанавливающие сахара во фруктах, производит компоненты вкуса, такие как летучие вещества и органические кислоты; таким образом, эти сахара участвуют в метаболизме сахара *L. plantarum* [9]. Метаболизм сахара в *L. plantarum* состоит из гомолактической ферментации, в процессе которой образуется молочная кислота, и гетеролактической ферментации, в результате которой образуются летучие вкусовые соединения. Гомолактическая ферментация расщепляет глюкозу на пируват через гликолитический путь, а пируват превращается в молочную кислоту с помощью лактатдегидрогеназы. Напротив, гетеролактическая ферментация преобразует пируват в ацетальдегид с помощью пируватдекарбоксилазы; этот пируват далее преобразуется в летучие соединения, такие как диацетил и этанол. *L. plantarum* может вырабатывать различные ферменты, включая внеклеточные протеазы, способные расщеплять белки во фруктах на свободные аминокислоты и низкомолекулярные пептиды, которые являются как вкусовыми соединениями, так и предшественниками вкуса. Например, глицин, имеющий сладкий вкус, может усиливать вкус фруктов, а аминокислоты могут производить альдегиды, кетоны и другие летучие соединения посредством декарбоксилирования и дезаминирования [6]. Липидный обмен веществ также является важным процессом, посредством которого *L. plantarum* влияет на вкус фруктовых продуктов. Липиды ацилируются эстеразами, вырабатываемыми *L. plantarum*, с образованием жирных кислот и глицерина. Хотя сами жирные кислоты имеют слабый вкус, продукты их окисления и разложения вносят значительный вклад во вкус ферментированных продуктов. Например, жирные кислоты реагируют со спиртами в кислых условиях с образованием сложных эфиров (этилацетата и этиллактата) с цветочным и фруктовым вкусом, а окисление жирных кислот производит гексаналь с травянистым вкусом и октаналь с цитрусовым вкусом [10]. Благодаря метаболизму сахаров, белков и липидов *L. plantarum* также может регулировать соотношение сахара и кислоты, свободных аминокислот и других нелетучих компонентов фруктов, еще больше обогащая вкус продукта. Влияние ферментации *L. plantarum* на вкус фруктовых продуктов суммируется с точки зрения летучих и нелетучих веществ.

Летучие ароматические соединения. Ароматический профиль ферментированных продуктов является важным фактором для оценки качества продукта. Например, мягкие ароматические длинноцепочечные спирты и терпены с мускусными привкусами во фруктовых винах, уксусная кислота с кислыми запахами во фруктовых уксусах, а также этанол и

полиненасыщенные жирные кислоты придают кефирным продуктам освежающий аромат и сливочный вкус [11]. Ферментация фруктовых продуктов с помощью МКБ не только приводит к более насыщенным ароматам, но и маскирует или уменьшает некоторые посторонние привкусы. *L. plantarum* NCU116 усиливал аромат сока манго, увеличивая содержание спирта, который является основным ароматическим соединением в соке манго [12]. Изменения метаболизма и компонентов во время ферментации являются решающими процессами в производстве ароматических веществ, и эти процессы тесно связаны с микробной активностью. Ферментация не только синтезирует новые летучие соединения, но и обеспечивает субстраты для синтеза других летучих соединений. Большинство терпеноидов и пиразинов в вине поступают из фруктов, а высшие спирты восстанавливаются во время ферментации через промежуточную пировиноградную кислоту, образующуюся при ферментации глюкозы в пути синтеза аминокислот [11]. Летучие органические кислоты являются важным источником аромата в вкусных продуктах и образуются в основном во время уксуснокислого брожения, когда уксуснокислые бактерии активны. Углеводы во фруктах могут быть преобразованы в органические кислоты, представленные молочной кислотой, путем молочнокислого брожения, что является основной характеристикой ферментации молочнокислых бактерий; однако влияние разных молочнокислых бактерий на вкусовые вещества сильно различается. Высокая активность эстеразы *L. plantarum* способствует деградации эфиров в плодах, а альдегиды окислительно восстанавливаются до спиртов и кислот [6]. В связи со специфичностью штамма в производстве летучих соединений необходимо проанализировать классификацию и характеристику летучих соединений, продуцируемых *L. plantarum* во время ферментации плодов.

Терпены. Терпены являются одним из основных ароматических компонентов фруктов и образуются путем связывания изопреновых единиц с образованием монотерпенов, дитерпенов, тритерпенов, тетратерпенов или сесквитерпенов, в зависимости от формы связи; монотерпены и сесквитерпены являются преобладающими летучими ароматическими соединениями во фруктах [13]. Все терпеноиды получены из соединений – предшественников изопентенилдифосфата (ИПДФ) и диметилаллилдифосфата (ДМАДФ), которые отвечают за защитные механизмы растений. Ферментация также высвобождает высококачественные терпены, такие как линалоол и гераниол, которые производятся во время пивоварения и имеют характерные цветочные и фруктовые вкусы [14]. Гранатовые соки, ферментированные *L. plantarum* C2, POM1 и 09, показали повышенное содержание терпенов, и эти соединения в основном показали ароматы сосны и цитрусовых, которые нравятся потребителям. Возможной причиной увеличения летучих терпенов в данном случае является то, что ферментация *L. plantarum* ферментативно разрушает монотерпеновые агликоны в гранатовом соке, высвобождая больше летучих монотерпенов и усиливая доминирующий аромат ферментированного гранатового сока [15]. В ходе исследования использовали четыре штамма *L. plantarum*, выделенных из фруктов и молочных продуктов, для ферментации сока бузины и установили, что в течение 48 ч все летучие соединения значительно увеличились после ферментации, при этом самое высокое содержание летучих соединений было в соке, ферментированном *L. plantarum* 285, выделенным из бразильского сыра [15]. Кроме того, штаммы *L. plantarum*, выделенные из молочных и немолочных продуктов, показали значительные различия в составе терпеноидов во время ферментации соков бузины, что может представлять типичный аромат плодов бузины, демонстрируя, что *L. plantarum*, выделенный из молочных продуктов, может более эффективно усиливать ароматические качества сока бузины [16]. Markkinen et al. ферментировали облепиховый сок *L. plantarum* и установили снижение терпенов, характеризующих фруктовые и цветочные ароматы в ферментированном облепиховом соке. Однако такое же снижение терпенов наблюдалось в неферментированном

облепиховом соке, что свидетельствует о том, что потеря терпенов не связана с ферментацией [17].

Спирты. Спирты – это соединения, получаемые путем замещения атомов водорода гидроксильными группами в боковых цепях алифатических, алициклических или ароматических углеводов. Спирты могут образовываться путем окислительной деградации линоленовой и линолевой кислот, а также путем превращения аминокислот. Спирты также играют важную роль в качестве летучих компонентов свежих фруктов, в основном внося вклад в «зеленые» ароматы, связанные с запахом свежих трав или листьев [18]. Mandha et al. исследовали ферментацию арбузного сока с пятью различными молочнокислыми бактериями и определили, что только арбузный сок, ферментированный *L. plantarum* LMG 6907, содержал более значительную концентрацию спиртов в летучих веществах [19]. Впоследствии авторы изучили летучие вещества в ферментированном соке манго с использованием того же рода молочнокислых бактерий, и самое высокое содержание 1-гексанола было обнаружено в соке манго, также ферментированном *L. plantarum* LMG 6907 [20].

Эфиры. Летучие эфиры являются определяющими компонентами типичных запахов фруктов и обычно производятся в результате реакций этерификации с участием кислот и спиртов во время созревания фруктов [18]. Последним этапом синтеза эфиров во фруктах является превращение ацил-КоА в спирты алкоголь-ацилтрансферазами (ААТ), которые далее катализируются для получения эфиров. *L. plantarum* содержит множество высокоактивных эстераз, которые могут расщеплять эфиры на кислоты и спирты, что приводит к снижению содержания эфиров в ферментированном сырье [15]. Wang et al. обнаружили существенное снижение содержания эфиров, особенно этилацетата, в соке черноплодной рябины после ферментации с *L. plantarum* JYLP-375; этилацетат в соке черноплодной рябины в основном отвечает за его характерный запах бренди [21]. Аналогичным образом, Parket al. установили снижение содержания эфиров в смешанных ягодных соках, ферментированных *L. plantarum* LP-115, по сравнению с неферментированными соками. Более того, после ферментации с *L. plantarum* LP-115 эфиры больше не были основными летучими соединениями в ягодном соке [15]. Предполагается, что использование разных ягод является одной из причин различий в летучих соединениях в ферментированных ягодных соках. Однако Yanget al. провели скрининг четырех видов молочнокислых бактерий, приемлемых для ферментации персиковой мякоти, при этом было обнаружено значительное увеличение летучих эфиров в персиковой мякоти, ферментированной с использованием *L. plantarum* 21802. В предыдущих исследованиях было доказано, что эти эфиры, в частности γ -капролактон и декалактон, являются основными ароматическими компонентами этого сорта персика [22].

Альдегиды. Альдегиды являются одними из основных летучих соединений, содержащихся во фруктах. Альдегиды состоят из углеводов и альдегидных групп, и большинство из них образуются при разложении ненасыщенных жирных кислот [18]. Влияние различных концентраций альдегидов на запах контрастно: низкие концентрации альдегидов придают продуктам приятный запах, тогда как высокие концентрации альдегидов вызывают неприятный запах [21]. Shi et al. использовали *L. plantarum* JHT78 для ферментации арбузного сока и обнаружили, что содержание ацетальдегида, основного летучего компонента в арбузном соке, значительно увеличилось после ферментации. Кроме того, следует отметить, что ацетальдегидные сшивки, образованные путем объединения ацетальдегида с дубильной кислотой, могут изменять вяжущий вкус, вызванный дубильной кислотой, показывая, что *L. plantarum* JHT78 может изменять состав летучих соединений ферментированного арбузного сока [23]. В исследовании Yang et al. установлено наибольшее увеличение летучих альдегидных соединений (увеличение на 1155,27 %) в персиковой мякоти, ферментированной *L. plantarum* 21802 в течение 60 ч, по сравнению с исходными образцами, и они в основном способствовали миндальному аромату персиковой мякоти [22].

Кетоны. Кетоны – это органические соединения, в молекулах которых карбонильная группа связана с двумя углеводородными радикалами [24]. Mantzourani et al. ферментировали гранатовый сок с *L. plantarum* ATCC 14917 при 30 °C в течение 24 ч. Содержание кетонов, одного из основных летучих соединений в соке, значительно увеличилось по сравнению с началом ферментации. Более того, после 4 недель хранения при 4 °C ароматные летучие соединения лучше сохранились в ферментированном гранатовом соке, что указывает на более высокие свойства стойкости аромата у ферментированного гранатового сока [15]. Кроме того, Wu et al. идентифицировали шесть новых кетонов в яблочном соке, ферментированном с помощью *L. plantarum* 90, среди которых метилгептенон придавал ферментированному яблочному соку стойкий цветочный аромат [25].

Нелетучие ароматические соединения. Помимо летучих соединений, присутствуют нелетучие соединения во фруктах, включая аминокислоты, растворимые сахара и органические кислоты, которые оказывают влияние на вкус. Они действуют как вещества-предшественники летучих соединений или придают фруктам сладкий и кислый вкус, который меняется по мере созревания или микробной ферментации [15]. Молочные белки и жиры гидролизуются МКБ с образованием аминокислот и короткоцепочечных жирных кислот, которые могут обеспечивать определенные ароматические характеристики. МКБ могут синтезировать вкусовые соединения из фруктов, используя свободные аминокислоты, жирные кислоты и растворимые сахара в качестве прекурсоров, и способны регулировать содержание веществ, влияющих на вкус, для улучшения конечного вкуса продукта [26]. Sun et al. ферментировали абрикосовый сок с *L. plantarum* 56 и установили, что общее количество растворимых сухих веществ и органических кислот уменьшилось, что было связано с разложением лимонной и яблочной кислот *L. plantarum*, а также производством молочных кислот, которые привели к более полному и мягкому вкусу ферментированного абрикосового сока [27]. Несмотря на особую значимость нелетучих соединений в ферментированных фруктовых продуктах, по-прежнему отсутствуют обобщенные сведения о влиянии ферментации, особенно *L. plantarum*, на нелетучие вкусовые соединения.

Аминокислоты. Аминокислоты являются основными азотистыми соединениями, содержащимися во фруктах. Путь синтеза свободных аминокислот, особенно метионина, ароматических и разветвленных аминокислот, во фруктах тесно связан с ароматизирующими соединениями, которые являются критическими предшественниками для синтеза аромата [28]. Большинство ароматических компонентов в дынях образуются в результате преобразования свободных аминокислот. Синтез основных ароматизирующих эфиров в клубнике во время созревания тесно связан со свободными аминокислотами и жирными кислотами. Основным источником азота, используемым молочнокислыми бактериями в субстратах фруктов, являются свободные аминокислоты, которые в основном преобразуются в ароматические вещества через сложные метаболические пути родов молочнокислых бактерий [29]. He et al. наблюдали значительное снижение аминокислот в конце процесса ферментации в соке черники с использованием трех различных родов молочнокислых бактерий, что указывает на то, что молочнокислые бактерии постоянно потребляли аминокислоты в качестве источников азота во время процесса ферментации. Соответственно, наблюдалось значительное повышение уровня летучих соединений, особенно в соке черники, ферментированном с *L. plantarum* NCU116 [30]. Однако в соке голубики, ферментированном с *L. plantarum* B7 и C8-1, получены различные результаты, при которых в ферментированном соке голубики (pH 3,5) наблюдалось значительное обогащение ароматическими аминокислотами, тогда как более низкие условия pH ингибировали метаболический процесс *L. plantarum*. Примечательно, что увеличение содержания ароматических аминокислот в ферментированном соке голубики сопровождалось снижением содержания хинной кислоты [15]. Кроме того, аминокислоты отвечают за вкус и аромат продуктов, в основном сладкий, умами или горький. Сладкие аминокислоты включают глицин, пролин и серин; умами аминокислоты включают глутаминовую кислоту и аспарагиновую кислоту; а горькие аминокислоты включают тирозин, фенилаланин, лейцин и

изолейцин [15]. По сравнению со свежими чайотами содержание L-серина, L-глутаминовой кислоты и L-пролина в ферментированных чайотах было значительно увеличено, что можно объяснить превращением аргинина в L-глутаминовую кислоту, катализируемую аминотрансферазой аспарагиновой кислоты, и последующим образованием серина и пролина *L. plantarum*. В частности, *L. plantarum* был выделен из естественно ферментированных чайотов [31]. Filannino et al. сообщили, что глутамат и γ -аминомасляная кислота во фруктовых соках (вишневом и ананасовом) и овощных соках (томатном и морковном) значительно увеличились после ферментации с *L. plantarum*, и более высокая степень этого увеличения могла наблюдаться в условиях низкого pH. Поскольку преобразование аминокислот МКБ зависит от штамма, аналогично экспериментальным результатам, это действие может быть ограничено pH окружающей среды. Ферментация МКБ доминирует при ЯМФ в средах с низким pH [15].

Органические кислоты и углеводы. Основными органическими кислотами во фруктах являются яблочная, винная и лимонная кислоты, которые представляют собой важные соединения, оказывающие влияние на специфический аромат и вкус фруктов. Основываясь на сложном механизме ферментации, органические кислоты участвуют во многих метаболических путях во время ферментации молочнокислых бактерий, тем самым увеличивая их потребление. Органические кислоты, особенно молочная кислота, также являются основными продуктами метаболизма молочнокислых бактерий и играют решающую роль в улучшении вкуса продуктов ферментации [15]. Yang et al. сообщили о значительном снижении яблочной кислоты и увеличении молочной кислоты в яблочном соке «Fuji», ферментированном с *L. plantarum* BNCC 337796. Кроме того, лимонная кислота, щавелевая кислота и янтарная кислота снизились, тогда как общее количество органических кислот значительно увеличилось по сравнению с образцами до ферментации. Вкус молочной кислоты мягче, чем яблочной, и яблочная кислота может быть преобразована в молочную кислоту во время ЯМБ, тем самым происходит улучшение конечного вкуса ферментированного сока. Лимонная кислота участвует в цикле трикарбоновых кислот во время ферментации МКБ и в конечном счёте преобразуется в диацетил и другие органические кислоты, такие как уксусная кислота и молочная кислота [32]. Эти научные данные согласуются с результатами, полученными Wang et al. при ферментировании МКБ мякоти боярышника, где молочная кислота не была обнаружена в неферментированном сырье, и не было обнаружено значительных изменений в содержании щавелевой кислоты в образцах мякоти боярышника во время ферментации [15]. Chen et al. сравнили состав органических кислот сока папайи, ферментированного *Lactobacillus acidophilus* GIM 1.731 и *L. plantarum* GIM 1.140, и обнаружили, что *L. plantarum* имел более высокий общий выход молочной и органических кислот, чем *L. acidophilus*. Однако *L. plantarum* потреблял меньше винной кислоты, чем *L. acidophilus*. Винная кислота обычно потребляется микроорганизмами для поддержания своей активности [24]. Сладость во фруктах в основном обусловлена растворимыми сахарами, включая фруктозу, глюкозу, сорбит и сахарозу. Растворимые сахара обычно используются в качестве источников углерода во время ферментации молочнокислых бактерий. Gengatharan et al. исследовали ферментацию папайи, используя четыре штамма молочнокислых бактерий, и обнаружили, что общее содержание сахара после 24 ч ферментации больше не изменялось, что указывает на то, что ферментативная активность выбранных молочнокислых бактерий прекратилась. Было установлено, что *L. plantarum* ATCC 8014 и *Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469 имеют лучший метаболизм углеводов во время ферментации папайи, чем два других использованных штамма молочнокислых бактерий [33].

Влияние ферментации *L. plantarum* на биологически активные соединения. Фрукты являются основным источником различных аминокислот, полисахаридов, витаминов, пищевых волокон и минералов и имеют важные преимущества для поддержания здоровья человека [24]. Фрукты богаты биологически активными веществами, такими

как фенольные кислоты, флавоноиды, антоцианы, алкалоиды, полисахариды, эфирные масла и каротиноиды, которые обуславливают антиоксидантные, антигликирующие и противовоспалительные свойства, а также вмешательство в диабет 2 типа и регуляцию кишечной флоры [2]. Ферментация МКБ улучшает эти свойства и увеличивает высвобождение биоактивных соединений, дополнительно повышая пищевую ценность продуктов [6]. В таблице представлен краткий обзор результатов влияния ферментации *L. plantarum* на изменение биоактивных соединений в фруктовых продуктах.

Таблица

Обзор результатов влияния ферментации *L. plantarum* на увеличение содержания биоактивных соединений в фруктовых продуктах [6, 15]

Review of the results of the effect of *L. plantarum* fermentation on increasing the content of bioactive compounds in fruit products [6, 15]

Наименование сырья	Используемый штамм и параметры ферментации	Фенольные кислоты	флавоноиды	Состав пигментных веществ	Другие соединения
Вишневый сок (<i>Prunus avium</i> L.)	<i>L. plantarum</i> POM1, <i>L. plantarum</i> C1, <i>L. plantarum</i> 1LE1, <i>L. plantarum</i> 285 при 30 °C в течение 48 ч	п-гидроксифенил-молочная кислота, дигидрокофеиновая кислота, фенилмолочная кислота	н/д	н/д	н/д
Сок зизифуса (<i>Ziziphus Jujuba</i> сорта <i>Muzao</i>)	<i>L. plantarum</i> 90, при 37 °C в течение 48 ч	галловая кислота, кофейная кислота, протокатеховая кислота, п-кумаровая кислота, феруловая кислота	эпикатехин, рутин	н/д	н/д
Мякоть киви (<i>Actinidia Lindl. spp.</i> , «Guichang»)	<i>L. plantarum</i> , при 37 °C в течение 28 ч	эскулетин, протокатеховая кислота, п-кумаровая кислота	н/д	н/д	н/д
Сок ягоды гумы (вишни серебристой (<i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb.))	<i>L. plantarum</i> KCTC 33131, при 35 °C в течение 72 ч	п-гидробензойная кислота, ванилиновая кислота, п-кумаровая кислота, вентаровая кислота	эпигаллокатехин, галлат	н/д	н/д
Сок шелковицы (<i>Morus nigra</i>)	<i>L. plantarum</i> KCTC 33131 и <i>L. casei</i> KCTC 13086, при 37 °C в течение 36 ч <i>L. plantarum</i> Lp-115 (ATCC SD5209)	п-гидробензойная кислота, бензойная кислота, галловая кислота, протокатеховая кислота, хлорогеновая кислота, п-гидрокси-бензойная кислота, сиреневая кислота, кофейная кислота, ванилиновая кислота	эпигаллокатехин, катехин, галлат, рутин, нарингин, кверцетин, морен, кемпферол	цианидин-3-О-глюкозид, эскулин, цианидин-3-О-рутинозид	н/д
Апельсиновый соково-молочный напиток (апельсины, обезжиренное молоко, обработанное при сверхвысокой температуре)	<i>L. plantarum</i> TR-71, при 37 °C в течение 72 ч	DL-3-фенилмолочная кислота, 3-4-дигидрокси-гидро-коричная кислота	н/д	н/д	н/д

Примечание. *L. plantarum* представляет *Lactobacillus plantarum*; н/д – нет данных.

Ферментация *L. plantarum* в первую очередь влияет на состав питательных веществ фруктов с точки зрения антиоксидантных компонентов, летучих вкусовых соединений и свободных аминокислот. Антиоксиданты могут помочь в профилактике хронических заболеваний, таких как сердечно-сосудистые заболевания и рак. После ферментации *L. plantarum* антиоксидантные вещества (полифенолы, флавоноиды и т.д.) фруктов значительно возрастают, что может увеличить содержание других биоактивных соединений, таких как каротиноиды, антоцианы, алкалоиды и полисахариды. Ферментация фруктов изменяет тип и содержание летучих вкусовых соединений, которые не только улучшают вкус фруктов, но и могут оказывать антибактериальное и противовоспалительное действие на организм. Свободные аминокислоты во время ферментации претерпевают метаболические изменения и некоторые из этих аминокислот преобразуются во вкусовые соединения [34].

Биоактивные соединения. Фенольные соединения можно разделить на три основные группы: танины, флавоноиды и фенольные кислоты (включая гидроксibenзойную кислоту и гидроксикоричную кислоту), которые составляют почти треть от общего количества фенолов во фруктах и зерновых.

Фенольные кислоты. Фенольные кислоты в свободном состоянии могут легко усваиваться организмом, однако содержание свободных фенольных кислот в растениях всегда ниже, чем связанных и конъюгированных фенольных кислот. *L. plantarum* участвует в метаболизме различных фенольных кислот и может переводить больше фенольных кислот из связанного состояния в свободное [35]. Ricci et al. сбавивали вишневый сок, используя четыре штамма *L. plantarum*, выделенных из растений или молочных продуктов, и обнаружили, что все штаммы *L. plantarum* способны продуцировать п-гидроксифенилмолочную кислоту и фенилмолочную кислоту, и только *L. plantarum* 285, выделенный из сыра Минас, способен полностью преобразовывать кофейную кислоту в дигидрокофеиновую кислоту и полностью метаболизировать п-кумаровую кислоту [36]. Фенилаланин может образовывать фенилмолочную кислоту посредством реакций трансаминирования и гидроксикислотной дегидрогеназы, а п-гидроксифенилмолочная кислота может быть получена в результате метаболизма аминокислоты, которая преобразуется в дигидрокофеиновую кислоту – вещество, способное ингибировать активацию тромбоцитов и противостоять окислению эндотелиальных клеток, демонстрируя регуляцию фенольных кислот в вишневом соке путем ферментации с *L. plantarum* 285 [15]. В исследовании Zhou et al. использовали *L. plantarum* для ферментации мякоти киви в течение 28 ч. Общее содержание фенолов увеличивалось со временем ферментации. Во время брожения содержание протокатеховой кислоты, 6,7-дигидроксикумарина и п-кумаровой кислоты увеличивалось по сравнению с неферментированной мякотью, возможно потому, что феруловая эстераза катализирует образование п-кумаровой кислоты из сопряженных фенольных кислот, а протокатеховая кислота преобразуется в результате метаболизма катехинов, что предполагалось на основе тенденции к снижению содержания катеховой кислоты после ферментации [37].

Флавоноиды. Флавоноиды в основном встречаются в растениях и являются важными вторичными метаболитами растений, состоящими из двух фенольных гидроксильных бензольных колец, соединенных в различных формах тремя атомами углерода. Флавоноиды можно в целом разделить на флавоны, флавонолы, флаваноны, флаванолы, изофлавоны, изофлаваноны, дигидрофлавонолы, халконы и дигидрохалконы на основе различных моделей связей и функциональных групп [16]. Флавоноиды обладают способностью удалять активные формы кислорода (ROS), вырабатываемые в клетках, и ингибировать выработку свободных радикалов, а некоторые обладают антимикробной активностью. МКБ могут гидролизовать стенки растительных клеток посредством ферментативных реакций, тем самым высвобождая связанные с ними биоактивные вещества и улучшая их биодоступность.

Ферменты, вырабатываемые в процессе ферментации *L. plantarum*, включают амилазу, β -глюкозидазу, лактатдегидрогеназу, фенолятдекарбоксилазу, декарбоксилазу, протеазу, танназу и пептидазу [6, 38]. Побочные продукты плодов ацеролы и гуавы, ферментированные с использованием смеси *L. plantarum*, *Lactobacillus paracasei*, *L. casei* и *Lactobacillus fermentum* в соотношении 1 : 1 : 1 : 1 в течение 120 ч при 37 °С, показали повышение общего содержания флавоноидов и значительное увеличение содержания популина и кверцетина в ферментированных продуктах гуавы и ацеролы соответственно [39]. Смешанная ферментация мякоти вишневой серебристой ягоды с помощью *L. plantarum* КСТС 33131 и *L. casei* КСТС 13086 повысила уровень эпигаллокатехина, катехина и кверцетина [15]. Аналогичные тенденции увеличения содержания флавоноидов наблюдались при ферментации сока шелковицы с *L. plantarum* ATCC SD5209. Содержание флавоноидов и фенольных кислот значительно и положительно коррелировало с антиоксидантной активностью ферментированных продуктов, особенно флавоноидов, которые более тесно связаны с антиоксидантной активностью, вероятно, потому, что их ароматические бензольные кольца резонируют со свободными электронными парами фенольного кислорода, генерируя больше электронов, поглощающих свободные радикалы [15].

Антоцианы. Антоцианы – это класс вторичных метаболитов, участвующих в росте растений. Антоцианы являются важнейшими водорастворимыми флавоноидными пигментами в плодах, обладающими биологической активностью. Экспериментально подтверждено, что антоцианы обладают антиоксидантными, противовоспалительными, гипогликемическими, антимуtagenными, антидиабетическими, противораковыми, нейропротекторными свойствами, а также полезны для здоровья глаз [24]. В процессе ферментации сока шелковицы (37 °С, 36 ч) *L. plantarum* ATCC SD5209 содержание всех антоцианов значительно возросло, что оказало значительное влияние на увеличение антиоксидантной активности ферментированного сока [15]. Braga et al. исследовали активность трех ферментов МКБ, которые способны повышать биодоступность антоцианов в культурах ферментации мякоти плодов сорта Jussara. Авторы установили, что в основном *L. plantarum* ATCC 10012 способствовал ферментативной активности β -галактозидазы и β -глюкозидазы [40].

Полисахариды. Полисахариды (гликаны) – высокомолекулярные углеводы, макромолекулы которых состоят из остатков моносахаридов и гликозидно связанных глюкуроновых кислот. Молочнокислые бактерии вырабатывают множество ферментов, которые воздействуют на углеводы или стенки растительных клеток, высвобождая внутриклеточные полисахариды или изменяя структуру полисахаридных компонентов [41]. Huang et al. использовали *L. plantarum* GIM 1.380 для ферментации сока лонгана и обнаружили, что природа полисахаридов, извлеченных из лонганов, различалась в разное время ферментации, а пробиотическая активность ферментированных полисахаридов лонгана была выше, чем у неферментированных полисахаридов лонгана [42]. В исследовании гипогликемического действия морковной мякоти, ферментированной с помощью *L. plantarum* NUC116, Wanet al. обнаружили, что общее количество полисахаридов значительно увеличилось после ферментации. Молекулярная масса водорастворимых полисахаридов в ферментированной морковной мякоти снизилась после ферментации, и было показано, что ферментированные водорастворимые полисахариды обладают более сильной гипогликемической способностью, чем неферментированные, доказывая, что гипогликемическая способность ферментированной морковной мякоти может быть получена из модифицированных водорастворимых полисахаридов [43].

Антиоксидантная активность. Антиоксиданты характеризуются своей способностью отдавать электроны свободным радикалам, которые представляют собой высокореактивные молекулы, способные разрушать структуру клеток. Нейтрализуя свободные радикалы, антиоксиданты эффективно уменьшают их вредное воздействие на структуру клеток. Основной

механизм, с помощью которого антиоксиданты оказывают свое защитное действие, заключается в их способности улавливать и сохранять свободные радикалы, тем самым максимально задерживая или ингибируя клеточное повреждение [24]. Способности по удалению свободных радикалов, обычно измеряемые в исследованиях ферментации фруктов, включают активность по удалению радикалов DPPH (DPPH RSA), активность по удалению радикалов ABTS (ABTS RSA), активность по удалению гидроксильных радикалов (-OH RSA), антиоксидантную способность по восстановлению железа (FRAP) и способность по удалению супероксидного аниона [16]. Эти активности по удалению свободных радикалов подпадают под категорию антиоксидантной активности *in vitro*, и антиоксидантную активность *in vitro* нельзя определить только с помощью одного показателя. Большинство фруктовых продуктов, ферментированных *L. plantarum*, смогли последовательно продемонстрировать высокую антиоксидантную активность [6]. Из вышеупомянутых антиоксидантных анализов DPPH и ABTS основаны на переносе электронов и атомов водорода для реакций окисления соответственно. Супероксид-анион (O_2^-) образуется при митохондриальном переносе электронов, а гидроксильные радикалы обладают наибольшей активностью среди свободных радикалов, включая супероксид-анионы и перекись водорода [6, 24]. Анализы антиоксидантной активности *in vivo* более сложны, но более точно реагируют на состояние окислительного стресса в организме, тем самым определяя антиоксидантную активность образца. Антиоксидантные ферменты и молекулы в организмах принимают электроны, что нейтрализует свободные радикалы. Уровень окислительного стресса проявляется в виде некоторых биомаркеров и повреждений митохондрий [44]. Pontonio et al. использовали мышинные фибробласты для оценки токсичности и эффектов поглощения АФК ферментированного *L. plantarum* гранатового сока, используя неферментированный сок в качестве контроля, и обнаружили, что ферментированный гранатовый сок не только продемонстрировал более низкую токсичность и более высокую выживаемость клеток, чем неферментированный гранатовый сок, но и обладал способностью поглощения АФК, аналогичной таковой у токоферола [45].

Супероксиддисмутаза (СОД), глутатионпероксидаза (ГП) и каталаза (КАТ) являются наиболее распространенными антиоксидантными ферментами в живых организмах и играют важную роль в защите от окислительного стресса [16]. Пюре из вишневой серебристой ягоды, ферментированное с помощью *L. plantarum* КСТС 33131, показало более высокую СОД-подобную активность, чем неферментированное пюре [15]. Гиперлипидемические мыши, которых кормили плодами *Cerasus humilis*, ферментированными смесью *L. plantarum* BNCC 194165 и *Saccharomyces cerevisiae* BNCC 336496, показали значительное подавление снижения активности СОД и ГП в печени и сыворотке [46]. Мыши с алкогольной болезнью печени, потреблявшие ферментационный бульон облепихи, приготовленный с использованием *L. plantarum* BNCC 194165 в качестве ферментирующего агента, показали значительное увеличение в печени активности СОД, которая снизилась из-за повреждения алкоголем [15, 47]. Витамины С и Е, которые являются биомаркерами антиоксидантной активности в организме, также присутствуют во многих фруктах и обладают мощными антиоксидантными свойствами. Quan et al. ферментировали апельсиновый сок с использованием шести различных штаммов МКБ и обнаружили, что апельсиновый сок, ферментированный *L. plantarum*, увеличил количество витамина С, при этом общее увеличение витамина С составило 19,42 % по сравнению с периодом преферментации [48].

Перспективы использования *L. plantarum* для ферментации фруктового сырья. Ферментация МКБ способствует эффективному улучшению вкуса и повышению пищевой ценности, тем самым обеспечивая основу для разработки широкого спектра профилактических и функциональных продуктов. Как было показано, *L. plantarum*, наиболее широко используемый штамм МКБ, обладает пробиотической эффективностью и является перспективным

для применения в производстве различных ферментированных продуктов [6]. Во время ферментации ферменты *L. plantarum* разлагают макромолекулы (целлюлозу, пектин и т. д.) в плодах, добавляя продуктам мягкую текстуру, а кислый привкус, образующийся при ферментации молочной кислоты, придает продуктам более многослойный вкус. Органические кислоты и внеклеточные полисахариды, образующиеся во время ферментации, придают мягкий вкус и уменьшают поток жидкости, создавая вязкость. В процессе ферментации происходит образование ароматических веществ, которые не только обогащают аромат сырья, но и маскируют некоторые неприятные запахи, а деградация или полимеризация пигментных соединений придает продуктам различные цвета. Все эти факторы положительно влияют на общую приемлемость продуктов, ферментированных *L. plantarum* [6, 49]. Бактериостатические соединения, вырабатываемые *L. plantarum* во время ферментации, и среда с низким рН не способствуют росту вредных бактерий, что эффективно продлевает срок годности продукта; более того, *L. plantarum* может по-прежнему поддерживать высокий уровень жизнеспособных бактерий и кислую среду при низкотемпературном хранении, что обеспечивает стабильность и безопасность продукта [6]. Кроме того, ферментация фруктов *L. plantarum* не только повышает качество и безопасность продукта, но и имеет значительные преимущества с точки зрения экологичности и устойчивости. Ферментация *L. plantarum* может эффективно преобразовывать большие объемы скоропортящихся фруктов и овощей в высокоценные продукты по более низкой цене, тем самым сокращая отходы пищевых ресурсов и способствуя устойчивости [6]. Условия, необходимые для процесса ферментации, менее энергоемкие по сравнению с условиями традиционной обработки фруктов и овощей, что эффективно снижает потребление энергии, необходимой для процесса обработки. Благодаря метаболическим характеристикам *L. plantarum* процесс ферментации фруктов может изменить вкус и состав биологически активных соединений, сократить использование других традиционных пищевых добавок и способствовать защите окружающей среды, а также устойчивости [50]. Ферментация *L. plantarum* является эффективной, безопасной и устойчивой технологией переработки фруктов, которая может значительно улучшить общее качество и рыночную конкурентоспособность фруктовых продуктов. Продукты ферментации фруктов и овощей не содержат лактозы и жира, что делает их подходящими для людей с непереносимостью лактозы и вегетарианцев. Разработчики ферментированных продуктов также могут рассмотреть возможность использования смешанных фруктовых и овощных ингредиентов для обогащения вкусового профиля продукта или для заполнения пробелов во вкусе. По сравнению с ферментациями с использованием только одного штамма молочнокислых бактерий ферментации со смешанными бактериями позволяют использовать характеристики ферментации более широкого спектра штаммов для получения более отличительных вкусов и питательных веществ; однако при этом усложняются условия контроля и риски, которые необходимо учитывать, также увеличиваются. Соки, ферментированные МКБ, имеют перспективы широкого промышленного внедрения из-за приятных и многослойных вкусов, придаваемых ферментацией. Потребители с большей вероятностью выберут соки, ферментированные МКБ, а не чистые соки, особенно те, кто предпочитает терпкость. С ростом потребностей потребителей в области здорового питания соки, ферментированные МКБ, переходят из категории напитков в категорию функциональных продуктов питания, способствуя разработке и производству пищевых продуктов, которые сочетают в себе приятный вкус и высокую пищевую ценность.

Вместе с тем следует отметить, что хотя были проведены значительные исследования по использованию *L. plantarum* в разработке продуктов ферментации фруктов, большая часть была ограничена лабораторными исследованиями и опытными образцами. В настоящее время остается несколько проблем при масштабировании процесса ферментации от лабораторных до промышленных масштабов, таких как проблемы смешивания и массообмена в больших ферментерах, масштабный контроль температуры во время ферментации, устойчивость

сырья, высокое потребление энергии и утилизация отходов, возможный риск ухудшения производительности штаммов и неизбежно высокая стоимость ресурсов. Эти проблемы серьезно затрудняют масштабное применение *L. plantarum* в производстве. Также необходимо отметить незначительное количество или полное отсутствие исследований, подтверждающих безопасность ферментированных фруктовых продуктов и их разработки. Существует множество проблем, связанных с безопасностью традиционных ферментированных продуктов, включая микробное загрязнение (образование посторонних бактерий, вызывающих брожение, патогенных бактерий и микотоксинов), недостаточный контроль процесса ферментации, вредные метаболиты (например, этилкарбамат, нитриты). Эти проблемы не только влияют на качество продуктов, но и могут нанести серьезный вред здоровью человека. *L. plantarum* признан безопасным пробиотиком Европейским агентством по безопасности пищевых продуктов (EFSA) и Управлением по контролю за продуктами и лекарствами США (US FDA); однако строгие оценки безопасности, особенно на предмет патогенности или резистентности, по-прежнему необходимо проводить для любых новых штаммов *L. plantarum* перед использованием при разработке продукта [51]. Польза для здоровья от ферментации *L. plantarum* также требует определенного количества жизнеспособных бактерий, а изменения вкуса и цвета из-за ферментации могут быть приемлемы не для всех потребителей. Наконец, наличие аллергенных компонентов в некоторых фруктах также является важным фактором, вызывающим неблагоприятные последствия для потребителей. В заключение следует отметить, что для практического производства и применения фруктовых продуктов, ферментированных *L. plantarum*, еще предстоит разрешить множество проблем.

Обзор результатов научных исследований позволяет сделать вывод о том, что ферментация фруктовых соков с использованием штаммов *Lactiplantibacillus plantarum* является одним из перспективных направлений по созданию продуктов функционального назначения. Эта технология позволяет создавать безлактозные напитки с пониженным содержанием сахара, одновременно обогащенные биологически активными соединениями – фенолами, полифенолами, органическими кислотами, биоактивными пептидами, антиоксидантами, бактерицинами и экзополисахаридами. *L. plantarum* проявляет высокую адаптивность в различных субстратах растительного происхождения, включая яблочный, гранатовый, ананасовый, черничный и другие фруктовые и ягодные соки, эффективно катализируя биотрансформацию сахаров и фенольных соединений, способствуя не только сохранению органолептических характеристик, но и значительному увеличению антиоксидантной активности конечного продукта. Ферментированные молочнокислыми бактериями напитки могут способствовать развитию иммунитета и предотвращению заболеваний, связанных с окислительным стрессом и дисбалансом микробиоты кишечника. Дальнейшие научные исследования должны быть сосредоточены на токсикологии, иммунологии и методах молекулярного питания, чтобы лучше раскрыть функциональность различных ферментированных фруктовых и овощных продуктов, а также уникальные метаболические характеристики различных штаммов *L. plantarum*. Полученные результаты будут способствовать всестороннему пониманию преимуществ ферментированных *L. plantarum* фруктовых продуктов для здоровья человека и окажут эффективную помощь при разработке функциональных продуктов с высокой добавленной стоимостью для плодоовощного сектора пищевой промышленности. Таким образом, современные научные данные всесторонне подтверждают потенциал применения *L. plantarum* в технологии ферментации фруктовых соков для получения продуктов с высокой антиоксидантной, пробиотической и профилактической ценностью. Такая перспектива открывает широкие возможности для разработчиков новых категорий специализированных напитков, направленных на поддержание здоровья, иммуномодуляцию и профилактику хронических заболеваний, с учетом требований и интересов современных потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Improvement of antioxidant properties of jujube puree by biotransformation of polyphenols via Streptococcus thermophilus fermentation* / J. Li, W. Zhao, X. Pan [et al.] // Food Chemistry: X. – 2022. – Vol. 13, No. 6. – P. 100214. – DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100214.
2. Бурак Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля // Ползуновский вестник. – 2024. – № 1. – С. 99–119. – DOI: 10.25712/astu.2072-8921.2024.01.013.
3. Kaur H., Ghosh M. Probiotic fermentation enhances bioaccessibility of lycopene, polyphenols and antioxidant capacity of guava fruit (Psidium guajava L) // Journal of Agriculture and Food Research. – 2023. – Vol. 14, No. 1. – P. 100704. – DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100704.
4. *Effect of fermentation by lactic acid bacteria on the phenolic composition, antioxidant activity, and flavor substances of jujube-wolfberry composite juice* / X. Zhao, F. Tang, W. Cai [et al.] // Lwt. – 2023. – Vol. 184, No. 6. – P. 114884. – DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114884.
5. *Recommendations for the use of standardised abbreviations for the former Lactobacillus genera, reclassified in the year 2020* / S. D. Todorov, A. L. Baretto Penna, K. Venema [et al.] // Beneficial Microbes. – 2023. – Vol. 15, No. 1. – P. 1–4. – DOI: 10.1163/18762891-20230114.
6. Бурак Л. Ч. Перспективы использования молочнокислых бактерий *L. Plantarum* для ферментации фруктовых соков // Научное обозрение. Биологические науки. – 2022. – № 3. – С. 63–71. – DOI: 10.17513/srbs.1286.
7. *Unraveling the genetic adaptations in cell surface composition and transporters of Lactiplantibacillus plantarum for enhanced acid tolerance* / J. Zhu, Y. Sun, S. Zhang // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2024. – Vol. 72, No. 10. – P. 5368–5378. – DOI: 10.1021/acs.jafc.3c01276.
8. *Efficacy and safety of Lactobacillus plantarum P 17630 strain soft vaginal capsule in vaginal candidiasis: A randomized non-inferiority clinical trial* / C. Bertarello, D. Savio, L. Morelli [et al.] // European Review for Medical and Pharmacological Sciences. – 2024. – Vol. 28, No. 1. – P. 384–391. – DOI: 10.26355/eur-rev_202401_34927.
9. *The carbohydrate metabolism of Lactiplantibacillus plantarum* / Y. Cui, M. Wang, Y. Zheng [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – Vol. 22, No. 24. – P. 13452. – DOI: 10.3390/ijms222413452.
10. *Effects of Lactobacillus plantarum supplementation on glucose and lipid metabolism in type 2 diabetes mellitus and prediabetes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials* / H. Zhong, L. Wang, F. Jia [et al.] // Clinical Nutrition ESPEN. – 2024. – Vol. 61. – P. 377–384. – DOI: 10.1016/j.clnesp.2024.04.009.
11. *Research progress of wine aroma components: A critical review* / Y. He, X. Wang, P. Li [et al.] // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 402, No. 5. – P. 134491. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134491.
12. *Changes in volatile and nutrient components of mango juice by different Lactic acid bacteria fermentation* / S. Liu, Y. Li, X. Song [et al.] // Food Bioscience. – 2023. – Vol. 56, No. 10. – P. 103141. – DOI: 10.1016/j.fbio.2023.103141.
13. *The transcription factor LaMYC4 from lavender regulates volatile Terpenoid biosynthesis* / Y. M. Dong, W. Y. Zhang, J. R. Li [et al.] // BMC Plant Biology. – 2022. – Vol. 22, No. 1. – art. 289. – DOI: 10.1186/s12870-022-03660-3.
14. *Application of non-Saccharomyces yeasts with high β -glucosidase activity to enhance terpene-related floral flavor in craft beer* / X. Han, Q. Qin, C. Li [et al.] // Food Chemistry. – 2023. – Vol. 404, No. 12. – P. 134726. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134726.
15. *Recent advances in Lactobacillus plantarum fermentation in modifying fruit-based products: flavor property, bioactivity, and practical production applications* / Z. Xing, X. Fu, H. Huang [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2025. – Vol. 24, No. 2. – e70160. – DOI: 10.1111/1541-4337.70160.
16. Бурак Л. Ч., Санац А. Н. Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения // Пищевые системы. – 2023. – Т. 6, № 1. – С. 80–94. – DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94.

17. Markkinen N., Laaksonen O., Yang B. Impact of malolactic fermentation with *Lactobacillus plantarum* on volatile compounds of sea buckthorn juice // *European Food Research and Technology*. – 2021. – Vol. 247, No. 3. – P. 719–736. – DOI: 10.1007/s00217-020-03660-3.
18. Review of fruits flavor deterioration in postharvest storage: Odorants, formation mechanism and quality control / H. Zhao, S. Zhang, D. Ma [et al.] // *Food Research International*. – 2024. – Vol. 182. – P. 114077. – DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114077.
19. Effect of lactic acid fermentation of watermelon juice on its sensory acceptability and volatile compounds / J. Mandha, H. Shumoy, J. Devaere [et al.] // *Food Chemistry*. – 2021. – Vol. 358, No. 12. – P. 129809. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129809.
20. Effect of Lactic Acid Fermentation on Volatile Compounds and Sensory Characteristics of Mango (*Mangifera indica*) Juices / J. Mandha, H. Shumoy, J. Devaere [et al.] // *Foods*. – 2022. – Vol. 11, No. 3. – P. 383. – DOI: 10.3390/foods11030383.
21. Influence of lactic acid fermentation on the phenolic profile, antioxidant activities, and volatile compounds of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) juice / J. Wang, B. Wei, J. Xu [et al.] // *Journal of Food Science*. – 2024. – Vol. 89, No. 2. – P. 834–850. – DOI: 10.1111/1750-3841.16899.
22. Changes in nutritional composition, volatile organic compounds and antioxidant activity of peach pulp fermented by *Lactobacillus* / W. Yang, J. Liu, Q. Zhang [et al.] // *Food Bioscience*. – 2022. – Vol. 49, No. 4. – P. 101894. – DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101894.
23. Shi F., Wang L., Li S. Enhancement in the physicochemical properties, antioxidant activity, volatile compounds, and non-volatile compounds of watermelon juices through *Lactobacillus plantarum* JHT78 fermentation // *Food Chemistry*. – 2023. – Vol. 420, No. 1. – P. 136146. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136146.
24. Бурак Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодовоовощного сырья и соковой продукции. – Москва: ИНФРА-М, 2025. – 236 с. – DOI: 10.12737/2154991.
25. Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice / C. Wu, T. Li, J. Qi [et al.] // *Lwt*. – 2020. – Vol. 122. – P. 109064. – DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109064.
26. The regulation of key flavor of traditional fermented food by microbial metabolism: A review / K. Zhang, T. T. Zhang, R. R. Guo [et al.] // *Food Chemistry: X*. – 2023. – Vol. 19, No. 1. – P. 100871. – DOI: 10.1016/j.fochx.2023.100871.
27. Flavor and functional analysis of *Lactobacillus plantarum* fermented apricot juice / J. Sun, C. Zhao, X. Pu [et al.] // *Fermentation*. – 2022. – Vol. 8, No. 10. – P. 533. – DOI: 10.3390/fermentation8100533.
28. Maoz I., Lewinsohn E., Gonda I. Amino acids metabolism as a source for aroma volatiles biosynthesis // *Current Opinion in Plant Biology*. – 2022. – Vol. 67, No. 1. – art. 102221. – DOI: 10.1016/j.pbi.2022.102221.
29. Characterization of differences in physicochemical properties, volatile organic compounds and non-volatile metabolites of prune wine by inoculation of different lactic acid bacteria during malolactic fermentation / J. Jiang, Y. Xie, M. Cui [et al.] // *Food Chemistry*. – 2024. – Vol. 452. – P. 139616. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139616.
30. Volatile compound dynamics during blueberry fermentation by lactic acid bacteria and its potential associations with bacterial metabolism / Y. X. He, M. W. Hu, W. W. He [et al.] // *Food Bioscience*. – 2024. – Vol. 59, No. 3. – art. 103639. – DOI: 10.1016/j.fbio.2024.103639.
31. Flavor production in fermented chayote inoculated with lactic acid bacteria strains: Genomics and metabolomics-based analysis / S. Zhang, Z. Shang, Z. Liu [et al.] // *Food Research International*. – 2023. – Vol. 163. – P. 112224. – DOI: 10.1016/j.foodres.2022.112224.
32. Fermentation and storage characteristics of «Fuji» apple juice using *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum*: Microbial growth, metabolism of bioactives and in vitro bioactivities / J. Yang, Y. Sun, T. Gao [et al.] // *Frontiers in Nutrition*. – 2022. – Vol. 9, No. 9. – P. 833906. – DOI: 10.3389/fnut.2022.833906.
33. Gengatharan A., Dykes G. A., Choo W. S. Fermentation of red pitahaya extracts using *Lactobacillus* spp. and *Saccharomyces cerevisiae* for reduction of sugar content and concentration of betacyanin content // *Journal of Food Science and Technology*. – 2021. – Vol. 58, No. 9. – P. 3611–362. – DOI: 10.1007/s13197-021-05116-2.

34. *A novel strategy for improving the antioxidant, iridoid, and flavor properties of Noni (Morinda citrifolia L.) fruit juice by lactic acid bacteria fermentation* / C. Zhang, X. Chen, X. Guo [et al.] // *Lwt.* – 2023. – Vol. 184, No. 4. – P. 115075. – DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115075.
35. *Food phenolics and Lactiplantibacillus plantarum* / R. Muñoz, B. de las Rivas, H. Rodríguez [et al.] // *International Journal of Food Microbiology.* – 2024. – Vol. 412, No. 2. – P. 110555. – DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110555.
36. *Use of dairy and plant-derived lactobacilli as starters for cherry juice fermentation* / A. Ricci, M. Cirlini, A. Maoloni [et al.] // *Nutrients.* – 2019. – Vol. 11, No. 2. – art. 213. – DOI: 10.3390/nu11020213.
37. *Biotransformation of phenolics and metabolites and the change in antioxidant activity in kiwifruit induced by Lactobacillus plantarum fermentation* / Y. Zhou, R. Wang, Y. Zhang [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture.* – 2020. – Vol. 100, No. 8. – P. 3283–3290. – DOI: 10.1002/jsfa.10272.
38. Бурак Л. Ч. Использование современных технологий в производстве ферментированных продуктов // *Научное обозрение. Технические науки.* – 2023. – № 5. – С. 5–13. – DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1446>.
39. *Improvement in physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (Malpighia emarginata D. C.) and guava (Psidium guajava L.) fruit by-products fermented with potentially probiotic lactobacilli* / S. D. de Oliveira, C. M. Araújo, G. Borges [et al.] // *Lwt.* – 2020. – Vol. 134. – p. 110200. – DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110200.
40. *Lactobacillus fermentation of jussara pulp leads to the enzymatic conversion of anthocyanins increasing antioxidant activity* / A. R. C. Braga, L. M. de Souza Mesquita, P. L. G. Martins [et al.] // *Journal of Food Composition and Analysis.* – 2018. – Vol. 69. – P. 162–170. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.12.030>.
41. *Extraction and characterization of polysaccharides from Schisandra sphenanthera fruit by Lactobacillus plantarum CICC 23121-assisted fermentation* / Q. Wang, L. Hao, A. Zhang [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules.* – 2024. – Vol. 259, pt. 1. – P. 129135. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129135>.
42. *Dynamic variation in biochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from longan pulp during fermentation process* / F. Huang, R. Hong, R. Zhang [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules.* – 2019. – Vol. 132, No. 1. – P. 915–921. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.04.005.
43. *Origin of hypoglycemic benefits of probiotic-fermented carrot pulp* / Y. J. Wan, H. F. Shi, R. Xu [et al.] // *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* – 2019. – Vol. 67, No. 3. – P. 895–904. – DOI: 10.1021/acs.jafc.8b06976.
44. Halliwell B. Understanding mechanisms of antioxidant action in health and disease // *Nature Reviews Molecular Cell Biology.* – 2024. – Vol. 25, No. 1. – P. 13–33. – DOI: 10.1038/s41580-023-00645-4.
45. *Lactic acid fermentation of pomegranate juice as a tool to improve antioxidant activity* / E. Pontonio, M. Montemurro, D. Pinto [et al.] // *Frontiers in Microbiology.* – 2019. – Vol. 10. – P. 1550. – DOI: 10.3389/fmicb.2019.01550.
46. *Fermented Cerasus humilis fruits protect against high-fat diet induced hyperlipidemia which is associated with alteration of gut microbiota* / Y. Wang, C. Han, J. Cheng [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture.* – 2022. – Vol. 103, No. 5. – P. 2554–2563. – DOI: 10.1002/jsfa.12377.
47. *Bioengineering in solid-state fermentation for next sustainable food bioprocessing* / M. O. Bamidele, M. B. Bamikale, E. Cárdenas-Hernández [et al.] // *Next Sustainability.* – 2025. – Vol. 6. – P. 100105. – DOI: 10.1016/j.nxsust.2025.100105.
48. *Effect of six lactic acid bacteria strains on physicochemical characteristics, antioxidant activities and sensory properties of fermented orange juices* / Q. Quan, W. Liu, J. Guo [et al.] // *Foods.* – 2022. – Vol. 11, No. 13. – P. 1920. – DOI: 10.3390/foods11131920.
49. *Recent advances in the applications of Lactobacillus helveticus in the fermentation of plant-based beverages: A review* / J. Zhao, X. Zeng, Y. Xi, J. Li // *Trends in Food Science & Technology.* – 2024. – Vol. 147, No. 4. – P. 104427. – DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104427.
50. Бурак Л. Ч. Ограничения и возможности современных технологий обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология.* – 2024. – № 2-3 (396). – С. 6–13. – DOI: 10.26297/0579-3009.2024.2-3.1.

51. *Lactiplantibacillus plantarum*: A comprehensive review of its antifungal and anti-mycotoxin effects / Q. Li, X. Zeng, H. Fu [et al.] // Trends in Food Science & Technology. – 2023. – Vol. 136, No. 4. – P. 224–238. – DOI: 10.1016/j.tifs.2023.04.019.

REFERENCES

1. Li J., Zhao W., Pan X., Lao F., Liao X., Shi Y., Wu J., Improvement of antioxidant properties of jujube puree by biotransformation of polyphenols via *Streptococcus thermophilus* fermentation, *Food Chemistry*: X., 2022, Vol. 13, No. 6, P. 100214, DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100214.
2. Burak L. Ch. *Polzunovskij vestnik*, 2024? No. 1? pp. 99–119, DOI: 10.25712/astu.2072-8921.2024.01.013.
3. Kaur H., Ghosh M., Probiotic fermentation enhances bioaccessibility of lycopene, polyphenols and antioxidant capacity of guava fruit (*Psidium guajava* L.), *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, Vol. 14, No. 1, P. 100704, DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100704.
4. Zhao X., Tang F., Cai W., Peng B., Zhang P., Shan Ch., Effect of fermentation by lactic acid bacteria on the phenolic composition, antioxidant activity, and flavor substances of jujube-wolfberry composite juice, *Lwt*, 2023, Vol. 184, No. 6, P. 114884, DOI: 10.1016/j.lwt.2023.114884.
5. Todorov S. D., Baretto Penna A. L., Venema K., Holzapfel W. H., Chikindas M. L., Recommendations for the use of standardised abbreviations for the former *Lactobacillus* genera, reclassified in the year 2020, *Beneficial Microbes*, 2023, Vol. 15, No. 1, P. 1–4, DOI: 10.1163/18762891-20230114.
6. Burak L. Ch. Perspektivy ispol'zovaniya molochnokislyh bakterij *L. Plantarum* dlya fermentacii fruktovyh sokov, *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 2022, No. 3, pp. 63–71, DOI: 10.17513/srbs.1286.
7. Zhu J., Sun Y., Zhang S., Unraveling the genetic adaptations in cell surface composition and transporters of *Lactiplantibacillus plantarum* for enhanced acid tolerance, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, Vol. 72, No. 10, P. 5368–5378, DOI: 10.1021/acs.jafc.3c01276.
8. Bertarello C., Savio D., Morelli L., Bouzalov S., Davidova D., Bonetti A., Efficacy and safety of *Lactobacillus plantarum* P 17630 strain soft vaginal capsule in vaginal candidiasis: A randomized non-inferiority clinical trial, *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 2024, Vol. 28, No. 1, P. 384–391, DOI: 10.26355/eurrev_202401_34927.
9. Cui Y., Wang M., Zheng Y., Miao K., Qu X., The carbohydrate metabolism of *Lactiplantibacillus plantarum*, *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, Vol. 22, No. 24, P. 13452, DOI: 10.3390/ijms222413452.
10. Zhong H., Wang L., Jia F., Yan Y., Xiong F., Li Y., Hidayat K., Guan R., Effects of *Lactobacillus plantarum* supplementation on glucose and lipid metabolism in type 2 diabetes mellitus and prediabetes: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials, *Clinical Nutrition ESPEN*, 2024, Vol. 61, P. 377–384, DOI: 10.1016/j.clnesp.2024.04.009.
11. He Y., Wang X., Li P., Lv Y., Nan H., Wen L., Wang Z., Research progress of wine aroma components: A critical review, *Food Chemistry*, 2023, Vol. 402, No. 5, P. 134491, DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134491.
12. Liu S., Li Y., Song X., Hu X., He Y., Yin J., Nie Sh., Xie M., Changes in volatile and nutrient components of mango juice by different Lactic acid bacteria fermentation, *Food Bioscience*, 2023, Vol. 56, No. 10, P. 103141, DOI: 10.1016/j.fbio.2023.103141.
13. Dong Y. M., Zhang W. Y., Li J. R. et al., The transcription factor LaMYC4 from lavender regulates volatile Terpenoid biosynthesis, *Bmc Plant Biology*, 2022, Vol. 22, No. 1, article 289, DOI: 10.1186/s12870-022-03660-3.
14. Han X., Qin Q., Li C., Zhao X., Song F., An M., Chen Y., Wang X., Huang W., J. Zhan, You Y., Application of non-*Saccharomyces* yeasts with high β -glucosidase activity to enhance terpene-related floral flavor in craft beer, *Food Chemistry*, 2023, Vol. 404, No. 12, P. 134726, DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134726.
15. Xing Z., Fu X., Huang H., Xu Y., Wei L., Shan Ch., Du Y., Recent advances in *Lactobacillus plantarum* fermentation in modifying fruit-based products: flavor property, bioactivity, and practical production applications, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2025, Vol. 24, No. 2, e70160, DOI: 10.1111/1541-4337.70160.
16. Burak L. Ch., Sapach A. N., *Pishchevye sistemy*, 2023, Vol. 6, No. 1, pp. 80–94, DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94.
17. Markkinen N., Laaksonen O., Yang B. Impact of malolactic fermentation with *Lactobacillus plantarum* on volatile compounds of sea buckthorn juice, *European Food Research and Technology*, 2021, Vol. 247, No. 3, P. 719–736, DOI: 10.1007/s00217-020-03660-3.

18. Zhao H., Zhang S., Ma D., Liu Z., Qi P., Wang Z., Di S., Wang X., Review of fruits flavor deterioration in postharvest storage: Odorants, formation mechanism and quality control, *Food Research International*, 2024, Vol. 182, P. 114077, DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114077.
19. Mandha J., Shumoy H., Devaere J., Schouteten J. J., Gellynck X., Winne A., Matem A. O., Raes K., Effect of lactic acid fermentation of watermelon juice on its sensory acceptability and volatile compounds, *Food Chemistry*, 2021, Vol. 358, No. 12, P. 129809, DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129809.
20. Mandha J., Shumoy H., Devaere J., Schouteten J. J., Gellynck X., Winne A. D., Matem A. O., Raes K., Effect of Lactic Acid Fermentation on Volatile Compounds and Sensory Characteristics of Mango (*Mangifera indica*) Juices, *Foods*, 2022, Vol. 11, No. 3, P. 383, DOI: 10.3390/foods11030383.
21. Wang J., Wei B., Xu J., Jiang H., Xu Y., Wang Ch., Influence of lactic acid fermentation on the phenolic profile, antioxidant activities, and volatile compounds of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) juice, *Journal of Food Science*, 2024, Vol. 89, No. 2, P. 834–850, DOI: 10.1111/1750-3841.16899.
22. Yang W., Liu J., Zhang Q., Liu H., Lv Z., Zhang Ch., Jiao Z., Changes in nutritional composition, volatile organic compounds and antioxidant activity of peach pulp fermented by *Lactobacillus*, *Food Bioscience*, 2022, Vol. 49, No. 4, P. 101894, DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101894.
23. Shi F., Wang L., Li S., Enhancement in the physicochemical properties, antioxidant activity, volatile compounds, and non-volatile compounds of watermelon juices through *Lactobacillus plantarum* JHT78 fermentation, *Food Chemistry*, 2023, Vol. 420, No. 1, P. 136146, DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136146.
24. Burak L. Ch. *Vliyanie sovremennyh sposobov obrabotki i sterilizacii na kachestvo plodoovoshchnogo syr'ya i sokovoj produkcii* (The influence of modern methods of processing and sterilization on the quality of fruit and vegetable raw materials and juice products), Moscow: INFRA-M, 2025, 236 p., DOI: 10.12737/2154991.
25. Wu C., Li T., Qi J. et al., Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice, *Lwt*, 2020, Vol. 122, P. 109064, DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109064.
26. Zhang K., Zhang T. T., Guo R. R., Ye Q., Zhao H.-L., Huang X.-H., The regulation of key flavor of traditional fermented food by microbial metabolism: A review, *Food Chemistry: X*, 2023, Vol. 19, No. 1, P. 100871, DOI: 10.1016/j.fochx.2023.100871.
27. Sun J., Zhao C., Pu X., Li T., Shi X., Wang B., Cheng W., Flavor and Functional Analysis of *Lactobacillus plantarum* fermented apricot juice, *Fermentation*, 2022, Vol. 8, No. 10, P. 533, DOI: 10.3390/fermentation8100533.
28. Maoz I., Lewinsohn E., Gonda I., Amino acids metabolism as a source for aroma volatiles biosynthesis, *Current Opinion in Plant Biology*, 2022, Vol. 67, No. 1, article 102221, DOI: 10.1016/j.pbi.2022.102221.
29. Jiang J., Xie Y., Cui M., Ma X., Yin R., Chen Y., Li Y., Hu Y., Cheng W., Gao F., Characterization of differences in physicochemical properties, volatile organic compounds and non-volatile metabolites of prune wine by inoculation of different lactic acid bacteria during malolactic fermentation, *Food Chemistry*, 2024, Vol. 452, P. 139616, DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.139616.
30. He Y., Hu M., He W., Li Y., Liu Sh., Hu X., Nie S.-P., Yin J., Xie M., Volatile compound dynamics during blueberry fermentation by lactic acid bacteria and its potential associations with bacterial metabolism, *Food Bioscience*, 2024, Vol. 59, No. 3, article 103639, DOI: 10.1016/j.fbio.2024.103639.
31. Zhang S., Shang Z., Liu Z., Hu X., Yi J., Flavor production in fermented chayote inoculated with lactic acid bacteria strains: Genomics and metabolomics-based analysis, *Food Research International*, 2023, Vol. 163, P. 112224, DOI: 10.1016/j.foodres.2022.112224.
32. Yang J., Sun Y., Gao T., Wu Y., Sun H., Zhu Q., Liu Ch., Zhou Ch., Han Y., Tao Y., Fermentation and storage characteristics of «Fuji» apple juice using *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum*: Microbial growth, metabolism of bioactives and in vitro bioactivities, *Frontiers in Nutrition*, 2022, Vol. 9, No. 9, P. 833906, DOI: 10.3389/fnut.2022.833906.
33. Gengatharan A., Dykes G. A., Choo W. S., Fermentation of red pitahaya extracts using *Lactobacillus* spp. and *Saccharomyces cerevisiae* for reduction of sugar content and concentration of betacyanin content, *Journal of Food Science and Technology*, 2021, Vol. 58, No. 9, P. 3611–362, DOI: 10.1007/s13197-021-05116-2.
34. Zhang C., Chen X., Guo X., Guo R., Zhu L., Qiu X., Yu X., Chai J., Gu Ch., Feng Z., A novel strategy for improving the antioxidant, iridoid, and flavor properties of Noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit juice by lactic acid bacteria fermentation, *Lwt*, 2023, Vol. 184, No. 4, P. 115075, DOI: 10.1016/j.lwt.2023.115075.

35. Muñoz R., Rivas B. de las, Rodríguez H., Esteban-Torres M., Reverón I., Santamaría L., Landete J. M., Plaza-Vinuesa L., Sánchez-Arroyo A., Jiménez N., Curiel J. A., Food phenolics and Lactiplantibacillus plantarum, *International Journal of Food Microbiology*, 2024, Vol. 412, No. 2, P. 110555, DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110555.
36. Ricci A., Cirlini M., Maoloni A., Del Rio D., Calani L., Bernini V., Galaverna G., Neviani E., Lazzi C., Use of dairy and plant-derived lactobacilli as starters for cherry juice fermentation, *Nutrients*, 2019, Vol. 11, No. 2, article 213, DOI: 10.3390/nu11020213.
37. Zhou Y., Wang R., Zhang Y., Yang Y., Sun X., Zhang Q., Yang N., Biotransformation of phenolics and metabolites and the change in antioxidant activity in kiwifruit induced by Lactobacillus plantarum fermentation, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, Vol. 100, No. 8, P. 3283–3290, DOI: 10.1002/jsfa.10272.
38. Burak L. Ch. Ispol'zovanie sovremennyh tekhnologij v proizvodstve fermentirovannyh produktov, *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2023, No. 5, pp. 5–13, DOI: <https://doi.org/10.17513/srts.1446>.
39. Oliveira S. D., Araújo C. M., Borges G., Lima M. D. S., Viera V. B., Garcia E. F., Souza E. L., Oliveir M. E. G., Improvement in physicochemical characteristics, bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) and guava (*Psidium guajava* L.) fruit by-products fermented with potentially probiotic lactobacilli, *Lwt*, 2020, Vol. 134, p. 110200, DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110200.
40. Braga A. R. C., de Souza Mesquita L. M., Martins P. L. G. et al., Lactobacillus fermentation of jussara pulp leads to the enzymatic conversion of anthocyanins increasing antioxidant activity, *Journal of Food Composition and Analysis*, 2018, Vol. 69, P. 162–170, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.12.030>.
41. Wang Q., Hao L., Zhang A., Zhao H., Zhang B., Extraction and characterization of polysaccharides from Schisandra sphenanthera fruit by Lactobacillus plantarum CICC 23121-assisted fermentation, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, Vol. 259, part 1, P. 129135, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129135>.
42. Huang F., Hong R., Zhang R., Dong L., Bai Y., Liu L., Jia X., Wang G., Zhang M., Dynamic variation in biochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from longan pulp during fermentation process, *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, Vol. 132, No. 1, P. 915–921, DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.04.005.
43. Wan Y. J., Shi H. F., Xu R., Yin J.-Y., Nie S.-P., Xiong T., Xie M.-Y., Origin of hypoglycemic benefits of probiotic-fermented carrot pulp, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, Vol. 67, No. 3, P. 895–904, DOI: 10.1021/acs.jafc.8b06976.
44. Halliwell B. Understanding mechanisms of antioxidant action in health and disease, *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2024, Vol. 25, No. 1, P. 13–33, DOI: 10.1038/s41580-023-00645-4.
45. Pontonio E., Montemurro M., Pinto D., Marzani B., Trani A., Ferrara G., Mazzeo A., Gobbetti M., Rizzello C. G., Lactic acid fermentation of pomegranate juice as a tool to improve antioxidant activity, *Frontiers in Microbiology*, 2019, Vol. 10, P. 1550, DOI: 10.3389/fmicb.2019.01550.
46. Wang Y., Han C., Cheng J., Wang Z., Liu L., Huang H., Liang Q., Liu R., Ran B., Li W., Fermented Cerasus humilis fruits protect against high-fat diet induced hyperlipidemia which is associated with alteration of gut microbiota, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, Vol. 103, No. 5, P. 2554–2563, DOI: 10.1002/jsfa.12377.
47. Bamidele M. O., Bamikale M. B., Cárdenas-Hernández E., Bamidele M. A., Castillo-Olvera G., Cortés J. S., Aguilar C. N., Bioengineering in solid-state fermentation for next sustainable food bioprocessing, *Next Sustainability*, 2025, Vol. 6, P. 100105, DOI: 10.1016/j.nxsust.2025.100105.
48. Quan Q., Liu W., Guo J., Ye M., Zhang J., Effect of six lactic acid bacteria strains on physicochemical characteristics, antioxidant activities and sensory properties of fermented orange juices, *Foods*, 2022, Vol. 11, No. 13, P. 1920, DOI: 10.3390/foods11131920.
49. Zhao J., Zeng X., Xi Y., Li J., Recent advances in the applications of Lactobacillus helveticus in the fermentation of plant-based beverages: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 2024, Vol. 147, No. 4, P. 104427, DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104427.
50. Burak L. Ch. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Pishchevaya tekhnologiya, 2024, No. 2-3 (396), pp. 6–13, DOI: 10.26297/0579-3009.2024.2-3.1.
51. Li Q., Zeng X., Fu H., Wang X., Guo X., Wang M., Lactiplantibacillus plantarum: A comprehensive review of its antifungal and anti-mycotoxin effects, *Trends in Food Science & Technology*, 2023, Vol. 136, No. 4, P. 224–238, DOI: 10.1016/j.tifs.2023.04.019.