

УДК 663.42

Формирование ароматического профиля пивоваренной продукции: обзор предметного поля

И. Н. Грибкова, И. В. Лазарева

Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Грибкова Ирина Николаевна
Адрес: 119021, Россия, Москва,
ул. Россолимо, д.7.
E-mail: institut-beer@mail.ru

ЗАЯВЛЕНИЕ О ДОСТУПНОСТИ ДАННЫХ:
данные текущего исследования
доступны по запросу
у корреспондирующего автора.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Грибкова, И. Н., & Лазарева, И. В. (2023). Формирование ароматического профиля пивоваренной продукции: Обзор предметного поля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 97–116.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2023.397>

ПОСТУПИЛА: 30.12.2022

ПРИНЯТА: 24.02.2023

ОПУБЛИКОВАНА: 30.03.2023

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение. В данном обзоре предметного поля проанализированы научные источники, посвященные вопросу создания ароматического профиля пивоваренной продукции (с 2015 по 2022 гг.) при условии соблюдения всех требований, предъявляемых к готовой продукции в рамках действующих в отрасли стандартов качества.

Цель. Целью обзора являлся анализ влияния применяемого растительного сырья, а также микроорганизмов на формирование ароматического профиля пива, а также анализ их влияния на качество готовой пивоваренной продукции.

Материалы и методы. В обзор включены научные публикации российских и зарубежных авторов по вопросам формирования ароматического и вкусового профиля пивоваренной продукции за счет органических соединений зернового и растительного сырья. Поиск научных источников по исследуемой теме на русском и английском языках осуществлялся в базах данных Web of Science и Scopus, а также в электронных библиотеках eLibrary и КиберЛенинка.

Результаты. Выявлены данные о применении ограниченного перечня зернового немодифицированного сырья, отмечен вклад его органических соединений в ароматический профиль пива. Отмечено положительное влияние разнообразных классов соединений, влияющих на образование летучего профиля пива. Выявлены данные о недостаточном количестве низкомолекулярных соединений, обеспечивающих активную бродительную активность микроорганизмов. Зафиксировано влияние специфических органических соединений модифицированного зернового сырья, их вклад в формирование различных ароматических оттенков, что расширяет ассортимент пивоваренной продукции. Выявлено нежелательное влияние недостатка низкомолекулярных углеводных и азотистых соединений, а также наличие свободных фенольных форм веществ, способных оказывать негативное влияние на качество пива. Проанализирована информация о влиянии штаммов дрожжей, их разнообразном метаболизме и вкладе в формирование профиля пивоваренной продукции. Зафиксирован исследовательский интерес к расширению перечня гибридных штаммов для создания новых органолептических оттенков, которые могут иметь нежелательный характер и привносить в пиво посторонние тона.

Выводы. В рамках действующих требований стандарта качества, ограничивающих перечень применяемого растительного сырья для производства пива, вопрос формирования различных ароматов все еще остается открытым, несмотря на ошутимые научные достижения в области разнообразия сырьевой базы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

пивоваренная продукция, ароматический профиль, органические соединения, виды зернового сырья, типы солодов, пивоваренные штаммы дрожжей

Formation of the Aromatic Profile of Brewing Products: Scoping Review

All-Russian Scientific Research Institute of Brewing, Beverage and Wine Industry – Branch of V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems

CORRESPONDENCE:

Irina N. Gribkova

Address: 7, Rossolimo str., Moscow, 119021, Russia
E-mail: institut-beer@mail.ru

FOR CITATIONS:

Gribkova, I. N., & Lazareva, I. V. (2023). Formation of the aromatic profile of brewing products: Scoping review. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 97–116. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.397>

RECEIVED: 30.12.2022

ACCEPTED: 24.02.2023

PUBLISHED: 30.03.2023

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



Irina N. Gribkova, Irina V. Lazareva

ABSTRACT

Introduction. In this Scoping review the sources devoted to the issue of creating an aromatic profile of brewing products (from 2015 to 2022) are analyzed, provided that all requirements for finished products are met within the framework of quality standards in force in the industry.

Purpose. The purpose of the review was to analyze the influence of the plant raw materials used, as well as microorganisms on the formation of the aromatic profile of beer, with respect to positive and negative aspects from the point of view of the quality of finished brewing products.

Materials and Methods. The review includes scientific publications by Russian and foreign authors on the formation of the aromatic and flavor profile of brewing products due to organic compounds of grain and vegetable raw materials. The search for scientific sources on the topic under study in Russian and English was carried out in the Web of Science, Scopus databases and in the electronic library eLibrary.ru.

Results. The data on the use of a limited list of grain unmodified raw materials were revealed, the contribution of its organic compounds to the aromatic profile of beer was noted. The positive influence of various classes of compounds affecting the formation of the volatile profile of beer is noted. The data on the insufficient number of low-molecular compounds providing active fermentation activity of microorganisms were revealed. The influence of specific organic compounds of modified grain raw materials, their contribution to the formation of various aromatic shades, which expands the range of brewing products, is recorded. The undesirable effect of the lack of low-molecular-weight carbohydrate and nitrogenous compounds, as well as the presence of free phenolic forms of substances that can have a negative impact on the quality of beer, has been revealed. The information on the influence of yeast strains, their diverse metabolism and contribution to the formation of the profile of brewing products is analyzed. Research interest has been recorded in expanding the list of hybrid strains to create new organoleptic shades that may have an undesirable character and introduce extraneous tones into beer.

Conclusions. Within the framework of the current requirements of the quality standard, limiting the list of plant raw materials used for beer production, the issue of the formation of various flavors is still open, despite tangible scientific achievements in the field of diversity of the raw material base.

KEYWORDS

brewing products, aromatic profile, organic compounds, types of grain raw materials, types of malts, brewing yeast strains

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным и популярным слабоалкогольным напитком брожения на основе растительного сырья считается пивоваренная продукция (Кретова & Калинина, 2022). Реализация пивоваренной продукции развивается в устойчивых положительных тенденциях — объем производства 2021 г. оценивался 816 млн дал и превышал аналогичный показатель 2020 г. на 3,0% за счет реализации пивных напитков, чья доля в структуре производства выросла с 10,7 до 12%, а доля традиционного пива составила порядка 88% (Кретова & Калинина, 2022).

Чтобы обладать высокой конкурентоспособностью, производители должны выпускать пиво хорошего качества, отвечающее требованиям стандартов и показателям безопасности. Пиво хорошего качества должно иметь приятный вкус и аромат, хорошо пениться и удерживать слой пены, а также соответствовать микробиологическим и физико-химическим нормативам (Erzetti et al., 2009).

Производители пива ограничены видами зернового сырья и видами микроорганизмов в рамках производства качественной пивоваренной продукции, относящейся к категории «пива» в рамках нормативно-правового законодательства РФ. Цель данного обзора предметного поля — рассмотреть влияние применяемого растительного сырья, а также микроорганизмов на формирование ароматического профиля пива; установить их положительное и негативное влияние на качественные параметры пива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Базы данных и временные рамки

Материалами для исследования послужили публикации, из зарубежных баз данных: Web of Science и Scopus, а также российских электронных библиотек eLibrary и Киберленинка, опубликованных в 2015–2022 гг. в количестве 51 статей. Анализировались источники, опубликованные в научных журналах, материалах конференций различных уровней, а также монографии, посвященные тематике исследования. Также анализировались нормативные документы. Для анализа отобраны три документа, регламентирующие качество.

Критерии включения и исключения источников

Ключевыми словами для осуществления поиска в российских электронных библиотеках являлись следующие слова и словосочетания: пиво, ароматика пива, органические соединения пива, профиль готового пива, влияние сырья на образование органолептики пива. Ключевыми словами для осуществления поиска в зарубежных базах данных Scopus и Web of Science являлись: beer, brewing products, aromatic profile of beer, organic compounds, types of grain raw materials, types of malts, brewing yeast strains.

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

Критерии включения:

- (1) Статья написана в период с 2015–2022 год;
- (2) Статьи соответствуют теме исследования;
- (3) Типами анализируемых статей являются оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, монографии и ГОСТы.

Критерии исключения:

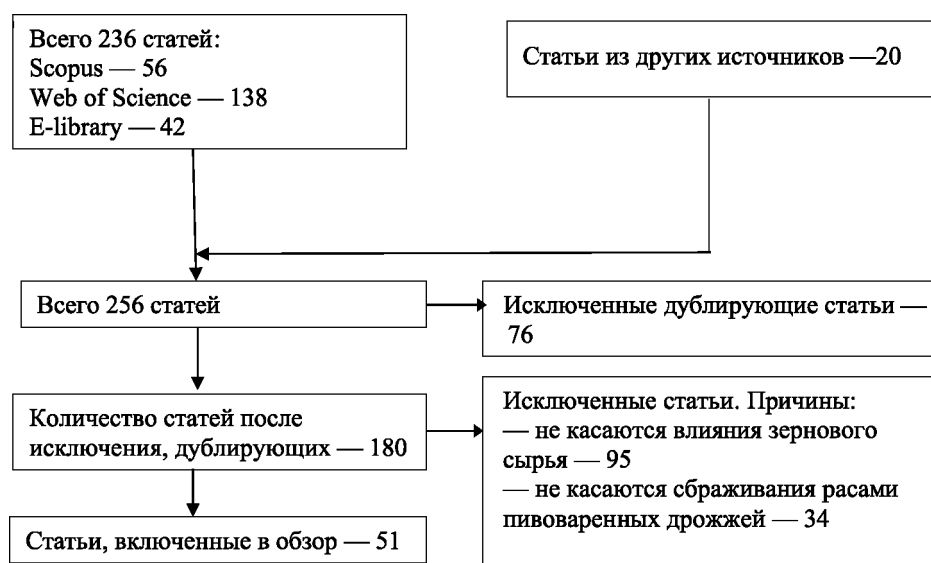
- (1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касаются тематики влияния зернового сырья на формирование ароматического профиля; не касаются тематики сбраживания расами пивоваренных дрожжей;
- (2) Статья написана не на русском или английском языках;
- (3) Жанр статьи — не соответствует указанным жанрам по критериям включения;
- (4) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных

Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали протокол PRIZMA и составлена схема проведения исследования (Рисунок 1).

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA



Примечание. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018 (<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850>). In the public domain.

Извлечение и анализ данных

Для анализа источников, и поиска ответов на исследовательские вопросы: рассмотреть влияние применяемого растительного сырья, а также микроорганизмов на формирование ароматического профиля пива; установить их положительное

и негативное влияние на качественные параметры пива, извлекались данные из 51 статьи, соответствующих критериям включения, и вносились в Таблицу 1.

Источники были проанализированы для сравнения и анализа характеристик сырья, применяемого

Таблица 1

Пример извлечения данных из статей, включенных в обзор

№	Заглавие	Автор и год	Виды злаков и их влияние на вкусовой профиль	Виды используемого сырья и влияние на вкусовой профиль	Влияние штаммов	Влияние микроорганизмов
1	Использование лекарственных трав в технологии темных элей	Иванченко, О. Б., Данина, М. М. (2018)	—	Листьев шалфея и тысячелистника в технологии темных элей. Для эля с тысячелистником оптимальным является замена 30 % хмелепродуктов на фитодобавку. Для эля с шалфеем оптимальная дозировка составляет 1,25 г/л горячего сула. В результате получают напитки с гармоничным ароматом и вкусом	—	—

Примечание. Из "Использование лекарственных трав в технологии темных элей", О. Б. Иванченко и М. М. Данина, 2018, *Вестник Международной академии холода*, (1), с. 11–18.

в технологии пивоваренной продукции; видов злаков и их влияния на вкусовой профиль пива; влияния хмелепродуктов и штаммов микроорганизмов на ароматический профиль и прочие показатели пива.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В пивоварении традиционно используются экстракты растений, такие как Melissa, можжевельник, аир, тимьян и другие, что позволяет получить напиток с приятным ароматом. За последнее время структура реализуемой на территории РФ пивоваренной продукции меняется за счет новых сортов пивоваренной продукции, полученных с применением: экстрактов растительного сырья (Гернет & Грибкова, 2020а), растительного сырья, не характерного для производства пива (лекарственное и растительное сырье в виде экстрактов трав, ово-

щей, фруктов, злаковых и т.п.) (Бурак, 2021; Пономарева и соавт., 2019; Иванченко & Данина, 2018), штаммов микроорганизмов (Пономарева и соавт., 2019; Бурак, 2021; Mikyska et al., 2015), технологических приемов (Новикова и соавт., 2018; Каменская & Черкасова, 2021).

Разный сенсорный (ароматический) профиль пивоваренной продукции формируется за счет органических соединений (спиртов, сложных эфиров, кетонов, альдегидов, органических и карбоновых кислот, фенольных соединений, азото- и серосодержащих соединений и т.д. (Liu et al., 2005). Контроль качества пивоваренной продукции по ГОСТ 31711–2012¹, как основного стандарта для производства пива, ограничивает перечень применяемого зернового и растительного сырья, что несколько усложняет разработку новых сортов продукции с нестандартными вкусовыми профилями. В Таблице 2 представлена сравнительная характеристика сырья, применяемого в технологии пивоваренной продукции.

Таблица 2

Виды сырья, разрешенные к применению в рамках выпуска пивоваренной продукции в соответствии с нормативными документами, регламентирующими качество

Виды сырья	Название продукции и номера ГОСТов, регламентирующих ее качество		
	пиво по ГОСТ 31711–2012 ²	пиво специальное по ГОСТ 31495–2021 ³	пивные напитки по ГОСТ 55292–2012 ⁴
Зерновое сырье			
солод пивоваренный ячменный	+	+	+
солод пшеничный	+	+	+
солод ржаной	-	+	+
ячмень пивоваренный	+	+	+
пшеница	+	+	+
рис	+	+	+
кукуруза	+	+	+
гречневая крупа	-	+	-
просо, овес и др. зерновые	-	+	-
концентраты пивного сусла, солодовые, ячменно-солодовые экстракты и пр.	-	+	+

¹ ГОСТ 31711–2012. (2019). *Пиво. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

² Там же.

³ ГОСТ 31495–2021. (2021). *Пиво специальное. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

⁴ ГОСТ Р 55292–2012. (2019). *Напитки пивные. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ.

Виды сырья	Название продукции и номера ГОСТов, регламентирующих ее качество		
	пиво по ГОСТ 31711–2012 ²	пиво специальное по ГОСТ 31495–2021 ³	пивные напитки по ГОСТ 55292–2012 ⁴
Хмелепродукты			
хмель	+	+	+
хмелепродукты	+	+	+
Сахаросодержащее сырье			
сахар	+	+	+
патока крахмальная	+	+	+
Фруктово-ягодное, пряно-ароматическое растительное сырье, в том числе мед и продукты пчеловодства	-	+	+
Вкусовые и ароматические добавки	-	+	+
Красители, подсластители, консерванты	-	-	-

Влияние зернового сырья на ароматический профиль и прочие показатели пива

Традиционной злаковой культурой для создания пива является ячмень (*Hordeum vulgare* L.), поскольку строение его эндосперма и у несоложенного и соложенного зерна в той или иной степени является источником органических соединений, формирующих коллоидную структуру готового напитка, с одной стороны, и питательными соединениями (в виде низкомолекулярных соединений углеводной и азотистой природы, микроэлементов,

минеральных соединений и пр.), которые служат питательной средой для микроорганизмов, формирующих профиль летучих соединений в процессе брожения, с другой (Gašior et al., 2020).

Другие злаки, такие как пшеница, рожь, овес, тритикале, сорго, кукуруза и т.д., также могут быть использованы в качестве сырья для производства пива (Gašior et al., 2020), при условии, что мы осознаем, что эта процедура может повлиять на вкусовые свойства конечного пива. В Таблице 3 представлено влияние вида злака и его количества на вкусовой профиль пива.

Таблица 3

Дегустационные баллы дескрипторов тона образцов пива

Характеристика	Тон	Соотношение солода и зернового сырья, %								
		без несо- ложенного зернового сырья	ячменя		пшеницы		риса		кукурузы	
			70:30	40:60	70:30	40:60	70:30	40:60	70:30	40:60
Аромат	Зеленое яблоко	2,2	2,4	2,9	2,7	2,8	2,6	3,9	2,9	2,4
	Сладкая кукуруза / вареные овощи	3,4	3,2	1,4	1,7	1,4	4,3	3,6	3,2	3,1
	Бананово-Грушевый	2,3	2,3	2,2	2,4	3,3	1,8	2,1	1,9	1,8
	Дымный	2,3	2,6	1,7	0,6	3,0	1,6	1,4	0,55	0,8
	Солодовый	4,5	4,0	3,7	3,6	2,9	3,8	2,9	3,9	3,1
	Зернистый	3,0	2,5	2,3	2,4	1,5	3,4	3,5	3,2	3,0
	Сливовый	3,2	2,0	2,3	3,1	3,0	2,4	1,9	3,2	2,3

Окончание Таблицы 3

Характеристика	Тон	без несо- ложенного зернового сырья	Соотношение солода и зернового сырья, %							
			ячменя		пшеницы		риса		кукурузы	
			70:30	40:60	70:30	40:60	70:30	40:60	70:30	40:60
Запах	Зеленое яблоко	2,7	3,4	3,9	3,6	3,8	4,0	5,5	3,2	3,7
	Сладкое яблоко	2,2	2,0	1,4	2,7	2,4	1,7	2,3	2,1	2,4
	Бананово-Грушевый	2,8	1,9	1,6	2,8	3,2	2,3	2,3	2,9	1,6
	Солодовый	4,3	3,7	3,0	3,7	4,5	4,2	3,1	3,7	3,4
	Зернистый	2,5	4,0	3,9	3,8	2,4	3,8	4,2	3,7	4,3
	Сливовый	3,1	3,0	2,5	3,0	3,9	3,0	2,9	2,5	3,0
Вкус	Сладкий	3,5	2,6	2,6	2,5	3,2	3,1	3,4	3,4	2,3
	Кислый	2,3	3,5	4,1	2,9	2,9	3,7	3,6	3,7	4,8
	Горький	4,3	4,9	5,1	5,1	4,7	4,5	4,4	4,1	4,7
Полнота вкуса	Вяжущее	4,4	5,1	5,5	4,6	4,8	5,2	4,3	4,7	5,1
	Стойкая горечь	4,2	4,9	5,5	4,4	4,9	4,7	3,4	3,7	4,8

Примечание. Из "Brewing with unmalted cereal adjuncts: Sensory and analytical impacts on beer quality," by J. Yorke, D. Cook, and R. Ford, 2021, *Beverages*, 7(1), article 4 (<https://doi.org/10.3390/beverages7010004>). Copyright 2021 by Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

На основании данных (Таблица 3) авторами сделано заключение о том, что разные злаки и их количество влияют на сенсорное восприятие пива. Так, внесение ячменя более 40% влияет на ощущение восприятия стойкой негармоничной горечи, что подтверждается другими исследованиями (Kunz et al., 2012). Также авторы отметили, что при большем применении доли ячменя уходят солодовые тона, а становятся более ощутимыми дымные и сливово-фруктовые (Yorke et al., 2021).

Согласно данным Таблицы 3, применение большего количества (60%) несоложенной пшеницы способствовало получению пива с высоким порогом восприятия бананового аромата и вкуса, а также ощутимым дымным ароматом, а того же количества риса характеризовало пиво как напиток с ощутимым вкусом зеленого яблока, тогда как 30% количество риса привнесло в пиво аромат сладкой кукурузы, что авторы связали с нехваткой азотистого питания для дрожжей (Yorke et al., 2021). Использование авторами пива с внесением 60%-ной кукурузы, способствовало получению пива несбалансированного аромата и вкуса, где кислота была несбалансирована с полнотой вкуса (Таблица 3).

Здесь авторы связывают кислоту во вкусе с низкой буферностью пива или недостатком фосфорных ионов (Yorke et al., 2021). Представленные в Таблице 4 характеристики зерновых культур (Cadenas et al., 2021) наглядно подтверждают причину нехватки питательных веществ в сусле при использовании несоложенных злаковых культур.

Анализ летучих соединений показал, что существует взаимосвязь между органолептическими ощущениями дескрипторов и содержанием летучих продуктов брожения. Так, концентрация ацетальдегида была значительно выше в пиве, приготовленном с 60% риса по сравнению с солодовым пивом и, в свою очередь характеризуется ароматом зеленого яблока (Mayer et al., 2016). Авторы связали эффект увеличения концентрации ацетальдегида с высокой плотностью сусла и низкой концентрацией кислорода при брожении (Yorke et al., 2021). За счет снижения в сусле из солода, риса и кукурузы источников углеводов и азота произошло большее накопление высших спиртов через пируват во время брожения, что объясняет вкусо-ароматические профили данных образцов пива (Yorke et al., 2021). Отмечалось снижение концентрации эфиров в пиве

Таблица 4

Характеристики несоложенных злаковых культур, оказывающие влияние на технологический процесс (Cadenas et al., 2021; Blšáková, et al., 2022; Charmier et al., 2021)

Злаковая культура	Температура клейстеризации, °C	Экстрактив-ность, % (Cadenas et al., 2021)	Экстрактивность солода из культуры, % (Blšáková, et al., 2022)	Диастатическая сила, ед. WK (Charmier et al., 2021)
Пшеница	52–66 (Rakhshi et al., 2022)	75	85,7	405
Рис	67–91 (Pang et al., 2016)	84	64,0–77,8	19–62
Ячмень	58–66 (Rittenauer et al., 2021)	70	76–88	200–416
Кукуруза	62–80 (Wang et al, 2018)	78	68–68,75	77

Примечание. Из "Brewing with starchy adjuncts: Its influence on the sensory and nutritional properties of beer", by R. Cadenas, I. Caballero, D. Nimubona and C. A. Blanco, 2021, *Foods*, 10(8), Article 1726 (<https://doi.org/10.3390/foods10081726>). Copyright 2021 by Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

"The use of unconventional malts in beer production and their effect on the wort viscosity", by L. Blšáková, T. Gregor, M. Mešt'ánek, L. Hřivná and V. Kumbár, 2022, *Foods*, 11(1), Article 31 (<https://doi.org/10.3390/foods11010031>). Copyright 2022 by Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

"Diastatic power and maltose value: a method for the measurement of amylolytic enzymes in malt", by L. M. Charmier, C. McLoughlin, and B. V. McClear, 2021, *Journal of the Institute of Brewing*, 127(4), pp. 327–344 (<https://doi.org/10.1002/jib.665>). Copyright 2021 by John Wiley & Sons, Inc.

с несоложенным зерновым сырьем вследствие недостатка свободного аминного азота в сусле. Отмечалась негативная роль серосодержащих соединений (сульфиды, тиолы, тиоэфиры) в образовании негативных оттенков вареных овощей в пиве, даже при низких их концентрациях.

В рамках одного типа зерновых также могут влиять генные факторы, поскольку различные генотипы, например, ячменя или других видов зерновых культур, приводят к различному химическому составу, что влияет, в конечном счете, на состав сусла — меняется соотношение фракций азотистых соединений, активности ферментативных систем, а также фракционные составы прочих органических соединений (углеводной, фенольной природы и пр.) (Díaz et al., 2022). В литературе приводятся примеры применения конкретных сортов ячменя, пиво на основе которого приобретает более выраженные фруктово-цветочные и травянистые ноты во вкусе, или классические сорта ярового ячменя с легким солодовым вкусом и пр. (Herb et al., 2017). Более того, исследования 2021г. показали, что формирование ароматических и вкусовых различий пива из ячменя начинается «на корню», то есть зависит

от географического местоположения возделывания ячменя (широты, долготы, высоты над уровнем моря, количеством осадков в год, составом почв и т.д.) (Kyraleou et al., 2021). Таким образом, с одной стороны, присутствует вклад органических соединений зернового сырья, влияющих на метаболизм дрожжей и обуславливающих концентрацию летучих соединений, приведенных в Таблице 5.

Использование зернового сырья приводит к применению экзогенных ферментов, переработке питательных веществ, нарушению фракционного состава сусла или, наоборот, к очень низкому экстракту сусла (Cadenas et al., 2021), что сказывается на процессе брожения и приводит к неслаженному вкусу пива. Другие исследователи (Maia et al., 2021) отмечают, что применение злаковых культур (например, несоложенного риса или кукурузы) приводят к получению пива с интересными оттенками во вкусе, однако после процесса достижения необходимого уровня свободного аминного азота в сусле (продолжительной белковой паузы) стабильность вкуса при хранении пива оказалась меньшей по сравнению с ячменным пивом. С другой стороны, применение соложенного сырья, осо-

Таблица 5

Вклад метаболитов клеток дрожжей в ароматический профиль пива

Название соединения		Аромат в пиве	Порог ощущения аромата (мг/дм³)
по IUPAC	тривиальное		
Высшие спирты (алифатические)			
пропан-1-ол	n-пропанол	алкоголя	800
2-метилпропанол	изобутиловый спирт	алкоголя	200
2-метилбутанол	изобутиловый спирт	алкоголя, банана, лекарственный	65
3-метилбутанол	изоамиловый спирт	алкоголя	70
2-фенилэтанол	фенилэтиловый спирт	розы, сладкий	125
Сложные эфиры			
этилэтаноеат	этилацетат	фруктовый, сладкий	30
3-метилбутилацетат	изоамилацетат	банана, яблока, эфирного масла	1,2
2-фенилэтилацетат	фенилэтилацетат	розы, меда, яблока, сладкий оттенок	3,8
этилгексаноат	этилкапроат	кислого яблока	0,21
этилоктаноат	этилкаприлат	кислого яблока	0,9
Карбонильные соединения			
этаналь	ацетальдегид	зелени, зеленых листьев, фруктовый	25
2,3-бутандион	диацетил	масляного алкоголя	0,15

Примечание. Из "Flavour-active volatile compounds in beer: Production, regulation and control," by A. O. Olaniran, L. Hiralal, M. P. Mokoena, and B. Pillay, 2017, *Journal of the Institute of Brewing*, 123(1), pp. 2313–2323 (<https://doi.org/10.1002/jib.389>). Copyright 2017 by John Wiley and Sons.

бенно красящих солодов, обуславливает наличие в пиве летучих соединений, образующихся в результате окисления предшественников липидов; в результате комплекса реакций Майяра (меланоидинообразования) и карамелеобразования; синтеза алифатических соединений серы; высвобождение фенолов (Olaniran et al., 2017). Липиды ячменя при солодоращении расщепляются до ароматических альдегидов, которые обладают травянистыми тонами, ароматом зеленого солода. Однако, при повышении температуры отсушки, подобные альдегиды отсутствуют (Gordon et al., 2018).

При нагревании редуцирующих сахаров проросшего солода (глюкозы, мальтозы, ксилозы, арабинозы) с азотистыми соединениями (аминов, аминокислот или просто солей аммония) образуются ароматические и цветообразующие редуцтоны и дегидроредуцтоны, полимеризующиеся впоследствии до желтых, коричневых и черных пигментов — продуктов реакции карамелизации и меланоидинообразования

(Olaniran et al., 2017). Необходимо иметь в виду, что изменения профиля органических соединений, возникающие при реакции Майяра обедняют качественно и количество профиль сбраживаемых сахаров и аминокислот, что негативно влияет на скорость брожения, и вызывает изменение профиля ароматических соединений-метаболитов (Castro et al., 2021). Исследователями установлено, что термическая обработка солода при отсушке приводит к изменению и фенольного профиля в специальных окрашенных солодах (Carvalho et al., 2016).

Влияние применения красящих солодов на показатели пива приведены в Таблице 6.

Данные Таблицы 4 свидетельствуют о том, что присутствие в составе засыпи пива красящих солодов приводит к более низкому содержанию алкоголя вследствие недостаточного содержания питательных веществ (сахаров и аминного азота, а также неферментативных продуктов реакции Майяра), по-

Таблица 6

Состав органических соединений суслу и пива из специальных солодов

Тип солода (цвет, ед. ЕВС)/температура отсушки, °С	Содержание в образцах			
	в сусле, г/дм ³		в пиве	
	редуцирующие сахара	аминный азот	полифенольные соединения, мг GAE/дм ³	диацетил, мкг/дм ³
Светлый (2–4)/85	98,70 ± 0,10	255,33 ± 1,73	91,65 ± 0,12	0,49 ± 0,01
Мюнхенский (15–25)/100	96,33 ± 0,25	234,33 ± 2,89	75,34 ± 1,21	1,89 ± 0,07
Венский (6–10)/95	96,83 ± 0,06	230,10 ± 3,61	93,50 ± 5,15	0,92 ± 0,04
Карамельный (5–236)/150	81,67 ± 0,29	200,67 ± 8,50	11,67 ± 5,78	0,28 ± 0,03
Обжаренный (47–49)/165	84,63 ± 0,06	219,67 ± 2,08	116,27 ± 3,10	0,25 ± 0,04

Примечание. Из "Impact of specialty malts on wort and beer characteristics," by L. F. Castro, A. D. Affonso and R. M. Lehman, 2021, *Fermentation*, 7(3), article 137 (<https://doi.org/10.3390/fermentation7030137>). Copyright 2021 by Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

вышенному содержанию фенольных соединений и низкому уровню вицинальных дикетонов. Другими авторами (Prado et al., 2023), изучавшими влияние красящих солодов на ароматический профиль пива, установлено, что альдегиды готового пива (2-метилбутаналь, 2-метилпропаналь, 3-метилбутаналь, 3-(метилтио)пропаналь, бензальдегид и фенилацетальдегид) отвечают за оттенки солодового вкуса (солодовый, бисквитный, хлебный, сухофруктов, карамели, жаренных оттенков) и они более выражены в составе пива, полученном при использовании красящих солодов (мюнхенском, венском, меланоидиновом). Было установлено, что аромат пива формируется также посредством потребления дрожжами предшественников реакции Майяра из соложенного сырья в целях создания новых ароматических соединений.

В отношении изменения фенольного профиля пива было обнаружено, что при наличии красящих солодов в пиве наиболее распространенными представителями были галловая и феруловая кислоты, содержание которых увеличивалось с увеличением количества солода в пиве (Liguori et al., 2021). Однако, было отмечено, что наибольшее количество карамельного солода также отвечает за более высокую мутность и пониженную стабильность пены.

Низкомолекулярные продукты цветных реакций такие как пиразин, фурфурол и мальтол, обеспечивают такие ароматы, как поджаренный, ореховый, хлебный и карамельный (Bettenhausen et al., 2018) и переходят отчасти в пиво. Пиразины, как отмечается (Vandecan et al., 2011), по содержанию были преобладающими в обжаренном солоде, и присутствовали в виде 2,3-диэтил-5-метилпиразина и 2-этил-3,5-диметилпиразина.

В Таблице 7 представлены основные соединения специальных солодов и соответствующий им аромат.

Имеются и негативные стороны от применения специальных солодов на качество пива. Combe et al. (2013) сообщают о положительном влиянии обжаренных солодов (черного солода, жареного ячменя) и пшеничного солода на пенообразующие свойства коллоидной структуры пива и негативном влиянии специальных солодов (карамельного солода типа кристалл) на характеристики пены.

К отрицательным моментам применения специальных, особенно обжаренных солодов, относится уровень извлекаемых фенольных соединений. Так, при производстве солода на стадии отсушки свежепроросшего солода увеличивается количество эте-

Таблица 7

Вклад органических соединений специальных солодов в аромат пива

Название соединения		Аромат
по IUPAC	тривиальное	
2-метилпропаналь	изобутиральдегид	выпечки
3-метилбутаналь	изовалеральдегид	ореховый
2-метилбутаналь	2-метилбутиральдегид	выпечки
пентаналь	валеральдегид	ореховый
гексан-1-ол	гексаналь	травы
фуран-2-альдегид	фурфурол	ржаной корочки
фурил-2-метанол	фурфуриловый спирт	кофе
метил-2-фурилокетон	2-ацетилфуран	земляной
бензальдегид	бензойный альдегид	миндальный
5-метил-2-фуральдегид	5-метил фурфураль	кофейный, шоколадный
1-октен-3-ол	октенол	травы
2-пентилфуран	2-пентилфуран	земляной
2-этил-6-метилпиразин	2-этил-6-метилпиразин	выпечки
пиррол-2-карбоксиальдегид	2-пирролальдегид	кофе
2-этил-1-гексанол	2-этилгексанол	фруктовый
фенилацетальдегид	фенилуксусный альдегид	медовый, сладкого картофеля
транс-2-октеналь	трансгексен	цветочный, зелени
2-ацетил пиррол	2-ацетилазол	жженный
3,5-диметил-2-этилпирразин	диметил пирразин	ореховый, выпечки
нонаналь	нонанальальдегид	медовый
2-изопропил-5-метил-2-гексеналь	изодигидро лавандулаль	молочный шоколад
транс-2-ноненаль	транс ноненаль	травы
3-гидрокси-2-метил-4Н-пиран-4-он	мальтол	карамельный
2-метил-3-изобутилпиразин	метоксипиразин	сахарного сиропа
1-фурфурилпиррол	фурфуриловый спирт	ореховый, кремный
дециловый альдегид	дециловый альдегид	хрустящей корочки
2-пропилгептан-1-ол	2-пропилгептанол	рисовых отрубей
2-фенил-2-бутеналь	бутанол фенил	поджаренного бисквита
4-этил-2-метоксифенол	4-этил гваякол	дымный, острый
транс-2,4-декадиен-1-аль	транс декадиен	земляной, травы
4-метил-2-фенил-2-пентеналь	4-метил бензальдегид	хлебный
ацетат 3,7-диметил-транс-2,6-октадиен-1-ола	геранилацетон	травы
додекан-1-ол	1-додеканол	земляной

Примечание. Из "Sensory lexicon and aroma volatiles analysis of brewing malt," by X. Su, S. Wu, M. Ma, H. Su, F. Guo, Q. Bian, and T. Du, 2022, *Science of Food*, 6, article 20 (<https://doi.org/10.1038/s41538-022-00135-5>). Copyright 2022 by Springer Nature Limited.

рифицированных фракций фенольных соединений (Carciochi et al., 2016). Данный эффект связан с биокаталитическим распадом растительной матрицы солода, способствующим появлению связанных фенольных соединений, что приводит к их экстракции при затирации (Carciochi et al., 2016; Shopska et al., 2021). Высокие температуры на конечной стадии получения солода (выше 135°C) приводят к появлению полимеризованных фенольных соединений, которые ответственны за образование белково-фенольных комплексов, вызывающих помутнения, при хранении пива (Shopska et al., 2021; Martinez-Gomez et al., 2020).

Влияние хмелепродуктов на ароматический профиль и прочие показатели пива

Вопрос влияния органических соединений хмелепродуктов подробно рассматривался в работе (Гернет & Грибкова, 2020б), поэтому более подробно остановимся на неочевидных отрицательных сторонах применения хмелепродуктов. Исследователями было обнаружено (Rutnik et al., 2022), что фактор продолжительности хранения сильно влияет на качество охмеления — с увеличением продолжительности хранения снижается интенсивность и качество хмелевого аромата: качество горечи и аромата ухудшилось, наблюдался эффект гашинга. С другой стороны, установлено, что условия холодного охмеления позволило добиться высоких

уровней мономеров флаван-3-ола (до 6,6 мг/мг³) и олигомеров (до 14,1 и 10,2 мг/дм³ димеров и тримеров соответственно), а также увеличения цвета пива при хранении, и интенсификации образования комплексов холодного помутнения (Ferreira et al., 2022), что наглядно иллюстрируют данные Таблицы 8.

Влияние штаммов микроорганизмов на ароматический профиль и прочие показатели пива

В зависимости от физиологического набора ферментных систем микроорганизмов в литературе сообщается о различном эффекте на ароматный профиль пива в зависимости от метаболитов. Matukas et al. (2022) сообщают о влиянии разных штаммов дрожжей (*S. cerevisiae* var. *diastaticus*, *S. cerevisiae* var. *bayanus*, *Brettanomyces clausenii*) на основные показатели качества пива: отмечалось значительное изменение в концентрации алкоголя, цвета, концентрации 3-метил-1-бутанола, L-α-терпинеола, 3-метилбутилового эфира гексановой кислоты и изобутилового эфира н-каприновой кислоты, а также в качественном и количественном содержании биогенных аминов. Показано, что в зависимости от генов, реплицирующихся в органеллах клетки, тот или иной микроорганизм вырабатывает метаболиты, формирующие ароматический профиль пива (Таблица 9).

Таблица 8

Влияние количества стадий обработки сухим охмелением на качество пива

Содержание	Схема охмеления						
	контроль	одностадийное охмеление при дозировке, г/100дм ³			двухстадийное охмеление при дозировке, г/100дм ³		
		386	772	1554	386	772	1554
Изогумулона (мг/дм ³)	18,5	17,0	16,6	17,2	16,9	14,0	13,5
Гумулинонов (мг/дм ³)	но	4,0	6,9	8,0	4,7	7,4	10,5
Единицы горечи (ibu)	23,0	27,0	31,0	35,5	28,5	33	38,5
Полифенолов (мг/дм ³)	200	203	231	283	197	229	295
Действительный экстракт (%)	3,89	3,97	4,07	4,26	3,97	4,06	4,24
Цвет (°asbc)	8,47	8,70	8,90	9,11	8,67	8,74	9,01
Мутность (°asbc)	64	91	125	128	96	90	114

Примечание. Из "A comparison of single-stage and two-stage dry-hopping regimes," by D. G. Hauser, K. R. Van Simaeys, S. R. Lafontaine, and T. H. Shellhammer, 2019, *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 77(4), pp. 251–260 (<https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1668230>). Copyright 2019 by American Society of Brewing Chemists.

Таблица 9

Гены микроорганизмов, кодирующие ферментативный комплекс, ответственный за формирование вкусового профиля, на примере *S. Cerevisiae*

Группа генов	Класс органических соединений, вырабатываемых генами	Ферментативная активность, соответствующая генам	Органелла клетки, ответственная за выработку фермента
ADH1–5; SFA1	Высшие спирты	Алкогольдегидрогеназа	Цитоплазма, митохондрии, ядро
AP03, 4, 7, 10	2-Фенилэтанол	Фенилпируватдекарбоксилаза, 3-дезоксид-арабино-гептулозонат-7-фосфатная (dahp) синтаза, 3-дезоксид-арабино-гептулозонат-7-фосфатная (dahp) синтаза, мутаза хоризмата	Цитоплазма
ATF1,2	Ацетатные эфиры	Алкоголь ацетил-коа трансфераза	Липидные капли, эндоплазматический ретикулум
BAT1,2	Высшие спирты и др. Ароматические соединения	Аминокислотная трансфераза с разветвленной цепью	Митохондрии. Цитоплазма
LEU4	Изоамиловый спирт	α -изопропилмалатсинтаза	Митохондрия / цитоплазма
IAH1	Изоацетат	Изоацетат-гидролизующая эстераза	Цитоплазма
BTS1	Терпеноиды	Фарнезилтрансфераза / геранилгеранилдифосфат (ggpp) синтаза; биосинтез терпеноидной основы (биосинтез изопреноидов с10-с20)	Эндоплазматический ретикулум
COQ1; SRT1	Монотерпеноиды	Транс-гексапренил трансферазы/гексапренил пиродифосфат синтаза; Пренилдифосфат синтаза; биосинтез терпеноидной основы	Митохондрии, липидные капли/митохондрии
EAT1	Этил ацетат	Этанол ацетил-коа трансфераза	Митохондрии
EEB1	Этил гексаноат	Этанол ацил-коа трансфераза	Не установлено
EHT1	Этил гексаноат	Этанол ацил-коа трансфераза	Липидные капли/митохондрии
ERG8, 12, 20; MVD1	Терпеноиды	Фосфомевалонаткиназа; мевалонат киназа; фарнезилдифосфат (fpp) синтаза / диметилаллил трансфераза; биосинтез терпеноидной основы; дифосфомевалонатдекарбоксилаза; биосинтез изопентенилдифосфата	Цитоплазма, внеклеточная секреция; ретикулум; ядерная оболочка
IDI1	Монотерпеноиды	Изопентенил-дифосфат (ipp) изомераза; биосинтез терпеноидной основы	Цитоплазма / ядро
STR3	Полифункциональные тиолы (3-сульфанил гексанол)	Цистатионин- β -лиаза	Пероксисома
IRC7	Полифункциональные тиолы (4-сульфанил-4-метилпентан-2-он)	Углерод-серная β -лиаза	Цитоплазма
OYE2	Гераниол \rightarrow цитронеллол	Nadph дегидрогеназа 2 (старый желтый фермент 2); восстановление гераниола в цитронеллол	Цитоплазма / митохондрия / ядро
PLB2	Этилок-октаноат	Лизофосфолипаза	Мембрана / периплазма / внеклеточная секреция

Примечание. Из "The molecular biology of fruity and floral aromas in beer and other alcoholic beverages," by S. Holt, M. H. Miks, B. T. de Carvalho, M. R. Foulquié-Moreno, and J. M. Thevelein, 2019, *Microbiology Reviews*, 43(3), pp. 193–222 (<https://doi.org/10.1093/femsre/fuy041>). Copyright 2019 by FEMS.

В пивоварении принято применять дрожжи расы *Saccharomyces*, которая на данный момент состоит из восьми биологически различных видов дрожжей, успешно применяемых в пивоварении: *S. cerevisiae*, *S. paradoxus*, *S. cariocanus*, *S. uvarum*, *S. mikatae*, *S. kudriavzevii*, *S. arboricola* и *S. Eubayanus*, а также *S. pastorianus* и *S. Bayanus* (Iorizzo et al., 2021; Iorizzo et al., 2021; Iattici et al., 2020; Rossi et al., 2018; Krogerus et al., 2022). Представлена информация об особенностях применяемых на сегодняшний момент гибридов дрожжей, представленных в Таблице 10.

Исследуется вопрос, что более влияет на формирование аромата пива — хмель или метаболические процессы дрожжевой клетки. Так авторы (Steyer et al., 2017) исследовали влияние дрожжей и хмелевых органических соединений на ароматный профиль пива и обнаружили, что из 39 обнаруженных летучих соединений 9 подверглись влиянию сорта

хмеля, 2 — штамму дрожжей и 28 оставшихся — менялись исходя из типа и сорта и хмеля и штамма дрожжей. Исследовалось также удалось установить, что дрожжи преобразуют терпены, а сорт хмеля влияет на конечную концентрацию эфиров, что подтвердили в своей работе другие авторы (Holt et al., 2019; Haslbeck et al., 2018; Pang et al., 2016; Rakhshi et al., 2022; Rittenauer et al., 2021).

Для того, чтобы исключить нестабильность вкуса, вызываемую низкой стойкостью эфирного масла, что затрудняет достижение стабильно высокого хмелевого вкуса в пиве, Denby et al. (2018) сконструировали методами генной инженерии пивные дрожжи, которые включают гены ферментов для биосинтеза ароматических монотерпеновых молекул, полученных из дрожжей, мяты и базилика.

Сообщается, что дрожжи, полученные генной модификацией или полученные из «диких» видов,

Таблица 10

Характеристики новых гибридных штаммов пивоваренных дрожжей (Iorizzo et al., 2021; Iorizzo et al., 2021; Iattici et al., 2020; Rossi et al., 2018; Krogerus et al., 2022)

Исходные штаммы дрожжей	Отличительные черты гибридных штаммов
<i>S. cerevisiae</i> верховые/ <i>S. cerevisiae</i> sake	Вырабатывают больше этанола и сложных эфиров по сравнению с пивом, сброженным низовой <i>s. Cerevisiae</i>
<i>S. cerevisiae</i> верховые/ <i>S. cerevisiae</i> var. <i>diastaticus</i>	Высоко осмоотолерантен, вырабатывает больше этанола, чем исходный <i>s. Cerevisiae</i>
<i>S. cerevisiae</i> верховой/ <i>S. bayanus</i>	Гибридизация данных двух рас способствует бродящей активности при низкой температуре
<i>S. cerevisiae</i> верховая/ <i>S. bayanus</i>	Гибридный штамм показал большую стрессоустойчивость (в зависимости от давления и температуры), сбраживаемости и устойчивости по отношению к концентрации спирта
<i>S. cerevisiae</i> , <i>S. paradoxus</i> и <i>S. pastorianus</i>	Производят большее количество изоамилацетата при сохранении сбраживающей активности
<i>S. cerevisiae</i> / <i>S. eubayanus</i>	Устойчивость к низким температурам, способность сбраживать олигосахариды
<i>S. cerevisiae</i> / <i>S. eubayanus</i>	Устойчивы к низким температурам, сбраживают мальтотриозу, обладают сильной флокуляцией, высокая сбраживающая активность, способность накапливать высокое содержание алкоголя
<i>S. cerevisiae</i> верховая и винная раса/ <i>S. eubayanus</i>	Большее разнообразие ароматических соединений вследствие более богатого ферментативного набора
<i>S. cerevisiae</i> верховая раса/ <i>S. eubayanus</i>	Повышенная скорость ферментации и продуцирование более высоких концентраций ароматообразующих эфиров
<i>S. cerevisiae</i> / <i>S. uvarum</i>	Устойчивость к температуре в широком диапазоне, устойчивость к высоким содержаниям этанола, сбраживание ряда углеводов

интенсивно (за 4–10 суток) сбродили мономерные сахара и мальтозу, затем стали усваивать мальтотриозу, что привело к содержанию алкоголя в пиве от 4,9 до 5,5%, полученного с применением штаммов *Saccharomyces pastorianus*, *S. jurei* и *S. Eubayanus* (Hutzler et al., 2021; Wang et al., 2018). Сообщается также, что за период брожения накопились летучие вещества (до 0,4 мг/дм³ этилгексаноата) с яблочно-анисовыми тонами, в пиве *S. jurei*, (до 100 мг/дм³ фенилэтанола) у пива с *S. eubayanus*. Однако, в качестве негативного фактора в пиве, сброженном *S. jurei*, были отчетливо заметны несвойственные фенольные пряно-гвоздичные нотки, нотки тропических фруктов.

Таким образом, регулирование аромата именно пива, качество которого регламентировано за счет применения ограниченного перечня растительного сырья, остается ограниченным, поскольку применение ароматических веществ запрещено в технологии категорически. И это является интересным открытым вопросом для исследований.

ВЫВОДЫ

Обзор влияния растительного сырья — зернового (модифицированного и непророщенного), хмелепродуктов, а также различных микроорганизмов выявил их непосредственное влияние на ароматический профиль пивоваренной продукции. Установлено, что применение различных зерновых культур, а также обжаренных солодов значительно влияет на состав органических соединений пива, которые напрямую или посредством ферментативного аппарата дрожжей составляют ароматный профиль готовой продукции. Наряду с положительными моментами расширения ассортимента линейки пивоваренной продукции установлены отрицательные моменты. Они касаются недостатка низкомолекулярных веществ в составе зерновых

культур, переработанности эндосперма солодового сырья разных типов, что приводит к недостаточной степени сбраживания пивного сусла. Отмечено отрицательное влияние фенольных соединений хмелепродуктов, вызывающих образование помутнений в готовой продукции. Со стороны разнообразных микроорганизмов отмечается большой вклад в формирование органолептического профиля за счет индивидуального метаболизма конкретного штамма, который не всегда является сбалансированным. В результате проведенных аналитических исследований была достигнута цель исследований, которая сформировала направление для дальнейших исследований в плане изучения способов расширения вариантов ароматных профилей пива в рамках требований нормативно-правовых актов на пиво. Согласно вышеуказанным актам, регламентирующим качество пива, расширение оттенков ароматного и вкусового профиля продукции может происходить за счет ограниченного спектра растительного сырья (солода, хмеля). Поэтому встает вопрос о создании инновационных материалов на основе отработанного сырья, которое может использоваться в качестве носителя аромата/вкуса, расширяющее ассортимент выпускаемой продукции.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Грибкова Ирина Николаевна — разработка или проектирование методологии исследования; подготовка и создание черновика рукописи, в частности написание первоначального текста рукописи.

Лазарева Ирина Валерьевна — формулирование исследовательских целей и задач; подготовка и создание рукописи, её комментирование или просмотр.

ЛИТЕРАТУРА

- Бурак, Л. Ч. (2021). Перспективы производства пива с функциональными свойствами. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, (2), 79–88. <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-2-79-8>
- Гернет, М. В., & Грибкова, И. Н. (2020а). Современные способы использования хмелепродуктов в пивоварении. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (4), 34–42. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.328>
- Гернет, М. В., & Грибкова, И. Н. (2020б). Влияние соединений хмеля и хмелепродуктов на сенсорный профиль готового пива. *XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*, (1), 93–99.
- Иванченко, О. Б., & Данина, М. М. (2018). Использование лекарственных трав в технологии темных элей. *Вестник Международной академии холода*, (1), 11–18. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-1-11-18>
- Каменская, Е. П., & Черкасова, Е. С. (2021). Использование метода низкотемпературного контакта дрожжей с суслом в технологии безалкогольного пива. *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*, (4), 166–171. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-166-171>
- Крегова, Ю. И., & Калинина, И. В. (2022). Особенности рынка пивоваренной продукции в текущих экономических условиях: состояние и перспективы развития. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Пищевые и биотехнологии*, 10(2), 5–14. <https://doi.org/10.14529/food220201>
- Новикова, И. В., Муравьев, А. С., Ланкина, А. К., & Москалев, В. А. (2018). Оценка влияния рецептурного состава на сенсорные и физико-химические свойства пива в стиле SAISON. *Пиво и напитки*, (3), 34–38.
- Пономарева, О. И., Борисова, Е. В., & Прохорчик, И. П. (2019). Влияние технологических характеристик различных видов сырья на вкус и аромат кислых элей. *Техника и технология пищевых производств*, 49(2), 235–244. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-235-244>
- Bettenhausen, H. M., Barr, L., Broeckling, C. D., Chaparro, J. M., Holbrook, C., Sedin, D., & Heuberger, A. L. (2018). Influence of malt source on beer chemistry, flavor, and flavor stability. *Food Research International*, 113, 487–504. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.024>
- Blišáková, L., Gregor, T., Mešťánek, M., Hřivná, L., & Kumbár, V. (2022). The use of unconventional malts in beer production and their effect on the wort viscosity. *Foods*, 11(1), Article 31. <https://doi.org/10.3390/foods11010031>
- Cadenas, R., Caballero, I., Nimubona, D., & Blanco, C.A. (2021). Brewing with starchy adjuncts: Its influence on the sensory and nutritional properties of beer. *Foods*, 10(8), Article 1726. <https://doi.org/10.3390/foods10081726>
- Carciocchi, R. A., Dimitrov, K., & Galván, D. A. L. (2016). Effect of malting conditions on phenolic content, Maillard reaction products formation, and antioxidant activity of quinoa seeds. *Journal of Food Science and Technology*, 53(11), 3978–3985. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2393-7>
- Carvalho, D. O., Gonçalves, L. M., & Guido, L. F. (2016). Overall antioxidant properties of malt and how they are influenced by the individual constituents of barley and the malting process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 927–943. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12218>
- Castro, L. F., Affonso, A. D., & Lehman, R. M. (2021). Impact of specialty malts on wort and beer characteristics. *Fermentation*, 7(3), Article 137. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030137>
- Charmier, L. M. J., McLoughlin, C., & McCleary, B. V. (2021). Diastatic power and maltose value: a method for the measurement of amylolytic enzymes in malt. *Journal of the Institute of Brewing*, 127(4), 327–344. <https://doi.org/10.1002/jib.665>
- Combe, A., Ang, J., & Bamforth, C. (2013). Positive and negative impacts of specialty malts on beer foam: A comparison of various cereal products for their foaming properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(9), 2094–2101. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6117>
- Denby, C. M., Li, R. A., & Vu, V. T. (2018). Industrial brewing yeast engineered for the production of primary flavor determinants in hopped beer. *Nature Communications*, 9, Article 965. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03293-x>
- Díaz, A. B., Durán-Guerrero, E., Lasanta, C., & Castro, R. (2022). From the raw materials to the bottled product: influence of the entire production process on the organoleptic profile of industrial beers. *Foods*, 11(20), Article 3215. <https://doi.org/10.3390/foods11203215>
- Erzetti, M., Marconi, O., Bravi, E., Perretti, G., Montanari, L., & Fantozzi, P.J. (2009). HACCP in the malting and brewing production chain: mycotoxin, nitrosamine and biogenic amine risks. *Italian Journal of Food Science*, 21, 211–230.
- Ferreira, C. S., Simon, M., & Collin, S. (2022). Why catechin and epicatechin from early hopping impact the color of aged dry-hopped beers while flavan-3-ol oligomers from late and dry hopping increase colloidal instability. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(2), 255–264. <https://doi.org/10.1080/03610470.2022.2062156>
- Haslbeck, K., Bub, S., von Kamp, K., Michel, M., Zarnkow, M., Hutzler, M., & Coelhan, M. (2018). The influence of brewing yeast strains on monoterpene alcohols and esters contributing to the citrus flavour of beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(4), 403–415. <https://doi.org/10.1002/jib.523>
- Hauser, D. G., Van Simaey, K. R., Lafontaine, S. R., & Shellhammer, T. H. (2019). A comparison of single-stage and two-stage dry-hopping regimes. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 77(4), 251–260. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1668230>
- Herb, D., Filichkin, T., Fisk, S., Helgersson, L., Hayes, P., Meints, B., Jennings, R., Monsour, R., Tynan, S., & Vinckmeier, K. (2017). Effects of barley (*Hordeum vulgare* L.)

- variety and growing environment on beer flavor. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 75(4), 345–353. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2017-4860-01>
- Holt, S., Miks, M. H., de Carvalho, B. T., Foulquié-Moreno, M. R., & Thevelein, J. M. (2019). The molecular biology of fruity and floral aromas in beer and other alcoholic beverages. *FEMS Microbiology Reviews*, 43(3), 193–222. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy041>
- Hutzler, M., Michel, M., Kunz, O., Kuusisto, T., Magalhães, F., Krogerus, K., & Gibson, B. (2021). Unique Brewing-Relevant Properties of a Strain of *Saccharomyces jurei* isolated from ash (*Fraxinus excelsior*). *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 645271. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.645271>
- Gąsior, J., Kawa-Rygielska, J., & Kucharska, A. Z. (2020). Carbohydrates profile, polyphenols content and antioxidative properties of beer worts produced with different dark malts varieties or roasted barley grains. *Molecules*, 25(17), Article 3882. <https://doi.org/10.3390/molecules25173882>
- Gordon, R., Power, A., Chapman, J., Chandra, S., & Cozzolino, D. (2018). A review on the source of lipids and their interactions during beer fermentation that affect beer quality. *Fermentation*, 4(4), Article 89. <https://doi.org/10.3390/fermentation4040089>
- Iorizzo, M., Coppola, F., Letizia, F., Testa, B., & Sorrentino, E. (2021). Role of yeasts in the brewing process: tradition and innovation. *Processes*, 9(5), Article 839. <https://doi.org/10.3390/pr9050839>
- Krogerus, K., Rettberg, N., & Gibson, B. (2022). Increased volatile thiol release during beer fermentation using constructed interspecies yeast hybrids. *European Food Research and Technology*, 249, 55–69. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04132-6>
- Kunz, T., Müller, C., Mato-Gonzales, D., & Methner, F.-J. (2012). The influence of unmalted barley on the oxidative stability of wort and beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 118(1), 32–39. <https://doi.org/10.1002/jib.6>
- Kyrleou, M., Herb, D., O'Reilly, G., Conway, N., Bryan, T., & Kilcawley, K. N. (2021). The impact of terroir on the flavour of single malt whisky new make spirit. *Foods*, 10(2), Article 443. <https://doi.org/10.3390/foods10020443>
- Iattici, F., Catallo, M., & Solieri, L. (2020). Designing new yeasts for craft brewing: when natural biodiversity meets biotechnology. *Beverages*, 6(1), Article 3. <https://doi.org/10.3390/beverages6010003>
- Liguori, L., De Francesco, G., Orilio, P., Perretti, G., & Albanese, D. (2021). Influence of malt composition on the quality of a top fermented beer. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2295–2303. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04740-8>
- Liu, M., Zeng, Z., & Xiong, B. (2005). Preparation of novel solid-phase microextraction fibers by sol-gel technology for headspace solid-phase microextraction-gas chromatographic analysis of aroma compounds in beer. *Journal of Chromatography A*, 1065(2), 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.12.073>
- Maia, C., Cunha, S., Debyser, W., & Cook, D. (2021). Impacts of adjunct incorporation on flavor stability metrics at early stages of beer production. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(1), 54–65. <https://doi.org/10.1080/03610470.2021.1993054>
- Martinez-Gomez, A., Caballero, I., & Blanco, C. A. (2020). Phenols and melanoidins as natural antioxidants in beer. structure, reactivity and antioxidant activity. *Biomolecules*, 10(3), Article 400. <https://doi.org/10.3390/biom10030400>
- Matukas, M., Starkute, V., Zokaityte, E., Zokaityte, G., Klupsaite, D., Mockus, E., Rocha, J. M., Ruibys, R., & Bartkiene, E. (2022). Effect of different yeast strains on biogenic amines, volatile compounds and sensory profile of beer. *Foods*, 11(15), Article 2317. <https://doi.org/10.3390/foods11152317>
- Mayer, H., Ceccaroni, D., Marconi, O., Sileoni, V., Perretti, G., & Fantozzi, P. (2016). Development of an all rice malt beer: A gluten free alternative. *LWT-Food Science and Technology*, 67(2), 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.037>
- Mikyska, A., Matoulkova, D., Slaby, M., Kubizniakova, P., & Hartman, I. (2015). Characterization of the strains isolated from kefir grains and their use for the production of beer-based fermented beverages from nontraditional cereals. *Kvasný průmysl*, 61(10–11), 10–11. <https://doi.org/10.18832/kp2015029>
- Olaniran, A. O., Hiralal, L., Mokoena, M. P., & Pillay, B. (2017). Flavour-active volatile compounds in beer: Production, regulation and control. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(1), 2313–2323. <https://doi.org/10.1002/jib.389>
- Pang, Y., Ali, J., Wang, X., Franje, N. J., Revilla, J. E., & Xu, J. (2016). Relationship of Rice Grain Amylose, Gelatinization Temperature and Pasting Properties for Breeding Better Eating and Cooking Quality of Rice Varieties. *PLoS ONE*, 11(12), Article e0168483. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168483>
- Prado, R., Gastl, M., & Becker, T. (2023). Influence of kilned specialty malt odorant markers on the aroma composition and sensory profile of beer. *LWT*, 173, Article 114195. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114195>
- Rakhshi, E., Cambert, M., Diascorn, Y., Lucas, T., & Rondeau-Mouro, C. (2022). An insight into tapioca and wheat starch gelatinization mechanisms using TD-NMR and complementary techniques. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 60(7), 702–718. <https://doi.org/10.1002/mrc.5258>
- Rittenauer, M., Gladis, S., Gastl, M., & Becker, T. (2021). Gelatinization or pasting? The impact of different temperature levels on the saccharification efficiency of barley malt starch. *Foods*, 10(8), Article 1733. <https://doi.org/10.3390/foods10081733>
- Rossi, S., Turchetti, B., Sileoni, V., Marconi, O., & Perretti, G. (2018). Evaluation of *Saccharomyces cerevisiae* strains isolated from non-brewing environments in beer production. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(4), 381–388. <https://doi.org/10.1002/jib.503>
- Rutnik, K., Ocvirk, M., & Košir, I. J. (2022). Impact of hop freshness on dry hopped beer quality. *Foods*, 11(9), Article 1310. <https://doi.org/10.3390/foods11091310>

- Shopska, V., Denkova-Kostova, R., Dzhivoderova-Zarcheva, M., Teneva, D., Denev, P., & Kostov, G. (2021). Comparative study on phenolic content and antioxidant activity of different malt types. *Antioxidants*, 10(7), Article 1124. <https://doi.org/10.3390/antiox10071124>
- Steyer, D., Tristram, P., Leita, C., Heitz, F., & Laugel, B. (2017). Yeast strains and hop varieties synergy on beer volatile compounds. *BrewingScience*, 70, 131–141. <https://doi.org/10.23763/BrSc17-13Steyer>
- Su, X., Wu, S., Ma, M., Su, H., Guo, F., Bian, Q., & Du, T. (2022). Sensory lexicon and aroma volatiles analysis of brewing malt. *Science of Food*, 6, Article 20. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00135-5>
- Vandecan, S. M. G., Daems, N., Schoupe, N., Saison, D., & Delvaux, F. R. (2011). Formation of flavor, color, and reducing power during the production process of dark specialty malts. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 69(3), 150–157. <https://doi.org/10.1094/ASB-CJ-2011-0626-01>
- Wang, S., Chao, C., & Xiang, F. (2018). New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches. *Scientific Reports*, 8, Article 3011. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21451-5>
- Yorke, J., Cook, D., & Ford, R. (2021). Brewing with unmalted cereal adjuncts: Sensory and analytical impacts on beer quality. *Beverages*, 7(1), Article 4. <https://doi.org/10.3390/beverages7010004>

REFERENCES

- Burak, L. Ch. (2021). Perspektivy proizvodstva piva s funktsional'nymi svoystvami [Prospects for the production of beer with functional properties]. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK — produkty zdorovogo pitaniya [Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex — Healthy Food Products]*, (2), 79–88. <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-2-79-8>
- Erzetti, M., Marconi, O., Bravi, E., Perretti, G., Montanari, L., & Fantozzi, P. J. (2009). HACCP in the malting and brewing production chain: mycotoxin, nitrosamine and biogenic amine risks. *Italian Journal of Food Science*, 21, 211–230.
- Gernet, M. V., & Gribkova, I. N. (2020a). Sovremennye sposoby ispol'zovaniya khmeleproduktov v pivovarenii [Modern ways of using hop products in brewing]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and Processing of Farm Products]*, (4), 34–42. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.328>
- Gernet, M. V., & Gribkova, I. N. (2020b). Vliyanie soedinenii khmeliya i khmeleproduktov na sensornyi profil' gotovogo piva [The influence of hop compounds and hop products on the sensory profile of the finished beer]. *XXI vek: Itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus [21st Century: The Results of the Past and the Problems of the Present Plus]*, (1), 93–99.
- Ivanchenko, O. B., & Danina, M. M. (2018). Ispol'zovanie lekarstvennykh trav v tekhnologii temnykh elei [The use of medicinal herbs in the technology of dark ales]. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda [Bulletin of the International Academy of Cold]*, (1), 11–18. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-1-11-18>
- Kamenskaya, E. P., & Cherkasova, E. S. (2021). Ispol'zovanie metoda nizkotemperaturnogo kontakta drozhzhei s suslom v tekhnologii bezalkogol'nogo piva [The use of the method of low-temperature contact of yeast with wort in the technology of non-alcoholic beer]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, (4), 166–171. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-166-171>
- Kretova, Yu. I., & Kalinina, I. V. (2022). Osobennosti rynka pivovarennoi produktsii v tekushchikh ekonomicheskikh usloviyakh: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Features of the brewing products market in the current economic conditions: state and prospects of development]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Pishchevye i biotekhnologii [Bulletin of the South Ural State University. Food and Biotechnology]*, 10(2), 5–14. <https://doi.org/10.14529/food220201>
- Novikova, I. V., Murav'ev, A. S., Lankina, A. K., & Moskalev, V. A. (2018). Otsenka vliyaniya retsepturnogo sostava na sensornye i fiziko-khimicheskie svoystva piva v stile SAISON [Evaluation of the effect of the prescription composition on the sensory and physico-chemical properties of SAISON-style beer]. *Pivo i napitki [Beer and Drinks]*, (3), 34–38.
- Ponomareva, O. I., Borisova, E. V., & Prokhorchik, I. P. (2019). Vliyanie tekhnologicheskikh kharakteristik razlichnykh vidov syrya na vkus i aromat kislykh elei [The influence of technological characteristics of various types of raw materials on the taste and aroma of sour ales]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Equipment and Technology of Food Production]*, 49(2), 235–244. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-2-235-244>
- Bettenhausen, H. M., Barr, L., Broeckling, C. D., Chaparro, J. M., Holbrook, C., Sedin, D., & Heuberger, A. L. (2018). Influence of malt source on beer chemistry, flavor, and flavor stability. *Food Research International*, 113, 487–504. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.07.024>
- Blšáková, L., Gregor, T., Mešťánek, M., Hřivná, L., & Kumbár, V. (2022). The use of unconventional malts in beer production and their effect on the wort viscosity. *Foods*, 11(1), Article 31. <https://doi.org/10.3390/foods11010031>
- Cadenas, R., Caballero, I., Nimubona, D., & Blanco, C. A. (2021). Brewing with starchy adjuncts: Its influence on the sensory and nutritional properties of beer. *Foods*, 10(8), Article 1726. <https://doi.org/10.3390/foods10081726>
- Carciocchi, R. A., Dimitrov, K., & Galván, D. A. L. (2016). Effect of malting conditions on phenolic content, Maillard reaction products formation, and antioxidant activity

- of quinoa seeds. *Journal of Food Science and Technology*, 53(11), 3978–3985. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2393-7>
- Carvalho, D. O., Gonçalves, L. M., & Guido, L. F. (2016). Overall antioxidant properties of malt and how they are influenced by the individual constituents of barley and the malting process. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(5), 927–943. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12218>
- Castro, L. F., Affonso, A. D., & Lehman, R. M. (2021). Impact of specialty malts on wort and beer characteristics. *Fermentation*, 7(3), Article 137. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030137>
- Charmier, L. M. J., McLoughlin, C., & McCleary, B. V. (2021). Diastatic power and maltose value: a method for the measurement of amylolytic enzymes in malt. *Journal of the Institute of Brewing*, 127(4), 327–344. <https://doi.org/10.1002/jib.665>
- Combe, A., Ang, J., & Bamforth, C. (2013). Positive and negative impacts of specialty malts on beer foam: A comparison of various cereal products for their foaming properties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(9), 2094–2101. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6117>
- Denby, C. M., Li, R. A., & Vu, V. T. (2018). Industrial brewing yeast engineered for the production of primary flavor determinants in hopped beer. *Nature Communications*, 9, Article 965. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03293-x>
- Díaz, A. B., Durán-Guerrero, E., Lasanta, C., & Castro, R. (2022). From the raw materials to the bottled product: influence of the entire production process on the organoleptic profile of industrial beers. *Foods*, 11(20), Article 3215. <https://doi.org/10.3390/foods11203215>
- Ferreira, C. S., Simon, M., & Collin, S. (2022). Why catechin and epicatechin from early hopping impact the color of aged dry-hopped beers while flavan-3-ol oligomers from late and dry hopping increase colloidal instability. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(2), 255–264. <https://doi.org/10.1080/03610470.2022.2062156>
- Haslbeck, K., Bub, S., von Kamp, K., Michel, M., Zarnkow, M., Hutzler, M., & Coelho, M. (2018). The influence of brewing yeast strains on monoterpene alcohols and esters contributing to the citrus flavour of beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(4), 403–415. <https://doi.org/10.1002/jib.523>
- Hauser, D. G., Van Simaey, K. R., Lafontaine, S. R., & Shellhammer, T. H. (2019). A comparison of single-stage and two-stage dry-hopping regimes. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 77(4), 251–260. <https://doi.org/10.1080/03610470.2019.1668230>
- Herb, D., Filichkin, T., Fisk, S., Helgersson, L., Hayes, P., Meints, B., Jennings, R., Monsour, R., Tynan, S., & Vinkemeier, K. (2017). Effects of barley (*Hordeum vulgare* L.) variety and growing environment on beer flavor. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 75(4), 345–353. <https://doi.org/10.1094/ASBCJ-2017-4860-01>
- Holt, S., Miks, M. H., de Carvalho, B. T., Foulquié-Moreno, M. R., & Thevelein, J. M. (2019). The molecular biology of fruity and floral aromas in beer and other alcoholic beverages. *FEMS Microbiology Reviews*, 43(3), 193–222. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuy041>
- Hutzler, M., Michel, M., Kunz, O., Kuusisto, T., Magalhães, F., Krogerus, K., & Gibson, B. (2021). Unique Brewing-Relevant Properties of a Strain of *Saccharomyces jurei* isolated from ash (*Fraxinus excelsior*). *Frontiers in Microbiology*, 12, Article 645271. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.645271>
- Çasior, J., Kawa-Rygielska, J., & Kucharska, A. Z. (2020). Carbohydrates profile, polyphenols content and antioxidative properties of beer worts produced with different dark malts varieties or roasted barley grains. *Molecules*, 25(17), Article 3882. <https://doi.org/10.3390/molecules25173882>
- Gordon, R., Power, A., Chapman, J., Chandra, S., & Cozzolino, D. (2018). A review on the source of lipids and their interactions during beer fermentation that affect beer quality. *Fermentation*, 4(4), Article 89. <https://doi.org/10.3390/fermentation4040089>
- Iorizzo, M., Coppola, F., Letizia, F., Testa, B., & Sorrentino, E. (2021). Role of yeasts in the brewing process: tradition and innovation. *Processes*, 9(5), Article 839. <https://doi.org/10.3390/pr9050839>
- Krogerus, K., Rettberg, N., & Gibson, B. (2022). Increased volatile thiol release during beer fermentation using constructed interspecies yeast hybrids. *European Food Research and Technology*, 249, 55–69. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04132-6>
- Kunz, T., Müller, C., Mato-Gonzales, D., & Methner, F.-J. (2012). The influence of unmalted barley on the oxidative stability of wort and beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 118(1), 32–39. <https://doi.org/10.1002/jib.6>
- Kyrleou, M., Herb, D., O'Reilly, G., Conway, N., Bryan, T., & Kilcawley, K. N. (2021). The impact of terroir on the flavour of single malt whisk(e)y new make spirit. *Foods*, 10(2), Article 443. <https://doi.org/10.3390/foods10020443>
- Iattici, F., Catallo, M., & Solieri, L. (2020). Designing new yeasts for craft brewing: when natural biodiversity meets biotechnology. *Beverages*, 6(1), Article 3. <https://doi.org/10.3390/beverages6010003>
- Liguori, L., De Francesco, G., Orilio, P., Perretti, G., & Albanese, D. (2021). Influence of malt composition on the quality of a top fermented beer. *Journal of Food Science and Technology*, 58(6), 2295–2303. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04740-8>
- Liu, M., Zeng, Z., & Xiong, B. (2005). Preparation of novel solid-phase microextraction fibers by sol-gel technology for headspace solid-phase microextraction-gas chromatographic analysis of aroma compounds in beer. *Journal of Chromatography A*, 1065(2), 287–299. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.12.073>
- Maia, C., Cunha, S., Debyser, W., & Cook, D. (2021). Impacts of adjunct incorporation on flavor stability metrics at early stages of beer production. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81(1), 54–65. <https://doi.org/10.1080/03610470.2021.1993054>
- Martinez-Gomez, A., Caballero, I., & Blanco, C. A. (2020). Phenols and melanoidins as natural antioxidants in beer. structure, reactivity and antioxidant activity. *Bi-*

- omolecules*, 10(3), Article 400. <https://doi.org/10.3390/biom10030400>
- Matukas, M., Starkute, V., Zokaityte, E., Zokaityte, G., Klupsaite, D., Mockus, E., Rocha, J. M., Ruibys, R., & Bartkieni, E. (2022). Effect of different yeast strains on biogenic amines, volatile compounds and sensory profile of beer. *Foods*, 11(15), Article 2317. <https://doi.org/10.3390/foods11152317>
- Mayer H., Ceccaroni, D., Marconi, O., Sileoni, V., Perretti, G., & Fantozzi, P. (2016). Development of an all rice malt beer: A gluten free alternative. *LWT-Food Science and Technology*, 67(2), 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.11.037>
- Mikyska, A., Matoulkova, D., Slaby, M., Kubizniakova, P., & Hartman, I. (2015). Characterization of the strains isolated from kefir grains and their use for the production of beer-based fermented beverages from nontraditional cereals. *Kvasný průmysl [Fermentation Industry]*, 61(10–11), 10–11. <https://doi.org/10.18832/kp2015029>
- Olaniran, A. O., Hiralal, L., Mokoena, M. P., & Pillay, B. (2017). Flavour-active volatile compounds in beer: Production, regulation and control. *Journal of the Institute of Brewing*, 123(1), 2313–2323. <https://doi.org/10.1002/jib.389>
- Pang, Y., Ali, J., Wang, X., Franje, N. J., Revilla, J. E., & Xu, J. (2016). Relationship of Rice Grain Amylose, Gelatinization Temperature and Pasting Properties for Breeding Better Eating and Cooking Quality of Rice Varieties. *PLoS ONE*, 11(12), Article e0168483. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168483>
- Prado, R., Gastl, M., & Becker, T. (2023). Influence of kilned specialty malt odorant markers on the aroma composition and sensory profile of beer. *LWT*, 173, Article 114195. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114195>
- Rakhshi, E., Cambert, M., Diascorn, Y., Lucas, T., & Rondeau-Mouro, C. (2022). An insight into tapioca and wheat starch gelatinization mechanisms using TD-NMR and complementary techniques. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 60(7), 702–718. <https://doi.org/10.1002/mrc.5258>
- Rittenauer, M., Gladis, S., Gastl, M., & Becker, T. (2021). Gelatinization or pasting? The impact of different temperature levels on the saccharification efficiency of barley malt starch. *Foods*, 10(8), Article 1733. <https://doi.org/10.3390/foods10081733>
- Rossi, S., Turchetti, B., Sileoni, V., Marconi, O., & Perretti, G. (2018). Evaluation of *Saccharomyces cerevisiae* strains isolated from non-brewing environments in beer production. *Journal of the Institute of Brewing*, 124(4), 381–388. <https://doi.org/10.1002/jib.503>
- Rutnik, K., Ocvirk, M., & Košir, I. J. (2022). Impact of hop freshness on dry hopped beer quality. *Foods*, 11(9), Article 1310. <https://doi.org/10.3390/foods11091310>
- Shopska, V., Denkova-Kostova, R., Dzhivoderova-Zarcheva, M., Teneva, D., Denev, P., & Kostov, G. (2021). Comparative study on phenolic content and antioxidant activity of different malt types. *Antioxidants*, 10(7), Article 1124. <https://doi.org/10.3390/antiox10071124>
- Steyer, D., Tristram, P., Leitao, C., Heitz, F., & Laugel, B. (2017). Yeast strains and hop varieties synergy on beer volatile compounds. *BrewingScience*, 70, 131–141. <https://doi.org/10.23763/BrSc17-13Steyer>
- Su, X., Wu, S., Ma, M., Su, H., Guo, F., Bian, Q., & Du, T. (2022). Sensory lexicon and aroma volatiles analysis of brewing malt. *Science of Food*, 6, Article 20. <https://doi.org/10.1038/s41538-022-00135-5>
- Vandecan, S. M. G., Daems, N., Schoupe, N., Saison, D., & Delvaux, F. R. (2011). Formation of flavor, color, and reducing power during the production process of dark specialty malts. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 69(3), 150–157. <https://doi.org/10.1094/ASB-CJ-2011-0626-01>
- Wang, S., Chao, C., & Xiang, F. (2018). New insights into gelatinization mechanisms of cereal endosperm starches. *Scientific Reports*, 8, Article 3011. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21451-5>
- Yorke, J., Cook, D., & Ford, R. (2021). Brewing with unmalted cereal adjuncts: Sensory and analytical impacts on beer quality. *Beverages*, 7(1), Article 4. <https://doi.org/10.3390/beverages7010004>