

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>
<https://elibrary.ru/LQEJER>

Обзорная статья
<https://fppt.ru>

Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве



И. М. Жаркова^{1,*}, Ю. Ф. Росляков², Д. С. Иванчиков¹

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий^{ROR}, Воронеж, Россия

² Кубанский государственный технологический университет^{ROR}, Краснодар, Россия

Поступила в редакцию: 23.01.2023

Принята после рецензирования: 13.02.2023

Принята к публикации: 07.03.2023

*И. М. Жаркова: zharir@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8662-4559>

Ю. Ф. Росляков: <https://orcid.org/0000-0003-1431-4804>

Д. С. Иванчиков: <https://orcid.org/0000-0001-9814-6005>

© И. М. Жаркова, Ю. Ф. Росляков, Д. С. Иванчиков, 2023



Аннотация.

Хлебобулочные изделия, изготовленные на заквасках, характеризуются широким спектром вкусо-ароматических характеристик, увеличенным сроком хранения и т. д. Отмечается активизация научных исследований, направленных на изучение микробиома хлебопекарных заквасок. Цель работы – обобщение, систематизация и анализ современных данных об особенностях ведения заквасок спонтанного брожения, способов их получения и роли в организации технологического процесса на современных предприятиях хлебопекарной отрасли.

Объектом исследования являлась российская и зарубежная научная литература открытого доступа – монографии, статьи и патенты на изобретения, связанные с исследованием различных аспектов производства и использования хлебопекарных заквасок спонтанного брожения. Поиск вели по информационным базам PubMed и eLIBRARY.RU в обратной хронологической последовательности (период поиска 2000–2022 гг.). Отбор источников осуществляли с учетом полноты и системности изложения материала, его достоверности и релевантности. Анализ и систематизацию информации проводили голографическим методом и методом апперцепирования.

Провели анализ и систематизацию исследований российских и зарубежных ученых в отношении факторов, влияющих на микробиом хлебопекарных заквасок, в частности спонтанного брожения. В работе была показана взаимосвязь между сырьем, используемым на стадии выведения заквасок спонтанного брожения, и показателями их качества. Актуальность приобретают исследования, связанные с изучением трансформации биоактивных соединений в процессе ферментации закваски. Это обусловлено поиском и расширением набора эффективных инструментов для разработки хлебобулочной продукции, обладающей специфическими питательными свойствами (пониженный гликемический индекс, повышенное количество биологически доступных питательных веществ, пониженное содержание акриламида, сниженная аллергенность глина).

Научный и практический интерес представляют выделение, идентификация и характеристика микроорганизмов, входящих в микробиом заквасок спонтанного брожения, для поиска специфических штаммов, которые позволяют разрабатывать закваски, предназначенные для различных узконаправленных целей.

Ключевые слова. Хлебопечение, хлеб, закваска, дрожжи, микробиом закваски, вкус и аромат хлеба, качество, биологический эффект

Для цитирования: Жаркова И. М., Росляков Ю. Ф., Иванчиков Д. С. Закваски спонтанного (естественного) брожения: особенности технологии и роль в современном хлебопекарном производстве // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 3. С. 525–544. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>

Sourdoughs of Spontaneous (Natural) Fermentation in Modern Bakery Production



Irina M. Zharkova^{1,*}, Yuriy F. Roslyakov², Danil S. Ivanchikov¹

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

² Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Received: 23.01.2023

Revised: 13.02.2023

Accepted: 07.03.2023

*Irina M. Zharkova: zharir@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0001-8662-4559>

Yuriy F. Roslyakov: <https://orcid.org/0000-0003-1431-4804>

Danil S. Ivanchikov: <https://orcid.org/0000-0001-9814-6005>

© I.M. Zharkova, Yu.F. Roslyakov, D.S. Ivanchikov, 2023



Abstract.

Sourdough bakery products have a wide range of tastes and aromas, an extended shelf-life, and other benefits that are important for food producers and consumers. Recent years have seen a growing research interest in the microbiome of bakery sourdoughs. The research objective was to generalize, systematize, and analyze modern data on spontaneous fermentation starters, their production methods, and their role in the technological process at modern bakeries.

The study featured domestic and foreign monographs, research articles, and patents related to various aspects of the production and commercial use of spontaneously fermented baking starters. The search covered publications indexed in PubMed and eLIBRARY.RU in 2000–2022. The sources were selected based on such indicators as completeness, consistency, reliability, and relevance. The obtained data were analyzed and systematized in line with the method of apperception and holography.

The analysis focused on the factors that affect the microbiome of baking starter cultures, in particular, spontaneous fermentation. Another aspect included the effect of the raw materials used at the stage of breeding spontaneous fermentation starter cultures on their quality indicators. The transformation of bioactive compounds in the process of sourdough fermentation proved to be an increasingly relevant research matter. Food producers are looking for more effective tools to develop bakery products with specific nutritional properties, e.g., lower glycemic index, increased content of bioactive nutrients, reduced acrylamide content, low gliadin allergenicity, etc.

The isolation and profiling of microorganisms included in the microbiome of spontaneous fermentation sourdough cultures is of practical interest because new strains might produce starter cultures intended for various target audiences.

Keywords. Bakery, bread, sourdough, yeast, sourdough microbiome, taste and aroma of bread, quality, biological effect

For citation: Zharkova IM, Roslyakov YuF, Ivanchikov DS. Sourdoughs of Spontaneous (Natural) Fermentation in Modern Bakery Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(3):525–544. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-3-2455>

Введение

Характерной особенностью большинства хлебо-булочных изделий является наличие хорошо разрыхленной структуры мякиша (в нормативную и техническую документацию для хлеба, булочных и сдобных изделий включен физико-химический показатель «пористость мякиша»). Эффект разрыхления теста – это насыщение однородной и пластичной массы теста пузырьками газа, который приводит к образованию хорошо развитого губчато-сетчатого клейковинного каркаса. Последующее формирование характерной структуры мякиша достигается за счет использования химического, механического или биологического воздействия на тесто.

Химический способ разрыхления теста часто применяется при производстве мучных кондитерских изделий. Однако среди хлебобулочной продукции можно найти рецептуры, предусматривающие внесение химических разрыхлителей. Например, традиционный ирландский и шотландский содовый хлеб, зерновой и безглютеновый хлеб [1–3].

Для внедрения механического способа разрыхления теста в промышленном масштабе разрабатываются установки, предназначенные для сбивания теста под давлением сжатого воздуха [4]. Полученное таким образом тесто представляет собой пенообразную массу со стабильными физико-химическими характеристиками, а хлеб имеет хорошо разрыхленный и эластичный мякиш [5, 6]. Однако для получения

продукции, обладающей привычными для потребителя вкусом и ароматом, необходимо введение в рецептуру дополнительных ингредиентов. Например, органических кислот, фруктовых соков, молочной сыворотки или полуфабрикатов, содержащих молочнокислые бактерии и их метаболиты [4, 7].

Самым распространенным способом разрыхления теста при производстве хлебобулочных изделий является биологический способ, предусматривающий использование специальных ингредиентов (хлебопекарные дрожжи и пивоваренные дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* штамм Y9194) или полуфабрикатов (закваски и жидкие дрожжи), которые служат источником технологической микрофлоры (дрожжевых клеток и молочнокислых бактерий) и изготавливаются на предприятии [8–11]. Эффект разрыхления теста достигается за счет диоксида углерода, образующегося в результате жизнедеятельности микроорганизмов (дрожжей и гетероферментативных молочнокислых бактерий). Особенностью продукции, изготовленной с использованием биологических разрыхлителей, наряду с характерной текстурой мякиша, структурой пористости и объемом изделий, является наличие специфических и неповторимых оттенков вкуса и запаха [12–16].

В индустриальном хлебопечении используют коммерческие хлебопекарные дрожжи (сушеные, инстантные и прессованные, дрожжевое молоко), представленные различными штаммами вида *S. cerevisiae*, а также жидкие дрожжи и закваски, произведенные с использованием чистых культур микроорганизмов – дрожжей и молочнокислых бактерий [8, 9, 17–20].

Преимущества, которые дает применение заквасок производителям и потребителям, а также основные классификационные признаки заквасок, принятые в Российской Федерации и зарубежом, обобщены и представлены на рисунке 1.

Благодаря наличию в заквасках комбинаций микроорганизмов дрожжевых клеток и молочнокислых бактерий достигается выработка продукции, которая обладает широким спектром вкусо-ароматических веществ, что высоко ценится потребителями [14, 15, 21, 22]. Также важными преимуществами хлебобулочных изделий, изготовленных на заквасках, являются увеличенный срок хранения (за счет повышения кислотности и микробиологической стойкости, замедления процесса черствения); возможность устранения чрезмерной крошковатости мякиша за счет улучшения его эластичности; снижение гликемического индекса; повышение биодоступности содержащихся в них минеральных веществ; снижение содержания глютена [23–31].

Международная классификация заквасок предполагает деление их на типы в зависимости от: – вида инокулята – источника технологической микрофлоры (тип 1, 2 и 3);

– технологических особенностей процесса получения и поддержания заквасок (тип 0, I, II, III). Закваски спонтанного брожения относят к типам 1 и I.

В Российской Федерации хлебопекарные закваски делят по большому количеству признаков. Например, в зависимости от вида муки, используемой при воспроизводстве закваски, существуют пшеничные и ржаные закваски. В последнее время появились закваски из муки нехлебопекарных злаков (ячменя и риса), которые предназначены для выработки безглютенового хлеба [32].

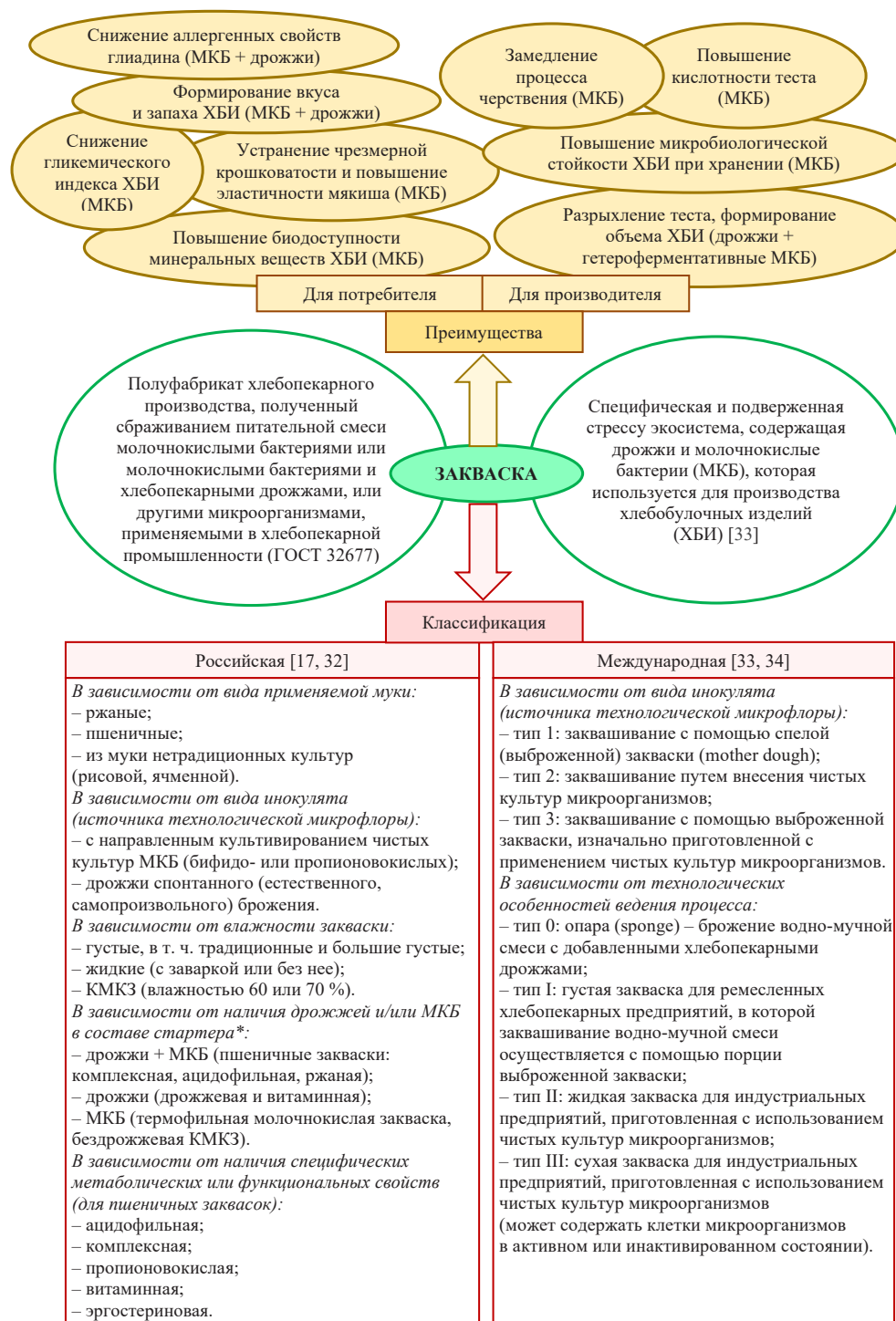
В зависимости от источника технологической микрофлоры все закваски можно разделить на две большие группы. При культивировании заквасок первой группы на начальном этапе (разводочный цикл) используют препараты чистых культур микроорганизмов [17]. Выведение заквасок второй группы, т. н. заквасок спонтанного (естественного, самопроизвольного) брожения, предусматривает использование «полезной» микрофлоры, которая естественным образом содержится в муке и в дополнительном сырье [9, 11].

Преимуществом заквасок первой группы – на чистых культурах микроорганизмов – является возможность в течение длительного времени производить большие объемы хлебобулочных изделий со стабильными показателями качества, в том числе органолептическими. Однако для ведения таких заквасок в промышленных масштабах требуется высококвалифицированный персонал, умеющий работать с микроорганизмами, способный оценить свойства заквасок и произвести необходимую корректировку технологических параметров для их стабилизации. Также необходимо наличие производственных площадей для размещения заквасочных отделений с регулируемым микроклиматом. Эти условия могут выполнить лишь крупные хлебопекарные предприятия.

При длительном ведении в производственных условиях заквасок, выведенных в разводочном цикле с использованием чистых культур микроорганизмов, происходит изменение в них видового состава микроорганизмов с преобладанием «диких» форм, т. е. требуется их периодическое обновление [32].

В Российской Федерации фундаментальные исследования жизнедеятельности микроорганизмов хлебных заквасок, разработку и совершенствование биотехнологий и ассортимента заквасок специального назначения проводят в Санкт-Петербургском филиале ФГАНУ НИИХП [32].

В последние годы расширилась сеть пекарен, специализирующихся на выпуске т. н. ремесленной продукции (по прогнозам к 2025 г. на долю пекарен, пекарен-кафе и хлебных бутиков будет приходиться 27 % общего выпуска хлебобулочных изделий в Российской Федерации) [36]. Структура таких пекарен не предусматривает наличия микробиологи-



* Стартер – это препарат чистых культур заквасочных микроорганизмов, применяемый на этапе разводного цикла заквасок.

Рисунок 1. Классификация хлебопекарных заквасок

Figure 1. Classification of bakery sourdoughs

ческой лаборатории, и их работа осуществляется в одну смену, что делает невозможным использование классических технологий ведения заквасок. Для них выпускают закваски в концентрированном жидком или сыпучем видах. Также разработан

широкий ассортимент подкислителей для изделий из смеси ржаной и пшеничной муки [37, 38].

Одним из трендов развития ремесленного (artisan bakery) или рустикального (rustic bakery) хлебопечения является использование заквасок спон-

танного брожения. В числе преимуществ таких заквасок можно назвать относительно высокую устойчивость показателей их качества при меньшей требовательности к четкому соблюдению технологических параметров и легко осуществимое консервирование с последующей активизацией бродильной и кислотообразующей микрофлоры [39]. Кроме того, при выведении закваски спонтанного брожения исключаются затраты на приобретение дорогостоящих препаратов чистых культур микроорганизмов. При ведении заквасок спонтанного брожения значение для получения качественного продукта имеет качество исходного сырья.

К дополнительным пунктам «за» использование заквасок спонтанного брожения можно отнести мнение О. В. Афанасьевой и др. о том, что использование чистых культур микроорганизмов при промышленном производстве классических заквасок важно лишь на начальном этапе их выведения, т. к. позволяет исключить стадию «селекции» нужной микрофлоры, содержащейся в муке при создании условий, которые препятствуют развитию нежелательной микрофлоры [40]. При длительном воспроизводстве классических заквасок в производственном цикле спонтанная микрофлора, вносимая с мукой, будет влиять на качество закваски, в том числе на спектр вырабатываемых в ней вкусо-ароматических веществ: через 6–12 месяцев необходимо будет снова и снова повторять выведение закваски с разводочного цикла с использованием дорогостоящих препаратов чистых культур микроорганизмов. Закваски спонтанного брожения могут сохранять исходные показатели качества на протяжении многих лет [41].

Цель данного обзора – обобщение и анализ современных данных об особенностях ведения заквасок спонтанного брожения, способов их получения и роли в организации технологического процесса на современных предприятиях хлебопекарной отрасли.

Задачи исследования:

1. Систематизация информации о сырье, используемом на стадии выведения заквасок спонтанного брожения и поддержания их в производственном цикле;
2. Анализ факторов, влияющих на качественный состав микробиома заквасок, его стабильность и органолептические показатели хлеба;
3. Выявление перспективных направлений исследований по использованию хлебопекарных заквасок спонтанного брожения в технологии хлебобулочных изделий с прогнозируемыми биологическими эффектами.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования: находящиеся в открытом доступе российские и зарубежные монографии, научные статьи и патенты на изобретения,

связанные с исследованием различных аспектов производства и использования хлебопекарных заквасок спонтанного брожения. Библиографический поиск осуществляли по следующим информационным базам: PubMed (ключевые слова: spontaneous sourdough for bread, sourdough for bread, types of sourdough, microflora of sourdough) и eLIBRARY.RU (ключевые слова: спонтанные закваски для хлеба и хлебные закваски) в обратной хронологической последовательности. Период поиска – с 2000 по 2022 гг.

Отбор источников информации осуществляли с учетом полноты и системности изложения материала, его достоверности и релевантности. Для анализа и систематизации найденной информации использовали метод апперцепирования и голографический метод.

Результаты и их обсуждение

Растущий интерес потребителей к ремесленным продуктам, в частности к хлебу, а также стремление индустриальных производителей к освоению выпуска продукции, обладающей эксклюзивными вкусовыми и ароматическими профилями, с использованием различных видов зерна и семян приводят к возрождению интереса к использованию нетрадиционной микробиоты, в том числе заквасок спонтанного брожения [9].

Хлебопекарные закваски спонтанного брожения представляют собой водно-мучные смеси (иногда с добавлением пищевой соли), подвергнутые ферментации с помощью микроорганизмов, присутствующих в исходном сырье (эндогенные или автохтонные микроорганизмы). История использования спонтанных заквасок в хлебопечении насчитывает по разным источникам от 3,5 до 6 тысячелетий [9, 11]. Однако потенциальные возможности их широкомасштабного применения в условиях ремесленных пекарен или индустриальных предприятий исследованы и определены не в полной мере.

Формирование микробиома заквасок и их технологических свойств происходит в результате совместного влияния многочисленных факторов, обусловленных как используемым сырьем, так и соблюдением определенных технологических параметров и режимов (рис. 2). При определенных условиях микробиота спонтанных заквасок может оставаться стабильной на уровне штаммов микроорганизмов в течение нескольких десятилетий ее воспроизводства в производственном цикле [41, 42]. Задокumentированный возраст некоторых заквасок составляет более 100 лет, что составляет более 100 000 циклов возобновления [34, 43].

Остановимся более подробно на отдельных аспектах производства и применения хлебопекарных заквасок спонтанного брожения.

Микрофлора спонтанных заквасок (состав и стабильность во времени). Микробиом заквасок спонтанного брожения образуют представители



Рисунок 2. Факторы, влияющие на микробиом заквасок спонтанного брожения

Figure 2. Factors affecting the microbiome of sourdoughs of spontaneous fermentation

царств (доменов) *Bacteria* и *Fungi*. В таблице 1 приведен перечень некоторых микроорганизмов, имеющих значение для технологии хлебопекарных заквасок спонтанного брожения [44].

В таблице 2 приведена информация об изменении названий важных для технологии хлебопекарных заквасок спонтанного брожения микроорганизмов [44, 45].

Пшеничные и ржаные закваски имеют сходную микробиоту, состав и активность которой зависят от условий осуществления процессов их выведения и воспроизводства [42]. Численность бактериальной микрофлоры в заквасках составляет 10^8 – 10^9 КОЕ/г и состоит из факультативных и облигатных гетероферментативных видов (наиболее часто идентифицируются бактерии семейства *Lactobacillaceae*). Доминирующими видами являются *Lactiplantibacillus plantarum* и *Levilactobacillus brevis*, часто встречается *Limosilactobacillus fermentum*, в меньшем количестве *Lactobacillus casei* и *Lentilactobacillus buchneri*. Термофильный вид *Lactobacillus leichmannii* найден в единичных случаях, а *Lactobacillus delbrueckii* не обнаружен [46]. Разнообразие бактериальной микрофлоры выше в сравнении с дрожевой (численность порядка 10^6 – 10^7 КОЕ/г), представленной семейством *Saccharomycetaceae* [9, 34, 41, 47, 48]. Наиболее распространенным видом дрожжей в заквасках является *Saccharomyces cerevisiae* – обнаружены в 68 % заквасок, *Kazachstania*

humilis – 20 %, *Wickerhamomyces anomalus*, *Torulaspora delbrueckii* и *Pichia kudriavzevii* – 6 %, *Candida glabrata* – 4 % [49].

S. cerevisiae – обычные хлебопекарные дрожжи, ассимилирующие мальтозу и относительно устойчивые к кислотам в среде [9].

Дрожжи *K. humilis* относительно термоустойчивы (до 36 °C), растут в диапазоне pH от 3,5 до 7,0. Благодаря своему отрицательному отношению к мальтозе формируют устойчивые трофические отношения с мальтозо-положительными специфическими для закваски молочнокислыми бактериями, такими как *Fructilactobacillus sanfranciscensis* [34]. *F. sanfranciscensis*, благодаря окислительно-восстановительному гомеостазу (активности глутатионредуктазы и НАДН-оксидазы), выдерживает окислительный стресс, возникающий в результате окисления тиолов дрожжевыми клетками *K. humilis*.

Дрожжи в закваске сбраживают сахара муки (мальтозу, сахарозу, глюкозу и фруктозу) по пути Эмбдена-Мейергофа-Парнаса в пируват, а затем превращают пируват в этанол и диоксид углерода (спиртовое брожение). Образование глицерина и янтарной кислоты способствует балансировке окислительно-восстановительного потенциала закваски. Образующийся диоксид углерода важен для разрыхления теста при его брожении и получения хлеба с хорошо разрыхленным мякишем. Глицерин выступает в роли осмопротектора и улучшает удержание

Таблица 1. Современная систематика некоторых прокариот, имеющих значение в технологии хлебопекарных заквасок спонтанного брожения

Table 1. Modern taxonomy of prokaryotes in spontaneous fermentation baking sourdoughs

Класс	Порядок	Семейство	Род
Домен (Kingdom) Bacteria			
<i>Flavobacteriia</i>	<i>Flavobacteriales</i>	<i>Weeksellaceae</i>	<i>Chryseobacterium</i>
Тип (fillum) Bacteroidota			
<i>Alphaproteobacteria</i>	<i>Sphingomonadales</i>	<i>Sphingomonadaceae</i>	<i>Sphingomonas</i>
<i>Betaproteobacteria</i>	<i>Burkholderiales</i>	<i>Comamonadaceae</i>	<i>Comamonas</i>
<i>Gammaaproteobacteria</i>	<i>Pseudomonadales</i>	<i>Pseudomonadaceae</i>	<i>Pseudomonas</i>
	<i>Enterobacterales</i>	<i>Enterobacteriaceae</i>	<i>Enterobacter</i>
			<i>Escherichia</i>
		<i>Erwiniaceae</i>	<i>Erwinia</i>
		<i>Morganellaceae</i>	<i>Proteus</i>
		<i>Yersiniaceae</i>	<i>Serratia</i>
			<i>Yersinia</i>
	<i>Moraxellales</i>	<i>Moraxellaceae</i>	<i>Acinetobacter</i>
Тип (fillum) Firmicutes			
<i>Bacilli</i>	<i>Bacillales</i>	<i>Bacillaceae</i>	<i>Bacillus</i>
		<i>Listeriaceae</i>	<i>Listeria</i>
		<i>Sporolactobacillaceae</i>	<i>Sporolactobacillus</i>
		<i>Staphylococcaceae</i>	<i>Staphylococcus</i>
	<i>Lactobacillales</i>	<i>Enterococcaceae</i>	<i>Enterococcus</i>
		<i>Lactobacillaceae</i>	<i>Companilactobacillus</i>
			<i>Fructilactobacillus</i>
			<i>Lacticaseibacillus</i>
			<i>Lactiplantibacillus</i>
			<i>Lactobacillus</i>
			<i>Lapidilactobacillus</i>
			<i>Lentilactobacillus</i>
			<i>Leuconostoc</i>
			<i>Levilactobacillus</i>
			<i>Limosilactobacillus</i>
			<i>Pediococcus</i>
			<i>Weissella</i>
		<i>Streptococcaceae</i>	<i>Lactococcus</i>
			<i>Streptococcus</i>
	<i>Clostridia</i>	<i>Clostridiaceae</i>	<i>Clostridium</i>
Домен (Kingdom) Fungi			
Филум <i>Ascomycota</i> , клад <i>Saccharomyceta</i> , подтип <i>Saccharomycotina</i> (true yeasts), класс <i>Saccharomycetes</i> , порядок <i>Saccharomycetales</i>			
Семейство	Род	Вид	
<i>Saccharomycetaceae</i>	<i>Kazachstania</i>	<i>Kazachstania unispota</i>	
	<i>Saccharomyces</i>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> (baker's yeast) <i>Saccharomyces bayanus</i>	
	<i>Nakaseomyces</i>	<i>Candida glabrata</i>	
<i>Pichiaceae</i>	<i>Pichia</i>	<i>Pichia kudriavzevii</i>	
<i>Phaffomycetaceae</i>	<i>Wickerhamomyces</i>	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>	

диоксида углерода. Янтарная кислота вызывает снижение pH и способствует образованию глютенной сети и формированию текстуры и реологических свойств теста [33].

Молочнокислые бактерии представляют собой грамположительные, каталазоотрицательные,

не образующие спор, анаэробные (аэротолерантные) бактерии, принадлежащие к типу *Firmicutes*. Они ответственны за подкисление водно-мучной смеси и закваски за счет образования молочной и/или уксусной кислот, а также за формирование аромата (в основном кислого) [34]. В заквасках

Таблица 2. Изменения в систематике и названиях некоторых микроорганизмов

Table 2. Changes in the taxonomy of some microorganisms

Устаревшее название	Современное название
<i>Lactobacillus sanfranciscensis</i>	<i>Fructilactobacillus sanfranciscensis</i>
<i>Candida humilis</i>	<i>Kazachstania humilis</i>
<i>Saccharomyces unispora</i>	<i>Kazachstania unispora</i>
<i>Lactobacillus brevis</i>	<i>Levilactobacillus brevis</i>
<i>Lactobacillus buchneri</i>	<i>Lentilactobacillus buchneri</i>
<i>Lactobacillus fermentum</i>	<i>Limosilactobacillus fermentum</i>
<i>Lactobacillus pontis</i>	<i>Limosilactobacillus pontis</i>
<i>Lactobacillus reuteri</i>	<i>Limosilactobacillus reuteri</i>
<i>Lactobacillus paralimentarius</i>	<i>Companilactobacillus paralimentarius</i>
<i>Lactobacillus plantarum</i>	<i>Lactiplantibacillus plantarum</i>
<i>Pichia anomala</i>	<i>Wickerhamomyces anomalus</i>
<i>Saccharomyces rosei</i>	<i>Torulaspora delbrueckii</i>

спонтанного брожения могут встречаться уксуснокислые бактерии, но они не относятся к основной микробиоте закваски [50].

S. van Kerrebroeck с соавторами провели метаанализ литературных данных о 583 заквасках типов I и II [49]. Установлено, что наиболее распространенным видом молочнокислых бактерий является *F. sanfranciscensis* – выявлена в 47 % заквасок, *L. brevis* – в 17 %, *L. fermentum* – в 12 %. Кроме того, встречаются гомоферментативные виды молочнокислых бактерий, такие как *L. plantarum* (43 %), *Pediococcus pentosaceus* (14 %) и *Companilactobacillus paralimentarius* (13 %) [49]. Гетероферментативные лейконостоки и вайселлы обычно присутствуют в закваске с высоким pH (> 4,0) при низкой температуре брожения (< 30 °C) [43].

Бактерии *C. paralimentarius* не способны ассимилировать мальтозу, но усваивают фруктозу, часто встречаются вместе с *F. sanfranciscensis* [43].

Многие исследователи изучают разнообразие молочнокислых бактерий закваски, а именно выясняют взаимодействия сообществ молочнокислых бактерий и динамические механизмы в процессе ферментации с целью получения желаемого микробного сообщества закваски [51].

Установлено, что молочнокислые бактерии вида *Pediococcus acidilactici* способны продуцировать бактериоцины, подавляющие размножение спор *Bacillus subtilis* и *Penicillium commune* [46]. По данным D. Jonkuvienė и др., *Limosilactobacillus reuteri* выделяют в среду бактериоцины и жирные кислоты, обладающие высокой антимикробной активностью и могут повысить безопасность и микробиологическую устойчивость хлеба при хранении [52].

Состав закваски спонтанного брожения зависит от температуры, при которой осуществляется ведение технологического процесса: 20–22 °C оптимальны для жизнедеятельности дрожжей, а увеличение температуры до 35–40 °C способствует развитию термофильных молочнокислых бактерий и повышению кислотности закваски, что служит антагонистическим фактором по отношению к спорным бактериям «картофельной» болезни хлеба [53].

Закваски спонтанного брожения содержат устойчивую доминирующую микробиоту. Однако в отношении стабильности экосистемы закваски единого мнения в научном мире нет. Несколько факторов могут препятствовать сохранению ассоциаций видов и штаммов, типичных для данной закваски: метаболическая адаптивность к стрессовым условиям закваски, пищевые и антагонистические взаимодействия между микроорганизмами, внутренняя устойчивость микроорганизмов и существование стабильной домашней микробиоты. Необходимо провести дальнейшие исследования, чтобы выявить скрытые механизмы, лежащие в основе микробной структуры и стабильности закваски. Понимание таких механизмов было бы полезно для оценки наиболее подходящих условий, которые позволяют сохранить закваску в качестве стабильной микробной экосистемы, сохраняя в течение долгого времени характерные свойства выпекаемого хлеба [54].

Сырье, используемое на стадиях выведения заквасок спонтанного брожения и их поддержания в производственном цикле. Традиционно закваски спонтанного брожения готовят из пшеничной и ржаной муки разных сортов или их смесей. Выведение таких заквасок осуществляется путем приготовления водно-мучных смесей и их выдержки (ферментация и брожение) при определенной температуре при повторном циклическом освежении продукта брожения новой порцией питательной (водно-мучной) смеси (рис. 3).

После стабилизации микробиома в продукте брожения (через 10–20 циклов его освежения) получают закваску (в англоязычной литературе принят термин «материнское тесто» (mother dough), обозначающий также часть спелой закваски, которая идет на возобновление в производственном цикле). Затем начинается производственный цикл ведения закваски, предусматривающий отбор части выброженной закваски («материнского теста») и смешивание ее с порцией питательной (водно-мучной) смеси с последующим брожением при определенных параметрах.

Поскольку источником микрофлоры при выведении заквасок спонтанного брожения (тип 1, I) служит только используемое сырье, то усилия исследователей в разных регионах мира сосредоточены на выявлении взаимосвязи между его характеристиками

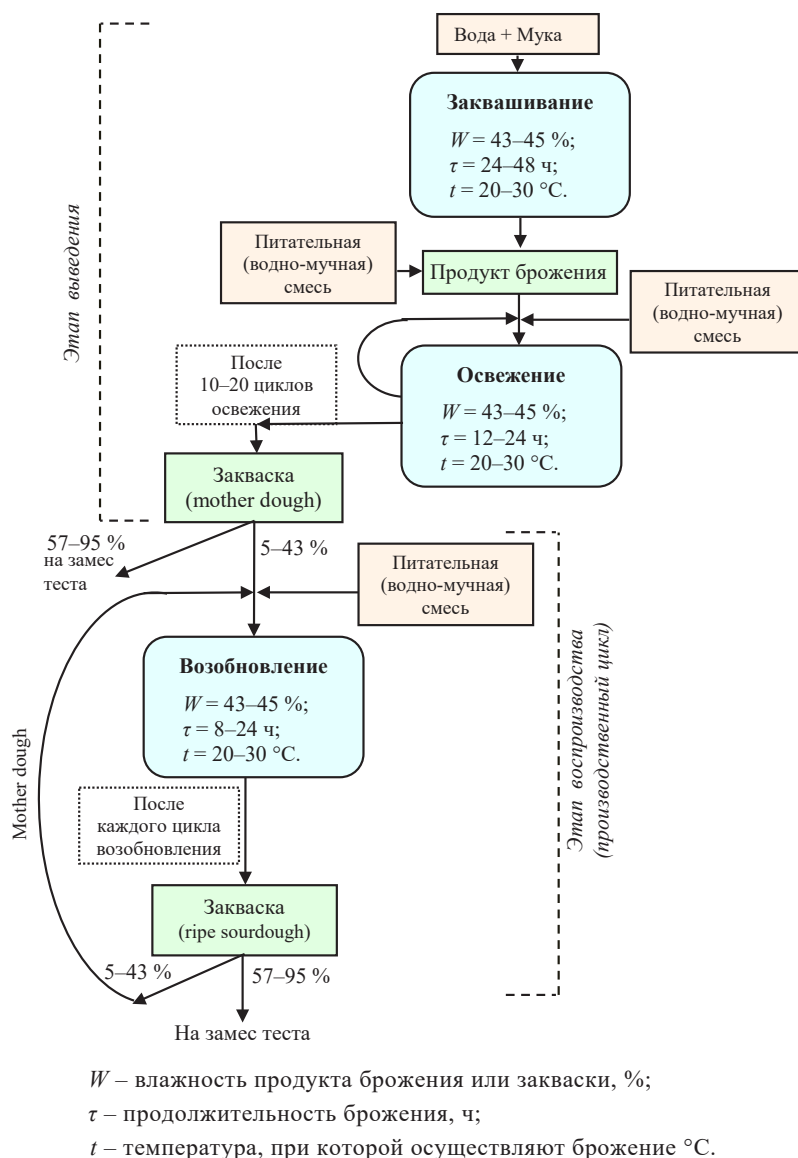


Рисунок 3. Технологический цикл выведения и воспроизведения заквасок спонтанного брожения (тип 1, I)

Figure 3. Technological cycle of breeding and reproduction of spontaneous fermentation sourdoughs (type 1, I)

(видовые и сортовые особенности, географическая принадлежность, разнообразие автохтонных микроорганизмов) и качественным составом микробиома получаемых заквасок.

От вида, сорта и качества муки (микробиологическая обсемененность, активность эндогенных ферментов, химический состав, крупность помола и степень разрушенности крахмальных гранул) зависит исходный состав микрофлоры, наличие и доступность микроорганизмам необходимых для их развития питательных веществ, разнообразие веществ-предшественников вкуса и аромата закваски и хлеба. Наличие и активность эндогенных ферментов влияют на скорость восполнения количества усвояемых углеводов, благодаря гидро-

лизу полисахаридов (крахмала), и на образование вкусо-ароматических компонентов.

Изначально мука содержит большое количество микроорганизмов, попадающих в нее при помоле зерна с его поверхности и с рабочих поверхностей оборудования. Общая численность микроорганизмов в муке составляет 10^4-10^7 КОЕ/г, из которых до 10^3 КОЕ/г приходится на дрожжи (*Candida*, *Pichia*, *Rhodotorula*, *Saccharomyces* и *Torulaspora*), до 10^4 КОЕ/г – на мицелиальные грибы («полевые» грибы: *Alternaria*, *Cladosporium* и *Fusarium*, грибы «хранения»: *Aspergillus* и *Penicillium*), до 10^7 КОЕ/г – на бактерии, принадлежащие к типу (филуму) *Firmicutes* (роды *Bacillus*, *Staphylococcus*, *Enterococcus*, *Lactococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*,

Streptococcus и/или *Weissella*), до 10^3 КОЕ/г – на бактерии, принадлежащие к типу *Proteobacteria* (семейства *Enterobacteriaceae* и *Pseudomonadaceae*) [33].

D. Ercolini с соавторами исследовали динамику микробной экологии закваски спонтанного брожения из муки ржаной (*Secale cereale*) и пшеничной (*Triticum durum* или *Triticum aestivum*) [47]. В микрофлоре муки дрожжи (*S. cerevisiae*, *K. humilis*, *W. anomalus* и *Saccharomyces bayanus*) преобладали над молочнокислыми бактериями, среди которых выявлены метаболически активные представители родов *Acinetobacter*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Comamonas*, *Enterobacter*, *Erwinia* и *Sphingomonas*, относящиеся к типу *Proteobacteria*, а также представители рода *Chryseobacterium* (тип *Bacteroidota*). Численность бактерий, относящихся к типу *Firmicutes*, варьировалась от 5 % от общей численности микроорганизмов в пшеничной муке *T. durum* до 30 % в пшеничной муке *T. aestivum*. Бактерии типа *Firmicutes* в муке ржаной и пшеничной *T. aestivum* занимали второе по численности место после бактерий типа *Proteobacteria*, а в пшеничной муке *T. durum* – третье место после бактерий типов *Proteobacteria* и *Bacteroidota*. В муке из твердых сортов пшеницы (*T. durum*) среди бактерий типа *Firmicutes* преобладал род *Staphylococcus*, в ржаной – род *Weissella*, а в муке из мягких сортов пшеницы (*T. aestivum*) – комбинация родов *Staphylococcus*, *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Weissella* и *Lactococcus*.

Ежедневно каждую закваску подвергали брожению при 25 °С в течение 5 ч (исключением была первая ферментация, которая длилась 8 ч). Между каждым ежедневным брожением закваски хранили при температуре 10 °С около 16 ч. Размножение закваски осуществлялось в соответствии с процедурой освежения, при которой закваска предыдущего дня использовалась в качестве инокулята для ферментации новой порции водно-мучной смеси. Закваски размножали ежедневно в течение 11 дней, пробы отбирали через 0 (тесто), 1, 2, 5 и 10 (закваски) дней размножения.

D. Ercolini и др. показали, что уже после первого периода брожения водно-мучной смеси из пшеничной муки *T. durum* в течение 8 ч при 25 °С экосистема микробиома изменилась, около 85 % общей численности бактерий приходилось на тип *Firmicutes* [47].

Соотношение между молочнокислыми бактериями и дрожжами стабилизировалось на уровне 100:1 через 5 дней размножения для ржаной и пшеничной закваски *T. aestivum* и через 6 дней для пшеничной закваски *T. durum*. *Enterobacteriaceae* были идентифицированы во всех образцах сразу после замеса перед первым брожением. Их количество увеличилось через 1 или 2 дня, но постепенно исчезло к 10 освежению.

Микробное разнообразие в продукте брожения сокращалось через 5 дней размножения и практически

стабилизировалось через 10 дней. Среди бактерий в закваске из ржаной муки доминировал род *Weissella* (55,6 % от общей численности бактерий), 32,5 % составляли бактерии рода *Lactobacillus*, 6,3 % – рода *Pediococcus*. В закваске из пшеничной муки твердых сортов (*T. durum*) доминировали бактерии рода *Lactobacillus* (56,4 %), за ними следовали *Leuconostoc* (18,7 %), *Lactococcus* (11,1 %) и *Weissella* (8,8 %). Аналогичная динамика микробного сообщества была отмечена в закваске из пшеничной муки мягких сортов (*T. aestivum*). Исключением было то, что на начальном этапе выведения закваски в ней уже присутствовали молочнокислые бактерии [47]. Среди дрожжей во всех образцах закваски через 10 суток выведения присутствовали *S. cerevisiae* и *S. bayanus*, а в заквасках из ржаной муки и пшеничной *T. aestivum* присутствовали *K. humilis* и *W. anomalus*.

Греческими исследователями М. К. Syrokou и др. изучена микрэкосистема 13 образцов пшеничных заквасок спонтанного брожения из разных регионов Греции: кислотность заквасок варьировалась в пределах 3,64–5,05 единиц pH, соотношение между количеством дрожжевых клеток и молочнокислых бактерий находилось в интервале 1:23–1:10 000, общая численность дрожжей и молочнокислых бактерий колебалась в пределах 4,60–6,32 и 6,28–9,20 log КОЕ/г соответственно [55]. Отмеченные различия в физико-химических параметрах заквасок, а именно значениях pH и кислотности, авторы объясняют разницей в микробной популяции и преобладающими видами микрофлоры. Среди молочнокислых бактерий в трех из исследованных пшеничных заквасках доминировали виды *L. plantarum*, в четырех – *L. brevis*, а в двух отмечено совместное доминирование этих видов бактерий. Кроме того, в двух заквасках доминировали *C. paralimentarius*, а в одной – *F. sanfranciscensis* и *Latilactobacillus sakei*. *Lactococcus lactis*, *Latilactobacillus curvatus*, *Leuconostoc citreum*, *Leuconostoc mesenteroides* и *Lactobacillus zymae* были извлечены из некоторых образцов. Среди дрожжей в 11 заквасках преобладали *S. cerevisiae*, а в одной – *Pichia membranifaciens* и *Pichia fermentans*. В одном из проанализированных образцов были обнаружены *W. anomalus* и *K. humilis* [55].

J. Boreczek с соавторами исследовали динамику микрофлоры при выведении заквасок спонтанного брожения с использованием цельнозерновой муки из пшеницы, спельты и ржи [41]. Стабилизация микробиома происходила через 72 ч выведения закваски при 30 °С с освежением новыми порциями питательной смеси через каждые 12 ч. Состав микрофлоры закваски из пшеничной цельнозерновой муки и спельты схож, тогда как у закваски из ржаной цельнозерновой муки отличается. Для видового разнообразия микроорганизмов в ржаной закваске характерна наименьшая гетерогенность. Независимо

от вида муки, численность молочнокислых бактерий в закваске составляла 10^9 КОЕ/г, что было на три порядка больше количества дрожжей (10^6 КОЕ/г). Доминирующим типом бактерий во всех образцах закваски был *Firmicutes*, представленный порядком *Lactobacillales* с преобладанием семейства *Lactobacillaceae*.

По данным М. Е. Бессмельцевой и др., закваски спонтанного брожения из ржаной муки могут содержать различные комбинации дрожжей *C. glabrata*, *Kazachstania unispora*, *P. kudriavzevii* и *S. cerevisiae* [56]. В исследовании S. Weckx с соавторами установлено, что после стабилизации микробной экосистемы ржаных заквасок доминирующими видами лактобацилл в них являются *L. plantarum* и *L. fermentum* [57]. Стабилизацию микробиома заквасок авторы связывают с наличием определенных веществ (например, орнитина и маннита), повышающих конкурентоспособность бактерий на начальном этапе выведения ржаных заквасок.

В. К. Хлесткин и др. исследовали зависимость таксономической структуры микробиома российских ржаных заквасок спонтанного брожения (густой и жидкой без заварки) [35]. В течение 10 суток от начала выведения в обеих заквасках произошла кардинальная смена бактерий семейства *Lactobacillaceae*: если через 24 ч в продукте брожения доминировали представители рода *Weissella*, то на 10-е сутки в закваске обнаруживались только представители рода *Lactobacillus*, т. е. бактерии родов *Leuconostoc*, *Weissella* и *Pediococcus* к этому моменту полностью вытеснялись. Авторы отметили различия в видовом составе молочнокислых бактерий в зависимости от влажности закваски. В густой ржаной закваске через месяц ее ведения, наряду с доминирующим видом *F. sanfranciscensis*, появились бактерии *Companilactobacillus* sp. В жидкой ржаной закваске без заварки доминировали молочнокислые бактерии *Limosilactobacillus pontis*.

А. Fujimoto и др. в своем исследовании на примере ржаной и пшеничной муки, смолотой из зерна, выращенного в Японии и Франции, показали, что на качество закваски (количественный и качественный состав микрофлоры, его динамика в процессе выведения закваски в течение 6 суток, наличие вкусо-ароматических веществ) влияет не только вид используемой муки, но и ее географическое происхождение [58]. В работе Е. А. Landis и др. проанализировано 500 заквасок с четырех континентов. Авторы не обнаружили достоверных различий, обусловленных именно географической принадлежностью региона выращивания зерна, из которого получали муку [59].

Независимо от первоначальных характеристик муки, формирование специфического микробиома заквасок спонтанного брожения и его стабилизация происходят в три этапа (рис. 4) [33, 34, 57].

На активность развития микроорганизмов в закваске влияет наличие доступных сахаров, основное количество которых образуется из крахмала под воздействием амилаз муки. Следует учитывать, что в пшенице и ржи присутствуют α - и β -амилаза, тогда как в растениях, осуществляющих фотосинтез С4-путем (например, кукуруза, сорго, амарант), присутствует только α -амилаза.

Расщепление белков питательной смеси в процессе приготовления закваски зависит от комбинированного воздействия ферментов муки и микроорганизмов.

Поскольку ряд молочнокислых бактерий более чувствителен к изменению pH закваски, а не к концентрации в ней органических кислот, то важным фактором при выборе сырья для выведения заквасок спонтанного брожения является его буферная емкость (the buffering capacity), зависящая от количества отрубистых частиц [42].

Благодаря высокому уровню мальтозы, сахарозы и аминокислот в муке из зерна твердой пшеницы

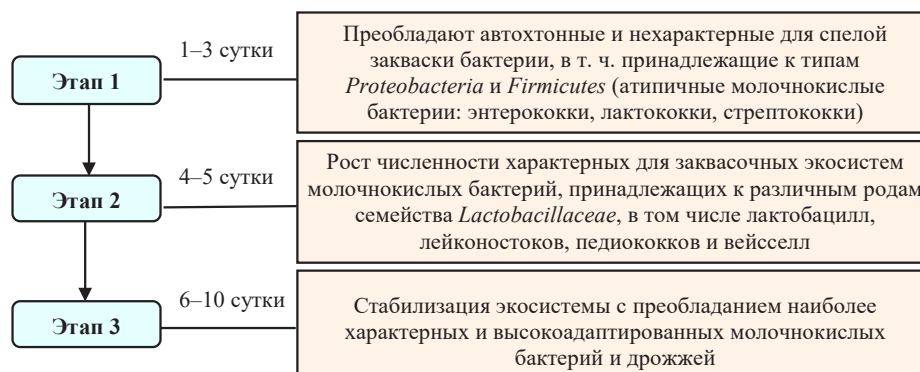


Рисунок 4. Этапы формирования микробиома заквасок спонтанного брожения

Figure 4. Stages of microbiome formation in sourdoughs of spontaneous fermentation

Южной Италии выведенная из нее закваска спонтанного брожения содержит облигатные гетероферментативные молочнокислые бактерии [42].

Известны закваски спонтанного брожения, предназначенные для выработки национальных хлебобулочных изделий. Например, горохово-бадьяная закваска для узбекских лепешек с соотношением бактериальных и дрожжевых клеток 181:1. Е. Н. Молчанова с соавторами установили возможность и целесообразность использования побочных продуктов крупяного производства (мучки ячменной, пшеничной, гороховой, овсяной и кукурузной) в качестве компонента питательной смеси при воспроизводстве горохово-бадьяной закваски [60].

Известны разработки по выведению заквасок спонтанного брожения с помощью муки из псевдозерновых (амарант и гречиха) и бобовых (фасоль, нут, чечевица и люпин) культур, муки из желудей, каштана, чиа, семян льна, конопли, киноа или подсолнечника, полбы, ячменя и кукурузы [29, 31, 34, 41, 61–66]. Необходимо учитывать наличие в сырье специфических компонентов, способных влиять на жизнеспособность микроорганизмов. Например, β -глюканы в ячменной и овсяной муке, фенольные соединения в сорго и просяной муке, дубильные вещества в гречневой муке.

Доминирующая микрофлора в заквасках из сорго, проса, кукурузы, риса или тефа, выведенных в Африке и Южной Азии, лишь частично схожа с микрофлорой ржаных и пшеничных заквасок [42].

Отдельную категорию можно отнести закваски спонтанного брожения для производства безглютенового хлеба. В работах [67–71] показано, что в заквасках из риса, кукурузы, гречихи, тефа и амаранта наиболее часто обнаруживаются молочнокислые бактерии видов *L. fermentum*, *L. plantarum* и *C. paralimentarius*. А. V. Moroni и др. в своем исследовании отметили, что в безглютеновых заквасках среди доминирующей микрофлоры присутствуют нехарактерные для традиционных заквасок виды *Lactobacillus gallinarum*, *Latilactobacillus graminis* и *P. pentosaceus* [72].

Р. Carbó с соавторами предложили рецептуру и способ приготовления безглютеновой закваски спонтанного брожения из равных количеств муки из зерна амаранта, киноа и гречневой муки [31]. Закваску вели при выходе закваски DY, равным 250 ($DY = (\text{масса муки} + \text{масса воды}) \times 100 / \text{масса муки}$). Численность молочнокислых бактерий составила $9,60 \pm 0,02 \log \text{КОЕ/г}$, общее количество дрожжей – $7,91 \pm 0,15 \log \text{КОЕ/г}$, в том числе не относящихся к роду *Saccharomyces* (лизин-положительных) – $7,52 \pm 0,10 \log \text{КОЕ/г}$.

Кроме муки, на стадии выведения заквасок спонтанного брожения используют и немучные компоненты, которые могут служить источником специфической микрофлоры (йогурт и чайный гриб) ли-

бо питательных веществ для микрофлоры муки (фруктовый сок, сок жимолости, яблоко и банан, кальций, клетчатка и белок), либо препятствовать развитию нежелательной микрофлоры (хмель и черемуха) [34, 73–81].

Благоприятное действие фруктовых соков авторы А. Р. Dorosh и N. N. Gregirchak объясняют тем, что вместе с ними в закваски попадают вещества, стимулирующие рост дрожжей, которые обеспечивают накопление в среде аминокислот и витаминов, необходимых бактериям, в том числе молочнокислым [82].

При добавлении фруктов, цветов или пива Ламбик в питательную среду при выведении и воспроизводстве хлебопекарной закваски в ней обнаруживаются уксуснокислые бактерии [50, 83]. Уксуснокислые бактерии вида *Gluconobacter cerinus* были обнаружены в итальянских заквасках, на стадии выведения которых в питательную смесь добавляли цветки яблони или мякоть яблока [83]. Добавление базилика в питательную смесь для греческих пшеничных заквасок приводит к появлению в составе микрофлоры дрожжей *Yarrowia lipolytica* [84].

Качество хлеба, изготовленного на заквасках, зависит от метаболической активности микробиоты закваски в сочетании с ферментативной активностью зерновых субстратов, поэтому необходимо стремиться поддерживать параметры их воспроизводства на постоянном уровне [85].

Субстратные факторы, такие как доступность углеводов и наличие антимикробных фенольных соединений, способствуют формированию дивергентной и специфичной для субстрата микробиоты. Однако специфическое влияние сырья на микробную экологию закваски до конца не изучено [42].

Влияние состава микробиома заквасок на вкус и аромат хлеба. Процесс ферментации водно-мучной смеси на начальном этапе выведения закваски спонтанного брожения запускается из-за активных эндогенных ферментов муки: амилазы расщепляют крахмал с высвобождением мальтозы и мальтодекстринов; протеазы осуществляют первичный протеолиз белков муки, в результате чего происходит деполимеризация клейковинной сети, накапливаются олигопептиды и свободные аминокислоты [86]. Присутствующие в муке молочнокислые бактерии сбраживают свободную мальтозу и моносахариды в молочную кислоту и/или уксусную кислоту и вызывают вторичный протеолиз, в ходе которого внутриклеточные пептидазы гидролизуют поглощенные олигопептиды и способствуют накоплению аминокислот в закваске в результате высвобождения их избыточных количеств из клетки. Эти аминокислоты не только обогащают закваски питательными веществами, но и являются предшественниками для дальнейшего ферментативного превращения во вкусо-активные летучие органические соединения (альдегиды, спирты,

карбоновые кислоты и/или сложные эфиры) под действием молочнокислых бактерий и/или дрожжей [42]. Накопление в закваске молочной кислоты (гомо- и гетероферментативные виды молочнокислых бактерий) и уксусной кислоты (гетероферментативные виды молочнокислых бактерий) формирует кислый вкус хлеба на закваске. Определяющим фактором является отношение молочной кислоты к уксусной, которое называют «коэффициентом брожения» (предпочтительно, чтобы на моль уксусной кислоты приходилось около 3,0–5,0 молей молочной). Молочная кислота придает хлебу мягкую кислинку и обеспечивает свежий вкус, тогда как уксусная кислота способствует формированию резкого уксусоподобного кислого вкуса. Уксусная кислота является летучей, что способствует формированию аромата хлеба. Более высокие температуры вызывают сдвиг коэффициента брожения в сторону образования молочной кислоты, тем самым усиливая подкисление закваски [33].

В исследовании J. Jin с соавторами продемонстрировано, что в закваске, содержащей *P. pentosaceus* и *S. cerevisiae*, коэффициент брожения составляет 2,08–2,86, а хлеб обладает сбалансированными сенсорными свойствами [24].

Гомоферментативные *Lactobacillaceae* преобразуют пируват в диацетил и ацетонин, придающие аромату хлеба маслянистые нотки. Диацетил может быть преобразован в пиразины посредством реакций Майяра в процессе выпечки хлеба. Накопление аминокислот в результате гидролиза пептидов может привести, например, к появлению вкуса умами – приятного вкуса высокобелковой или мясной пищи, создаваемого глутаматами. Образующийся в ходе биохимических превращений орнитин может реагировать с карбонильным соединением 2-оксипропаналем (метилглиоксаль) в процессе выпечки хлеба с образованием 2-ацетил-1-пирролина, который придает характерный аромат корке хлеба [33, 34]. Кроме того, в результате снижения pH хлебного теста в ходе реакций Майяра происходит перегруппировка Амадори, и в процессе выпечки образуются различные соединения Майяра, такие как фураны, пиразины, пирролы и пирролины [87]. Окисление жирных кислот, которые присутствуют в муке, катализируемое липоксигеназой и гидропероксидлиазой, вызывает образование летучих альдегидов, таких как 4,5-эпокси-(Е)-2-деценаль и (Е)-2-ноненаль, влияющих на аромат хлеба [34, 86]. В результате протеолиза белков образуются вкусоактивные пептиды: глутатион, некоторые γ -глутамилдипептиды и трипептиды, придающие т. н. «вкус кокуми» (характеризует баланс между глубиной, «богатством» вкуса, интенсивностью, длительностью послевкусия и общей гармоничностью вкуса) [88]. Некоторые молочнокислые бактерии, например, *L. plantarum*, синтезируют декарбоксии-

лазы фенольной кислоты и редуктазы коричной кислоты, которые преобразуют фенольные кислоты и флавоноиды, присутствующие в муке, в различные предшественники аромата [33, 34, 86, 89].

В исследовании М. S. Chiş и др. показана возможность улучшения качества безглютеновой продукции за счет использования рисовой закваски, в которой присутствуют молочнокислые бактерии *Lactobacillus spicheri* DSM 15429: среди летучих веществ, формирующих профиль аромата изделий, были идентифицированы 3-метилбутаналь, 2-метилбутаналь, ацетофенон и лимонен; кроме того, улучшились реологические свойства мякиша маффинов и его текстура [90].

Биохимические процессы, происходящие в закваске под воздействием молочнокислых бактерий, влияют на реологические свойства теста: глутатионредуктаза разрушает дисульфидные связи в клейковинном каркасе с накоплением тиоловых соединений, которые снижают окислительно-восстановительный потенциал закваски [34]. Повышению газодерживающей способности теста и получению хлеба с большим объемом и лучшей пористостью способствуют арабиноксиланы (в кислой среде обладают повышенной гидратационной способностью) и образующиеся с помощью молочнокислых бактерий олигосахариды (кестозы, нистозы и кестопентаозы), которые обладают высокой водосвязывающей способностью. Благодаря этому замедляется процесс черствения, связанный с испарением влаги [34, 86].

Дрожжевые клетки вносят свой вклад в формирование аромата закваски и хлеба, синтезируя различные вещества, в частности высшие спирты из аминокислот. Например, 3-метил-1-бутанол (характерный компонент вкуса хлебного мякиша) из L-лейцина [33]. Сложные эфиры, являющиеся продуктами конденсации этанола и жирных кислот (этиловые эфиры) или высших спиртов и ацетатов (ацетатные эфиры), придают вкусу хлеба фруктовые и цветочные ноты; диацетил, образующийся в результате метаболизма пирувата в процессе ферментации либо в результате разложения по Штрекеру во время выпечки, – аромат масла [33, 34].

Особенности метаболизма микроорганизмов, в том числе способность утилизировать мальтозу и образовывать экзополисахариды из сахарозы, а также использование акцепторов электронов гетероферментативными молочнокислыми бактериями и кислотоустойчивость, опосредованная конверсией аргинина и глутамина, не только определяют конкурентоспособность видов при брожении закваски, но и формируют качество хлеба. Таким образом, исследование сообществ микроорганизмов представляет собой ценный инструмент для понимания влияния технологических режимов ведения закваски на ее микробиом и на качество хлеба [85].

Биологические эффекты, возникающие в организме человека при употреблении хлеба, приготовленного на заквасках. Сравнение хлебобулочных изделий, приготовленных с использованием хлебопекарных дрожжей и на закваске, свидетельствует о том, что хлеб на закваске лучше усваивается организмом человека и характеризуется более высокой биодоступностью минеральных веществ, поскольку в процессе брожения закваски происходит деградация отдельных компонентов, в частности белков и фитатов [30, 42].

Из закваски спонтанного брожения, выведенной на муке псевдозлаков (киноа и амаранта), выделен штамм молочнокислых бактерий *Lactobacillus plantarum* CRL1964 (в современной классификации *L. plantarum*), содержащий высокоактивную фитазу [91].

Использование закваски или дополнительное введение в рецептуру растворимых пищевых волокон перспективно для снижения усвояемости крахмала хлеба и значений гликемического индекса и инсулинового индекса (хотя эти эффекты обусловлены разными механизмами). Ферментация с помощью заквасочных культур в технологии цельнозернового хлеба, в том числе ржаного, позволяет улучшить технологическую функциональность клетчатки отрубей [42].

Микробный метаболизм в процессе ферментации закваски может способствовать синтезу, высвобождению и/или повышению биодоступности ряда функциональных соединений, таких как витамины, фитохимические вещества, пребиотические экзополисахариды и биоактивные пептиды [30, 42]. Например, антиоксидантные пептиды (в том числе луназин) высвобождаются из белков злаков при ферментации закваски. Эти пептиды обладают профилактической активностью в отношении окислительного стресса, связанного с дегенеративными заболеваниями старения (например, раком и атеросклерозом) [42].

В работе О. А. Adebo с соавторами на примере закваски из кукурузной муки показано, что в процессе ее ферментации происходят изменения фенольных соединений: флавоноидов (апигенина, кемпферола, лютеолина, кверцетина и таксифолина) и фенольных кислот (кофеиновой, галловой, феруловой, р-кумаровой, синапиновой и ванилиновой) [66]. Наблюдалось снижение содержания флавоноидов при увеличении фенольных кислот. Полученные сведения могут быть использованы для определения рациональной продолжительности ферментации закваски из кукурузной муки, поскольку обе группы изученных веществ обладают выраженными биологически активными свойствами и пользой для здоровья человека. Необходимо дальнейшее изучение образующихся метаболитов и их биологической активности.

М. S. Chiş и др. показали, что в безглютеновых маффинах, приготовленных с использованием 15 % рисовой закваски, которая содержит молочнокислые бактерии *L. spicheri* DSM 15429, возрастает общее количество фенолов на 70,53 % [92]. Авторами было отмечено повышение содержания аминокислот и биодоступности минеральных веществ, а также увеличение антиоксидантной активности на 73,70 %.

V. Galli с соавторами установили, что антиоксидантная активность, которую проявляют закваска и хлеб, зависит не только от микрофлоры, осуществляющей биохимические превращения, но и от состава субстрата: у образцов из ячменной муки она выше, чем у пшеничных [29]. Отмечено, что в заквасках, выведенных на мучных средах из пшеницы сортов Skorpion и Aubusson, содержались молочнокислые бактерии *Lactobacillus farciminis* Fi17, *L. plantarum* Fi27 и *L. plantarum* Fi58. Однако в первом случае (сорт пшеницы Skorpion) в заквасках содержались вещества, проявляющие антиоксидантную активность, а во втором случае (сорт пшеницы Aubusson) – антиоксидантная активность отсутствовала. Также отмечено, что штамм *Lactobacillus rossiae* Fi19 проявлял высокую антиоксидантную активность только в сочетании с ячменной мукой.

Применение заквасок может стать одним из способов решения задачи по сокращению уровня сахара в сдобных булочных изделиях из-за способности отдельных видов микроорганизмов синтезировать полиолы, повышающие сладость (например, маннит, ксилит, эритрит), и экзополисахариды, компенсирующие ухудшение структуры мякиша и его текстуры (ведь сахар имеет важное технологическое значение). Молочнокислые бактерии *F. sanfranciscensis*, *L. mesenteroides* и *L. citreum* продуцируют маннит, *Oenococcus oeni* (ранее назывался *Leuconostoc oenos*) – эритрит, дрожжи *K. humilis* (ранее назывались *Candida milleri*) – ксилит при наличии ксилозы в среде [93].

Приготовление хлеба на заквасках может представлять интерес для людей, которым по разным причинам неприемлем хлеб с глютенем. По данным Т. Nejranі и др., белки клейковины трансформируются при использовании заквасок, становясь практически безопасными для людей с ее переносимостью [94]. Это подтверждают и модельные опыты, осуществленные R. Di Cagno с соавторами с помощью молочнокислых бактерий *F. sanfranciscensis* (*Lactobacillus sanfranciscensis* LS40 и LS41) и *L. plantarum* (*L. plantarum* CF1) [95]. Отмечено увеличение доступности Ca^{2+} , Zn^{2+} и Mg^{2+} благодаря высокой активности фитазы заквасочных культур.

В исследовании Е. Çakır и др. при анализе закваски спонтанного брожения из муки голозерного ячменя выявлены 9 видов молочнокислых бакте-

рий (*Pediococcus* (доминантный вид), *L. curvatus*, *L. brevis*, *L. plantarum*, *Lactobacillus fermentum*, *Lactobacillus musae*, *Lactobacillus paralimentarius*, *L. mesenteroides* и *Lactobacillus equigenerosi*), среди которых высокую фитазную активность проявляли бактерии *L. plantarum*, *P. pentosaceus* и *L. mesenteroides* [64].

В тесте присутствуют вещества, из которых на этапе выпечки образуется акриламид: редуцирующие сахара и аспарагин. Протеолиз и подкисление теста, приготовленного на заквасках, может прямо и косвенно влиять как на сахарный, так и на аминокислотный состав, а низкие значения pH и высокие значения общей титруемой кислотности в тесте препятствуют образованию акриламида [96]. Е. Bartkiene с соавторами установили, что при использовании пшеничной закваски, содержащей в своем составе молочнокислые бактерии *P. pentosaceus* и *L. mesenteroides*, в хлебе снижается содержание акриламида на 29,5 %, а при использовании закваски, содержащей *P. pentosaceus* и *Latilactobacillus curvatus*, – на 67,2 % [97].

Н. Demirkesen-Bicak исследовал гликемический индекс и усвояемость крахмала *in vitro* хлеба, приготовленного на заквасках, в том числе спонтанного брожения. Содержание резистентного крахмала зависит от температуры, при которой осуществляется ведение закваски: при 25 °C его количество больше, чем при 30 °C. Гликемический индекс хлеба из сортовой пшеничной муки находился в диапазоне 60,8–78,9 [98].

С помощью жидкостной хроматографии-масс-спектрометрии V. Koistinen с соавторами исследовали метаболический профиль цельнозернового хлеба из пшеницы и ржи на закваске, содержащей *K. humilis*, *L. brevis* и *L. plantarum*. Отмечено повышенное количество аминокислот с разветвленной цепью и потенциально биологически активных малых пептидов в ржаном хлебе. Это может способствовать проявлению профилактических свойств в отношении сердечно-сосудистых заболеваний и сахарного диабета 2 типа [99].

Выводы

Провели анализ и систематизацию исследований отечественных и зарубежных ученых в отношении факторов, влияющих на микробиом хлебопекарных заквасок, в частности спонтанного брожения. Показали взаимосвязь между сырьем, используемым

на стадии выведения заквасок спонтанного брожения, и показателями качества заквасок.

Использование заквасок спонтанного брожения наиболее характерно для пекарен, специализирующихся на выпуске ремесленной продукции.

Все большую актуальность приобретают исследования, связанные с изучением трансформации биологически активных соединений в процессе ферментации закваски. Это связано с поиском и расширением набора эффективных инструментов для разработки хлебобулочной продукции, обладающей специфическими питательными свойствами (пониженный гликемический индекс, повышенное количество биологически доступных питательных веществ, пониженное содержание акриламида и сниженная аллергенность gliadina).

Большой научный и практический интерес представляют выделение, идентификация и характеристика микроорганизмов, входящих в микробиом заквасок спонтанного брожения, для поиска специфических штаммов, которые позволяют разрабатывать на их основе закваски, предназначенные для различных узконаправленных целей.

Критерии авторства

И. М. Жаркова – обзор литературных источников по исследуемой проблеме, написание рукописи и ее корректировка до подачи в редакцию. Ю. Ф. Росляков – корректировка рукописи до подачи в редакцию. Д. С. Иванчиков – обзор литературных источников по исследуемой проблеме, написание рукописи и ее корректировка до подачи в редакцию. Все авторы несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

I.M. Zharkova reviewed the literature, wrote and proofread the manuscript. Yu.F. Roslyakov edited the manuscript. D.S. Ivanchikov reviewed the literature, wrote and proofread the manuscript. All the authors are responsible for any potential plagiarism

Conflict of interest

The authors declare that there is not conflict of interests.

References/Список литературы

1. Sanina TV, Mikhajlov IA, Veremeenko VN, Shul'zhenko SA. Grain bread production method. Russia patent RU 2170020C1. 2001. [Способ производства зернового хлеба: пат. 2170020C1 Рос. Федерация. № 99123946/13 / Санина Т. В. [и др.]; заявл. 15.11.1999; опубл. 10.07.2001; Бюл. № 19. 5 с.].
2. Nemirov VV. Gluten-free bread manufacturing method and composition. Russia patent RU 2715592C1. 2020. [Способ и состав для изготовления безглютенового хлеба: пат. 2715592C1 Рос. Федерация. № 2019116696 / Немиров В. В.; заявл. 30.05.2019; опубл. 02.03.2020; Бюл. № 7. 7 с.].

3. Soda bread [Internet]. [cited 2022 Dec 16]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Soda_bread
4. Magomedov GO, Ryzhenin PYu, Taratukhin AS, Shakhov SV. Method for production of aerated non-yeasted bread of whole-milled wheat grains. Russia patent RU 2569832C1. 2015. [Способ производства сбивного бездрожжевого хлеба из муки цельносмолотого зерна пшеницы: пат. 2569832C1 Рос. Федерация. № 2014141186/13 / Магомедов Г. О. [и др.]; заявл. 13.10.2014; опубл. 27.11.2015; Бюл. № 33. 13 с.].
5. Magamedov GO, Zatsepilina NP, Malyutina TN, Dzantieva EEh, Lygin VV. Mechanical aeration of functional bread. Relevant Issues of Improving Technology of Agricultural Production and Processing. 2017;(19):118–120. (In Russ.). [Механический способ разрыхления технологии сбивного хлеба для здорового питания / Г. О. Магомедов [и др.] // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2017. № 19. С. 118–120.]. <https://www.elibrary.ru/ZVKKLH>
6. Magomedov GO, Khvostov AA, Zhuravlev AA, Magomedov MG, Taratukhin AS, Plotnikova IV. Formation of whipped yeast-free bread crumb with intensive microwave convective baking. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):426–438. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2375>
7. Vaulina GA, Evseev NV. Whipped quick bread. Russia patent RU 2683545C1. 2019. [Сбивной бездрожжевой хлеб: пат. 2683545C1 Рос. Федерация. № 2018111933 / Ваулина Г. А., Евсеев Н. В.; заявл. 03.04.2018; опубл. 28.03.2019; Бюл. № 10. 6 с.].
8. Afanas'eva OV. Microbiology of bakery production. St. Petersburg: Beresta; 2003. 220 p. (In Russ.). [Афанасьева О. В. Микробиология хлебопекарного производства. СПб.: Береста, 2003. 220 с.].
9. Lahue C, Madden AA, Dunn RR, Heil CS. History and domestication of *Saccharomyces cerevisiae* in bread baking. Frontiers in Genetics. 2020;11. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.584718>
10. Meledina TV, Davydenko SG, Golovinskaia OV, Shestopalova IA, Morozov AA. New yeast strain in baking industry. Food Processing: Techniques and Technology. 2018;48(4):59–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-59-65>
11. Gänzle MG. BREAD | Sourdough bread. In: Batt CA, Tortorello ML, editors. Encyclopedia of food microbiology. Academic Press; 2014. pp. 309–315. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384730-0.00045-8>
12. Winters M, Panayotides D, Bayrak M, Rémont G, Viejo CG, Liu D, et al. Defined co-cultures of yeast and bacteria modify the aroma, crumb and sensory properties of bread. Journal of Applied Microbiology. 2019;127(3):778–793. <https://doi.org/10.1111/jam.14349>
13. Garcia-Hernandez A, Roldan-Cruz C, Vernon-Carter EJ, Alvarez-Ramirez J. Effects of leavening agent and time on bread texture and in vitro starch digestibility. Journal of Food Science and Technology. 2022;59(5):1922–1930. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05206-1>
14. Zharkova IM, Safonova YuA. Substantiation of rational dosage of “Evitalia” sourdough culture for gluten-free bread from amaranth flour. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2021;83(3):174–181. (In Russ.). [И. М. Жаркова, Сафонова Ю. А. Обоснование рациональной дозировки закваски «Эвиталия» для безглютенового хлеба из амарантовой муки // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83. № 3. С. 174–181.]. <https://www.elibrary.ru/ALWMLK>
15. Zharkova IM, Kuchmenko TA, Proskurina MA, Roslyakov YuF, Sotnikova VV. Research of a smell of the bread from mix of rye and wheat flour made on different ferments and acidifiers. Bread Products. 2015;(8):47–49. (In Russ.). [Исследование запаха хлеба из смеси ржаной и пшеничной муки, приготовленного на разных заквасках и подкислителе / И. М. Жаркова [и др.] // Хлебопродукты. 2015. № 8. С. 47–49.]. <https://www.elibrary.ru/UANITP>
16. Amann LS, Frank O, Dawid C, Hofmann TF. The sensory-directed elucidation of the key tastants and odorants in sourdough bread crumb. Foods. 2022;11(15). <https://doi.org/10.3390/foods11152325>
17. Savkina OA, Kuznetsova LI, Pavlovskaya EN, Lokachuk MN, Parakhina OI. Starter compositions for the preparation of different types of starter cultures. Baking in Russia. 2021;(6):41–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.37443/2073-3569-2021-1-6-41-44>
18. Vershinina OI, Roslyakov YuF, Gonchar VV, Ilchishina NV. New technology for preparing acidophilic stered with improved biotechnological properties. The Journal of Almaty Technological University. 2021;(1):5–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2021-1-5-11>
19. Nevskaya EV, Borodulin DM, Potekha VL, Nevskiy AA, Lobasenko BA, Shulbaeva MT. Development of integrated technology and assortment of long-life rye-wheat bakery products. Foods and Raw Materials. 2018;6(1):99–109. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-99-109>
20. Gur'ev SS, Popov VS. Properties of starter cultures based on non-traditional flours. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(3):470–479. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-470-479>
21. Xu D, Zhang Y, Tang K, Hu Y, Xu X, Gänzle MG. Effect of mixed cultures of yeast and lactobacilli on the quality of wheat sourdough bread. Frontiers in Microbiology. 2019;10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02113>
22. Tamang JP, Cotter PD, Endo A, Han NS, Kort R, Liu SQ, et al. Fermented foods in a global age: East meets West. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020;19(1):184–217. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12520>

23. Katsi P, Kosma IS, Michailidou S, Argiriou A, Badeka AV, Kontominas MG. Characterization of artisanal spontaneous sourdough wheat bread from Central Greece: Evaluation of physico-chemical, microbiological and sensory properties in relation to conventional yeast leavened wheat bread. *Foods*. 2021;10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030635>
24. Jin J, Nguyen TTH, Humayun S, Park SH, Oh H, Lim S, *et al.* Characteristics of sourdough bread fermented with *Pediococcus pentosaceus* and *Saccharomyces cerevisiae* and its bio-preservative effect against *Aspergillus flavus*. *Food Chemistry*. 2021;345. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128787>
25. Bolarinwa IF, Hanis-Syazwani MG, Muhammad K. Optimisation of important processing conditions for rice bran sourdough fermentation using *Lactobacillus plantarum*. *Foods and Raw Materials*. 2019;7(1):131–142. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-131-142>
26. Škrobot D, Dapčević-Hadnađev T, Tomić J, Maravić N, Popović N, Jovanov P, *et al.* Techno-functional performance of emmer, spelt and khorasan in spontaneously fermented sourdough bread. *Foods*. 2022;11(23). <https://doi.org/10.3390/foods11233927>
27. Kwon J-G, Park S-H, Kwak J-E, Cho JH, Kim G, Lee D, *et al.* Mouse feeding study and microbiome analysis of sourdough bread for evaluation of its health effects. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.989421>
28. Gobetti M, de Angelis M, di Cagno R, Calasso M, Archetti G, Rizzello CG. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*. 2019;302:103–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018>
29. Galli V, Venturi M, Guerrini S, Blandino M, Luti S, Pazzagli L, *et al.* Antioxidant properties of sourdoughs made with whole grain flours of hull-less barley or conventional and pigmented wheat and by selected lactobacilli strains. *Foods*. 2020;9(5). <https://doi.org/10.3390/foods9050640>
30. Milanović V, Osimani A, Garofalo C, Belleggia L, Maoloni A, Cardinali F, *et al.* Selection of cereal-sourced lactic acid bacteria as candidate starters for the baking industry. *PLoS ONE*. 2020;15(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236190>
31. Carbo R, Gordun E, Fernandez A, Ginovart M. Elaboration of a spontaneous gluten-free sourdough with a mixture of amaranth, buckwheat, and quinoa flours analyzing microbial load, acidity, and pH. *Food Science and Technology International*. 2020;26(4):344–352. <https://doi.org/10.1177/1082013219895357>
32. Collection of pure cultures [Internet]. [cited 2022 Dec 16]. Available from: <https://gosniihp.ru/produktsiya-i-uslugi/muzey-chistykh-kultur-promyshlennno-tsennykh-mikroorganizmov>
33. de Vuyst L, van Kerrebroeck S, Leroy F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation. *Advances in Applied Microbiology*. 2017;100:49–160. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2017.02.003>
34. de Vuyst L, Comasio A, van Kerrebroeck S. Sourdough production: fermentation strategies, microbial ecology, and use of non-flour ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63(15):2447–2479. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1976100>
35. Khlestkin VK, Lockachuk MN, Savkina OA, Kuznetsova LI, Pavlovskaya EN, Parakhina OI. Taxonomic structure of bacterial communities in sourdoughs of spontaneous fermentation. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(4):385–393. (In Russ.). <https://doi.org/10.18699/VJGB-22-47>
36. Consumption of mass bread varieties in the Russian Federation declines as demand for high-margin products grows [Internet]. [cited 2022 Dec 27]. Available from: <https://finmarket.ru/turbopages.org/finmarket.ru/h/news/5477867>
37. Zharkova IM, Proskurina MA, Roslyakov YuF. About the role of ferments and acidifiers in discrete method of production of bread from a mixture of rye and wheat flour. *Bread Products*. 2015;(6):54–56. (In Russ.). [Жаркова И. М., Проскурина М. А., Росляков Ю. Ф. О роли заквасок и подкислителей при дискретном способе производства хлеба из смеси ржаной и пшеничной муки // Хлебопродукты. 2015. № 6. С. 54–56.]. <https://www.elibrary.ru/TWTESH>
38. Shmalko NA, Roslyakov YuF, Smirnov SO. Method for production of molded rye-wheat bread with amaranth improver. Russia patent RU 2699976C2. 2019. [Способ производства формового ржано-пшеничного хлеба с амарантовым улучшителем: пат. 2699976C2 Рос. Федерация. № 2018100790 / Шмалько Н. А., Росляков Ю. Ф., Смирнов С. О.; заявл. 10.01.2018; опубл. 11.09.2019; Бюл. № 19. 13 с.].
39. Legkov IS, Kusova IU, Dubtsov GG. Method for manufacture of dry biological rye starter for bread baking. Russia patent RU 2492653C1. 2013. [Способ изготовления сухой ржаной биологической закваски для хлебопечения: пат. 2492653C1 Рос. Федерация. № 2012110938/13 / Легков И. С., Кусова И. У., Дубцов Г. Г.; заявл. 22.03.2012; опубл. 20.09.2013; Бюл. № 26. 7 с.].
40. Afanas'eva OV, Kuznetsova LI, Pavlovskaya EN, Savkina OA. Biological bread sourdough as a way to increase the competitiveness of rye flour bakery products. *Baking in Russia*. 2009;(6):18–19. (In Russ.). [Биологическая хлебная закваска – путь к повышению конкурентоспособности хлебобулочных изделий с использованием ржаной муки / О. В. Афанасьева [и др.] // Хлебопечение России. 2009. № 6. С. 18–19.]. <https://www.elibrary.ru/KWYSUF>
41. Boreczek J, Litwinek D, Żylińska-Urban J, Izak D, Buksa K, Gawor J, *et al.* Bacterial community dynamics in spontaneous sourdoughs made from wheat, spelt, and rye wholemeal flour. *MicrobiologyOpen*. 2020;9(4). <https://doi.org/10.1002/mbo3.1009>

42. Galle S. Sourdough: A tool to improve bread structure. In: Gobbetti M, Gänzle M, editors. Handbook on sourdough biotechnology. New York: Springer; 2013. pp. 217–228. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5425-0_8
43. Gänzle MG, Zheng J. Lifestyles of sourdough lactobacilli – Do they matter for microbial ecology and bread quality? International Journal of Food Microbiology. 2019;302:15–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.08.019>
44. National Library of Medicine. The National Center for Biotechnology Information [Internet]. [cited 2022 Dec 16]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>
45. Zheng J, Wittouck S, Salvetti E, Franz CMAP, Harris HMB, Mattarelli P, et al. A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2020;70(4):2782–2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>
46. Dudikova GN, Chizhayeva AV. Consortium of lactic acid bacteria and yeast for rye starter with the increased antagonistic properties. Food Processing: Techniques and Technology. 2016;41(2):34–39. (In Russ.). [Дудикова Г. Н., Чижаева А. В. Консорциум молочнокислых бактерий и дрожжей для ржаной закваски с повышенными антагонистическими свойствами // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 41. № 2. С. 34–39.] <https://www.elibrary.ru/WCLBNZ>
47. Ercolini D, Pontonio E, de Filippis F, Minervini F, La Stora A, Gobbetti M, et al. Microbial ecology dynamics during rye and wheat sourdough preparation. Applied and Environmental Microbiology. 2013;79(24):7827–7836. <https://doi.org/10.1128/AEM.02955-13>
48. Lokachuk MN, Vereshchagina EN, Savkina OA, Khlestkin VK. Research of microflora of spontaneous starter cultures for baking production from geographically remote places of the north-west region of Russia. Baking in Russia. 2019;(3):32–35. (In Russ.). [Исследование микрофлоры спонтанных заквасок для хлебопекарного производства из географически отдаленных мест северо-западного региона России / М. Н. Локачук [и др.] // Хлебопечение России. 2019. № 3. С. 32–35.] <https://www.elibrary.ru/XZNHRH>
49. van Kerrebroeck S, Maes D, de Vuyst L. Sourdoughs as a function of their species diversity and process conditions, a meta-analysis. Trends in Food Science and Technology. 2017;68:152–159. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.016>
50. Comasio A, Verce M, van Kerrebroeck S, de Vuyst L. Diverse microbial composition of sourdoughs from different origins. Frontiers in Microbiology. 2020;11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01212>
51. Oshiro M, Zendo T, Nakayama J. Diversity and dynamics of sourdough lactic acid bacteriota created by a slow food fermentation system. Journal of Bioscience and Bioengineering. 2021;131(4):333–340. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.11.007>
52. Jonkuvienė D, Vaičiulytė-Funk L, Šalomskienė J, Alenčikienė G, Miežilienė A. Potential of *Lactobacillus reuteri* from spontaneous sourdough as a starter additive for improving quality parameters of bread. Food Technology and Biotechnology. 2016;54(3):342–350. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.03.16.4143>
53. Yakupova II, Koshchina EI, Gareeva IT. Development of a recipe for sourdough loaves of spontaneous fermentation. Food Technologies of the Future: Innovations in Agricultural Production and Processing: Proceeding of the II International Scientific and Practical Conference, International Research and Practical Forum dedicated to the Day of Bread and Salt; 2021; Saratov. Saratov: Center of social agroinnovations of SSAU; 2021. p. 480–486. (In Russ.). [Якупова И. И., Кошина Е. И., Гареева И. Т. Разработка рецептуры хлебцев на закваске спонтанного брожения // Пищевые технологии будущего: инновации в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: Сборник статей II Международной научно-практической конференции в рамках международного научно-практического форума, посвященного Дню Хлеба и соли. Саратов, 2021. С. 480–486.] <https://www.elibrary.ru/RKNUFY>
54. Minervini F, de Angelis M, Di Cagno R, Gobbetti M. Ecological parameters influencing microbial diversity and stability of traditional sourdough. International Journal of Food Microbiology. 2014;171:136–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2013.11.021>
55. Syrokou MK, Themeli C, Paramithiotis S, Mataragas M, Bosnea L, Argyri AA, et al. Microbial ecology of Greek wheat sourdoughs, identified by a culture-dependent and a culture-independent approach. Foods. 2020;9(11). <https://doi.org/10.3390/foods9111603>
56. Bessmeltseva M, Viirard E, Simm J, Paalme T, Sarand I. Evolution of bacterial consortia in spontaneously started rye sourdoughs during two months of daily propagation. PLoS ONE. 2014;9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095449>
57. Weckx S, van der Meulen R, Maes D, Scheirlinck I, Huys G, Vandamme P, et al. Lactic acid bacteria community dynamics and metabolite production of rye sourdough fermentations share characteristics of wheat and spelt sourdough fermentations. Food Microbiology. 2010;27(8):1000–1008. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.06.005>
58. Fujimoto A, Ito K, Ito M, Narushima N, Ito T, Yamamoto A, et al. Microbial behavior and changes in food constituents during fermentation of Japanese sourdoughs with different rye and wheat starting materials. Journal of Bioscience and Bioengineering. 2018;125(1):97–104. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.08.009>
59. Landis EA, Oliverio AM, McKenney EA, Nichols LM, Kfoury N, Biango-Daniels M, et al. The diversity and function of sourdough starter microbiomes. eLife. 2021;10. <https://doi.org/10.7554/eLife.61644>

60. Molchanova EN, Rakhmonov KS, Isabaev IB, Ibragimov UM. Optimization of the recipe composition of wheat bread with the use spontaneous sourdough fermentation. *Baking in Russia*. 2018;(3):29–32. (In Russ.). [Оптимизация рецептурного состава пшеничных сортов хлеба с использованием заквасок спонтанного брожения / Е. Н. Молчанова [и др.] // Хлебопечение России. 2018. № 3. С. 29–32.]. <https://www.elibrary.ru/YTYJQT>
61. Karimi N, Zeynali F, Rezazad Bari M, Nikoo M, Mohtarami F, Kadivar M. Amaranth selective hydrolyzed protein influence on sourdough fermentation and wheat bread quality. *Food Science and Nutrition*. 2021;9(12):6683–6691. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2618>
62. Boytsova TM, Nazarova OM. Technology of production of rye-wheat bread on the basis of enriched starter. *Baking in Russia*. 2017;(3):16–19. (In Russ.). [Бойцова Т. М., Назарова О. М. Технология производства ржано-пшеничного хлеба на основе обогащенной закваски // Хлебопечение России. 2017. № 3. С. 16–19.]. <https://www.elibrary.ru/YZMIRD>
63. Reidzane S, Gramatina I, Galoburda R, Komasilovs V, Zacepins A, Bljahhina A, *et al.* Composition of polysaccharides in hull-less barley sourdough bread and their impact on physical properties of bread. *Foods*. 2023;12(1). <https://doi.org/10.3390/foods12010155>
64. Çakır E, Arıcı M, Durak MZ. Biodiversity and techno-functional properties of lactic acid bacteria in fermented hull-less barley sourdough. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2020;130(5):450–456. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2020.05.002>
65. Sereti V, Lazaridou A, Biliaderis CG, Valamoti SM. Reinvigorating modern breadmaking based on ancient practices and plant ingredients, with implementation of a physicochemical approach. *Foods*. 2021;10(4). <https://doi.org/10.3390/foods10040789>
66. Adebo OA, Oyedeji AB, Adebisi JA, Chinma CE, Oyeyinka SA, Olatunde OO, *et al.* Kinetics of phenolic compounds modification during maize flour fermentation. *Molecules*. 2021;26(21). <https://doi.org/10.3390/molecules26216702>
67. Moroni AV, Arendt EK, Morrissey JP, Dal Bello F. Development of buckwheat and teff sourdoughs with the use of commercial starters. *International Journal of Food Microbiology*. 2010;142(1–2):142–148. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.06.014>
68. Vogelmann SA, Seitter M, Singer U, Brandt MJ, Hertel C. Adaptability of lactic acid bacteria and yeasts to sourdoughs prepared from cereals, pseudocereals and cassava and use of competitive strains as starters. *International Journal of Food Microbiology*. 2009;130(3):205–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.01.020>
69. Sterr Y, Weiss A, Schmidt H. Evaluation of lactic acid bacteria for sourdough fermentation of amaranth. *International Journal of Food Microbiology*. 2009;136(1):75–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2009.09.006>
70. Edema MO, Sanni AI. Functional properties of selected starter cultures for sour maize bread. *Food Microbiology*. 2008;25(4):616–625. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2007.12.006>
71. Meroth CB, Hammes WP, Hertel C. Characterisation of the microbiota of rice sourdoughs and description of *Lactobacillus spicheri* sp. nov. *Systematic and Applied Microbiology*. 2004;27(2):151–159. <https://doi.org/10.1078/072320204322881763>
72. Moroni AV, Dal Bello F, Arendt EK. Sourdough in gluten-free bread-making: An ancient technology to solve a novel issue? *Food Microbiology*. 2009;26(7):676–684. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.07.001>
73. Mohd Roby BH, Muhialdin BJ, Abadl MMT, Mat Nor NA, Marzlan AA, Lim SAH, *et al.* Physical properties, storage stability, and consumer acceptability for sourdough bread produced using encapsulated kombucha sourdough starter culture. *Journal of Food Science*. 2020;85(8):2286–2295. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15302>
74. Zakharova AS, Kozubaeva LA, Kolesnichenko MN, Pokryshkina EA. Preparation of sourdough rye with honeysuckle nectar. *Bread Products*. 2014;(10):48–49. (In Russ.). [Приготовление ржаных заквасок с соком жимолости / А. С. Захарова [и др.] // Хлебопродукты. 2014. № 10. С. 48–49.]. <https://www.elibrary.ru/SOCMOT>
75. Ladnova OL, Skorobogatov BB, Zubov MA, Ashikhina MP. Development of the technology of bakery products from wheat flour in the fruit ferments. *Health-saving Technologies at the University: State and Prospects: Proceedings of the All-Russian Research and Practical Conference*; 2018; Orel. Orel: Orel State University of Economics and Trade; 2018. p. 130–135. (In Russ.). [Разработка технологии хлебобулочных изделий из пшеничной муки на фруктовых заквасках / О. Л. Ладнова [и др.] // Здоровьесберегающие технологии в вузе: состояние и перспективы: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Орел, 2018. С. 130–135.]. <https://www.elibrary.ru/XWVEZN>
76. Matseychik IV, Korpacheva SM, Suvorova EA. The use of natural starters in the production of functional purpose bakery products enriched with calcium, cellulose, protein and β -carotin. *Bulletin of KSAU*. 2020;154(1):116–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-1-116-125>
77. Chaplygina IA, Batura NG, Matyushev VV, Tipsina NN, Shmeleva ZhN. The hop sourdough use to improve bread microbiological safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;421. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/3/032030>
78. Nionelli L, Pontonio E, Gobbetti M, Rizzello CG. Use of hop extract as antifungal ingredient for bread making and selection of autochthonous resistant starters for sourdough fermentation. *International Journal of Food Microbiology*. 2018;266:173–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.12.002>

79. Ivanova EP. Development of the production line hop-pumpkin leaven. *Innovative Machinery and Technology*. 2015;4(3):17–22. (In Russ.). [Иванова Е. П. Разработка линии производства хмеле-тыквенной закваски // Инновационная техника и технология. 2015. Т. 4. № 3. С. 17–22.]. <https://www.elibrary.ru/UXSGON>
80. Ivanova EP, Rodionov YuV, Kapustin VP. Selection and substantiation of biotechnological system for production of pumpkin-hop ferment. *Almanac of Modern Science and Education*. 2015;95(5):62–66. (In Russ.). [Иванова Е. П., Родионов Ю. В., Капустин В. П. Выбор и обоснование биотехнологической системы для производства хмелево-тыквенной закваски // Альманах современной науки и образования. 2015. Т. 95. № 5. С. 62–66.]. <https://www.elibrary.ru/TPFUEL>
81. Bochkareva ZA, Pchelinceva ON. Bakery products on rye sourdough with bird-cherry flour. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*. 2021;10(1):104–107. (In Russ.). [Бочкарева З. А., Пчелинцева О. Н. Хлебобулочные изделия на ржаной закваске с черемуховой мукой // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 1. С. 104–107.]. <https://www.elibrary.ru/PEJTEQ>
82. Dorosh AP, Gregirchak NN. Antagonistic properties of dough sour with directed cultivation and evaluation of microbiological characteristics of bread produced on its basis. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2015;37(2):10–15. (In Russ.). [Дорош А. П., Грегирчак Н. Н. Исследование антагонистических свойств закваски с направленным культивированием и оценка микробиологических показателей хлеба на ее основе // Техника и технология пищевых производств. 2015. Т. 37. № 2. С. 10–15.]. <https://www.elibrary.ru/UCQNEJ>
83. Ripari V, Gänzle MG, Berardi E. Evolution of sourdough microbiota in spontaneous sourdoughs started with different plant materials. *International Journal of Food Microbiology*. 2016;232:35–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.025>
84. Paramithiotis S, Müller MRA, Ehrmann MA, Tsakalidou E, Seiler H, Vogel R, et al. Polyphasic identification of wild yeast strains isolated from Greek sourdoughs. *Systematic and Applied Microbiology*. 2000;23(1):156–164. [https://doi.org/10.1016/S0723-2020\(00\)80057-0](https://doi.org/10.1016/S0723-2020(00)80057-0)
85. Gänzle M, Ripari V. Composition and function of sourdough microbiota: From ecological theory to bread quality. *International Journal of Food Microbiology*. 2016;239:19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.05.004>
86. Gänzle MG. Enzymatic and bacterial conversions during sourdough fermentation. *Food Microbiology*. 2014;37:2–10. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2013.04.007>
87. Pico J, Bernal J, Gómez M. Wheat bread aroma compounds in crumb and crust: A review. *Food Research International*. 2015;75:200–215. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.05.051>
88. Zhao CJ, Schieber A, Gänzle MG. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations – A review. *Food Research International*. 2016;89:39–47. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.042>
89. Boudaoud S, Aouf C, Devillers H, Sicard D, Segond D. Sourdough yeast-bacteria interactions can change ferulic acid metabolism during fermentation. *Food Microbiology*. 2021;98. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103790>
90. Chiş MS, Păucean A, Man SM, Mureşan V, Socaci SA, Pop A, et al. Textural and sensory features changes of gluten free muffins based on rice sourdough fermented with *Lactobacillus spicheri* DSM 15429. *Foods*. 2020;9(3). <https://doi.org/10.3390/foods9030363>
91. Sandez Penidez SH, Velasco Manini MA, Gerez CL, Rollán GC. Partial characterization and purification of phytase from *Lactobacillus plantarum* CRL1964 isolated from pseudocereals. *Journal of Basic Microbiology*. 2020;60(9):787–798. <https://doi.org/10.1002/jobm.202000236>
92. Chiş MS, Păucean A, Man SM, Bonta V, Pop A, Stan L, et al. Effect of rice flour fermentation with *Lactobacillus spicheri* DSM 15429 on the nutritional features of gluten-free muffins. *Foods*. 2020;9(6). <https://doi.org/10.3390/foods9060822>
93. Sahin AW, Zannini E, Coffey A, Arendt EK. Sugar reduction in bakery products: Current strategies and sourdough technology as a potential novel approach. *Food Research International*. 2019;126. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108583>
94. Hejrani T, Sheikholeslami Z, Ali Mortazavi S, Karimi M, Elhamirad AH. The evaluation of part-baked frozen bread produced from wheat flour and guar gum in the diet of celiac patients. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;58(7):2507–2515. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04757-z>
95. Di Cagno R, Rizzello CG, de Angelis M, Cassone A, Giuliani G, Benedusi A, et al. Use of selected sourdough strains of *Lactobacillus* for removing gluten and enhancing the nutritional properties of gluten-free bread. *Journal of Food Protection*. 2008;71(7):1491–1495. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-71.7.1491>
96. Bartkiene E, Özogul F, Rocha JM. Bread sourdough lactic acid bacteria – technological, antimicrobial, toxin-degrading, immune system-, and faecal microbiota-modelling biological agents for the preparation of food, nutraceuticals and feed. *Foods*. 2022;11(3). <https://doi.org/10.3390/foods11030452>
97. Bartkiene E, Bartkevics V, Krungleviciute V, Pugajeva I, Zadeike D, Juodeikiene G. Lactic acid bacteria combinations for wheat sourdough preparation and their influence on wheat bread quality and acrylamide formation. *Journal of Food Science*. 2017;82(10):2371–2378. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13858>
98. Demirkesen-Bicak H, Arici M, Yaman M, Karasu S, Sagdic O. Effect of different fermentation condition on estimated glycemic index, in vitro starch digestibility, and textural and sensory properties of sourdough bread. *Foods*. 2021;10(3). <https://doi.org/10.3390/foods10030514>
99. Koistinen VM, Mattila O, Katina K, Poutanen K, Aura A-M, Hanhineva K. Metabolic profiling of sourdough fermented wheat and rye bread. *Scientific Reports*. 2018;8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24149-w>