

Зависимость аминокислотного профиля и антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов от ферментативной активности молочнокислых микроорганизмов

Т.С. Бычкова, Е.М. Крутина, Ю.А. Дягилева

Всероссийский
научно-исследовательский
институт молочной
промышленности, г. Москва,
Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение: Ферментативная активность молочнокислых микроорганизмов (МКМ) играет решающую роль в формировании аминокислотного состава и функциональных свойств ферментированных молочных продуктов. Однако прямые взаимосвязи между ферментативным профилем отдельных штаммов и антиоксидантным потенциалом продукта остаются недостаточно изученными.

Цель: Определить влияние штаммов *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus bulgaricus* и *Streptococcus thermophilus* на аминокислотный профиль и антиоксидантные свойства кисломолочных продуктов.

Материалы и методы: В исследовании использованы 12 штаммов МКМ из коллекции ФГАНУ «ВНИМИ». Ферментативную активность определяли с помощью тест-системы API ZYM, аминокислотный состав — методом капиллярного электрофореза, содержание глутатиона — титриметрическим методом, антиоксидантную активность — амперометрически.

Результаты: Штаммы *L. acidophilus* проявили наибольшую протеолитическую активность, что сопровождалось увеличением содержания серосодержащих аминокислот (цистин, метионин) и более высокой антиоксидантной активностью. *L. bulgaricus* характеризовался умеренными показателями, тогда как *S. thermophilus* показал низкий уровень антиоксидантной активности, но обеспечил значительное накопление глутаминовой кислоты – предшественника глутатиона.

Выводы: Установлена зависимость аминокислотного профиля и антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов от ферментативной активности штаммов МКМ. Полученные данные подтверждают перспективность использования отдельных штаммов для направленного повышения функциональных свойств ферментированных молочных продуктов и подбора заквасочных культур с прогнозируемым биотехнологическим потенциалом.

Ключевые слова: ферментативная активность штаммов, протеолитические ферменты, аминокислотный состав ферментированных продуктов, серосодержащие аминокислоты, глутатион-зависимая антиоксидантная активность, заквасочные культуры для функциональных продуктов

Корреспонденция:
Татьяна Сергеевна Бычкова
E-mail: t_bychkova@vniimi.org

Конфликт интересов:
авторы сообщают
об отсутствии конфликта
интересов.

Поступила: 13.03.2025

Принята: 15.09.2025

Опубликована: 30.09.2025

Copyright: © 2025 Авторы



Для цитирования: Бычкова, Т.С., Крутина, Е.М., & Дягилева, Ю.А. (2025). Зависимость аминокислотного профиля и антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов от ферментативной активности молочнокислых микроорганизмов. *FOOD METAENGINEERING*, 3(3), 39–52.
<https://doi.org/10.37442/fme.2025.3.85>

Dependence of the Amino Acid Profile and Antioxidant Potential of Fermented Milk Products on the Enzymatic Activity of Lactic Acid Microorganisms

Tatyana S. Bychkova, Ekaterina M. Krutina, Yulia A. Diaghileva

All-Russian Dairy Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction: The enzymatic activity of lactic acid microorganisms (LAM) plays a decisive role in shaping the amino acid composition and functional properties of fermented dairy products. However, direct relationships between the enzymatic profile of individual strains and the antioxidant potential of the product remain insufficiently studied.

Purpose: To determine the effect of *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus bulgaricus*, and *Streptococcus thermophilus* strains on the amino acid profile and antioxidant properties of fermented dairy products.

Materials and methods: The study involved 12 LAM strains from the collection of FGANU "VNIMI." Enzymatic activity was assessed using the API ZYM test system; amino acid composition was determined by capillary electrophoresis; glutathione content was measured by titrimetric analysis; antioxidant activity was evaluated amperometrically.

Results: *L. acidophilus* strains demonstrated the highest proteolytic activity, which was associated with an increased content of sulfur-containing amino acids (cystine, methionine) and higher antioxidant activity. *L. bulgaricus* exhibited moderate values, whereas *S. thermophilus* showed low antioxidant activity but ensured significant accumulation of glutamic acid, a precursor of glutathione.

Conclusion: A direct relationship between the amino acid profile and antioxidant potential of fermented dairy products and the enzymatic activity of LAM strains was established. The findings confirm the potential of specific strains for targeted enhancement of the functional properties of fermented dairy products and for the selection of starter cultures with predictable biotechnological potential.

Keywords: strain enzymatic activity, proteolytic enzymes, amino acid composition of fermented products, sulfur-containing amino acids, glutathione-dependent antioxidant activity, starter cultures for functional products

Correspondence:

Tatyana S. Bychkova

E-mail: t_bychkova@vnimi.org

Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

Received: 13.03.2025

Accepted: 15.09.2025

Published: 30.09.2025

Copyright: © 2025 The Authors



To cite: Bychkova, T.S., Krutina, E.M., & Diaghileva, Yu.A. (2025). Dependence of the amino acid profile and antioxidant potential of fermented milk products on the enzymatic activity of lactic acid microorganisms. *FOOD METAENGINEERING*, 3(3), 39–52. <https://doi.org/10.37442/fme.2025.3.85>

ВВЕДЕНИЕ

Рост распространенности хронических неинфекционных заболеваний, таких как, например, диабет второго типа, сердечно-сосудистые патологии, нейродегенеративные расстройства, напрямую связан с нарушением окислительно-восстановительного баланса организма (Weimer et al., 2020; Vamanu & Gatea, 2020). По данным Всемирной организации здравоохранения, более 70 % всех смертей в мире связано именно с этими заболеваниями, а их ключевым патогенетическим механизмом является окислительный стресс¹ (Kiran & Kunal, 2024). В последние годы пищевые технологии рассматриваются как инструмент профилактики: рынок функциональных продуктов питания демонстрирует ежегодный рост более 7 %, а сегмент ферментированных молочных продуктов является одним из наиболее перспективным благодаря сочетанию традиционного потребления и доказанного оздоровительного эффекта (Feng & Wang, 2020; Ayivi & Ibrahim, 2022; Balthazar et al., 2024).

Антиоксидантный потенциал кисломолочных продуктов во многом определяется метаболизмом молочнокислых микроорганизмов (МКМ) (Stobiecka et al., 2022). Именно ферментативная активность заквасочных культур регулирует высвобождение аминокислот и пептидов, многие из которых проявляют антиоксидантные свойства напрямую, либо служат предшественниками ключевых молекул антиоксидантной защиты организма, таких как, например, глутатион (Зобкова, 2020; Mataczewska & Kaczorek-Lukowska, 2021; Stasiewicz et al., 2020). Однако, при всей актуальности данного направления, остается пробел: большинство исследований ограничивается качественным описанием ферментов или определением общей антиоксидантной активности, в то время как данные о прямой взаимосвязи между ферментативным профилем отдельных штаммов и формированием аминокислотного состава и антиоксидантных свойств продукта практически отсутствуют (Gu et al., 2020; Донская & Креккер, 2022; Vasudha et al., 2023).

Попытки решения данной проблемы предпринимались в ряде работ, где были проанализированы отдельные ферменты, например, β -галактозидаза у *Streptococcus thermophilus* (de Melo Pereira et al., 2020; Vasudha et al., 2023) или протеолитическая активность *Lactobacillus*

acidophilus (Донская, 2024). Однако полученные результаты не обеспечили целостного понимания механизмов, так как опирались либо на модельные среды, не отражающие реальный состав молока, либо на ограниченные панели штаммов без комплексного сопоставления ферментативной активности с аминокислотным профилем и антиоксидантной способностью продукта (Alexandraki et al., 2025).

В нашем исследовании выдвинута гипотеза, что именно протеолитические ферменты отдельных штаммов определяют накопление серосодержащих аминокислот и глутатиона, а значит — напрямую влияют на уровень антиоксидантной активности. Предполагается, что такое сопоставление позволит выявить ключевые ферменты и штаммовые особенности, определяющие функциональные свойства продукции. Эти данные могут расширить представления о механизмах формирования антиоксидантной активности. Настоящее исследование направлено на проверку этой гипотезы с использованием реальных молочных матриц и расширенной панели штаммов *Lactobacillus acidophilus*, *Streptococcus thermophilus* и *Lactobacillus bulgaricus*. Такой подход позволит не только устранить существующий пробел, но и сформировать основу для подбора заквасочных культур при разработке функциональных кисломолочных продуктов с прогнозируемым биотехнологическим потенциалом.

Таким образом, целью данного исследования является установление зависимости формирования аминокислотного профиля, и, как следствие, антиоксидантного потенциала кисломолочной продукции от ферментативной активности МКМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В данной работе объектами исследования выступали 12 штаммов МКМ, взятые из коллекции пробиотических и молочнокислых микроорганизмов ФГАНУ «ВНИМИ», а именно *Lactobacillus acidophilus* (штаммы: L.a. 97, L.a. AЦ, L.a. K3HII35, L.a. NK1), *Lactobacillus bulgaricus* (штаммы L.b. 200, L.b. B2, L.b. B10, L.b. 52) и *Streptococcus thermophilus* (штаммы: S.t. 91, S.t. 11, S.t. 14, S.t. TCB), а также

¹ Kiran, P. & Kunal, A. (2024). Cultured dairy product market size — by product (yogurt, cheese, kefir, sour creme, buttermilk, fermented milk, probiotic drinks), by source (cow milk, goat milk, sheep milk, plant-based milk), by fat content, by flavour, by packaging by distribution channel, by end, by user & forecast, 2024–2032, 300. GMI.

Т.С. Бычкова, Е.М. Крутина, Ю.А. Дягилева

кисломолочные продукты, приготовленные на основе этих штаммов

В качестве субстрата для ферментации использовали молоко питьевое ультрапастеризованное массовая доля жира 3,2% (производитель «ЭкоНива», Россия). Условия сквашивания были подобраны с учетом основных рекомендаций по приготовлению кисломолочного продукта на основании каждого рода микроорганизмов.

Процедура исследования

Для проведения исследований взяли лиофилизированную закваску, ее восстановили, исследовали ферментативную активность МКМ в закваске. Затем приготовили кисломолочные продукты на основе этих заквасок и исследовали их.

Подготовка культур

Исследуемые штаммы МКМ хранили в лиофилизированном состоянии при температуре минус $50 \pm 1^\circ\text{C}$. Восстановление лиофилизированных культур проводили в стерильном обезжиренном молоке (ОМС) марки «Стандарт» (Комплимилк, Слуцкий сыродельный комбтнат, г. Слуцк, Беларусь), путем инкубации в течение 18 часов. Инкубацию штаммов *L. acidophilus* и *S. thermophilus* проводили при температуре $37 \pm 1^\circ\text{C}$, штаммов *L. bulgaricus* — при температуре 40°C .

Подготовка образцов

При выработке кисломолочного продукта закваски на моновидовых штаммах вносили в пастеризованное молоко в объеме 5% от объема. Условия сквашивания были подобраны согласно Инструкции по приготовлению и применению заквасок для кисломолочных продуктов на предприятиях молочной промышленности, разработанной и утвержденной в ФГАНУ «ВНИМИ». Для *L. acidophilus* образец сквашивали 4 часа при температуре 38°C , для *L. bulgaricus* образец сквашивали 3,5 часа при температуре 40°C , для *S. thermophilus* образец сквашивали 4 часа при температуре 38°C .

Методы

Исследование выполнено с использованием оборудования Центра коллективного пользования Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности (ЦКП ВНИМИ).

Определение ферментативной активности МКМ осуществляли с использованием тест-системы API ZYM («BioMerieux», Франция), представляющей собой полуколичественный микротест. Благодаря тест-системе определяли одновременно следующие ферменты: щелочная фосфатаза, эстераза (C4), эстераза липаза (C8), липаза (C14), лейцин-ариламидаза, валин-ариламидаза, цистин-ариламидаза, трипсин, α -химотрипсин, кислая фосфатаза, нафтол-AS-BI-фосфогидролаза, α -галактозидаза, β -галактозидаза, β -глюкуронидаза, α -глюкозидаза, β -глюкозидаза, N-ацетил- β -глюкозаминидаза, α -маннозидаза, α -фукозидаза. Для определения ферментативной активности готовили суспензии 5–6 единиц по МакФарланду образца в объеме 2 мл физиологического раствора, далее суспензии вносили по 65 мкл в лунки стрипов. После внесения в стрип образца инкубировали в течение 4 часов при 37°C . По окончании инкубации вносили в каждую лунку по одной капле окрашивающих реактивов, через 5 минут производили учет результатов.

Оценку аминокислотного состава проводили по методике М-04–94–2021 «Определение аминокислот в пищевой продукции» на системе капиллярного электрофореза Капель-205 (ООО «Люмекс-Маркетинг», г. Санкт-Петербург, Россия). Метод основан на разложении проб кислотным гидролизом с переводом аминокислот в свободные формы, получении ФТК-производных, дальнейшем их разделении и количественном определении методом капиллярного электрофореза. Детектирование проводят в УФ-области спектра при длине волны 254 нм.

Содержание глутатиона определялось титриметрическим методом по методическим указаниям Е.В. Бибарцевой¹.

Для оценки антиоксидантной активности (АОА), эквивалентной галловой кислоте, использовали амперометрический метод с применением прибора «ЦветЯуза 01-АА», НПО «Химавтоматика», г. Москва, Россия. (Яшин и др., 2004).

¹ Бибарцева, Е.В. (2018). Лабораторные работы к дисциплине «Биохимические основы инфекционных и неинфекционных патологических процессов»: методические указания. Оренбург: ОГУ.

Т.С. Бычкова, Е.М. Крутина, Ю.А. Дягилева

Анализ результатов

Все эксперименты проводили в трех независимых повторностях. Статистический анализ данных проводили с использованием программы MS Office Excel 2016. Результаты для показателей аминокислот представлены как медиана $\pm$ погрешность метода. Результаты для АОА и содержания глутатиона визуализировано в виде комбинированного графика (Линейный — для АОА, столбчатый — для окисленного и восстановленного глутатиона) значений медианы и стандартного отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование состояло из двух этапов. На первом этапе исследований продемонстрирована ферментативная активность исследуемых штаммов МКМ. На втором этапе проводилось исследование аминокислотного профиля, АОА и содержания глутатиона в опытных образцах кисломолочных продуктов, приготовленных на основе соответствующих штаммов МКМ. Результаты в статье представлены в соответствии с этапами исследования.

Исследование ферментативной активности МКМ

Для установления факторов, влияющих на формирование антиоксидантного потенциала, была проведена оценка ферментативной активности МКМ. Резуль-

таты с указанием перечня ферментов представлены в Таблице 1.

При анализе ферментативной активности отмечено, что у всех рассматриваемых штаммов зафиксирована фосфатазная активность, а также характерна высокая активность фермента β -галактозидазы, кроме *L.b. 200* и *L.b. 52*. Однако α -галактозидазная активность отмечена только у штамма *L.a. K3HII35* и всех штаммов *S. thermophilus* на незначительном уровне.

Относительно липолитических ферментов, по показателю активности эстеразы штаммы *L. acidophilus* не проявили ярко-выраженных результатов, наивысшая активность отмечена у штаммов *L.a. NK1*. Штаммы *L. bulgaricus* не проявили ферментативной активности по эстеразе. Липаза обнаружена только у штаммов *L. acidophilus*, остальные МКМ не активны относительно данного фермента.

Наивысшая активность протеолитических ферментов, таких как лейцин- ариламидаза и цистин-ариламидаза, обеспечивающих направленную ферментацию молочного белка с высвобождением соответствующих аминокислот, отмечена у штаммов *L.a. АЦ* и *L.a. NK1*. Целевой разрыв белковой молекулы по пути повышения концентрации данных аминокислот в пищевой системе может способствовать потенциальному усилению ее антиоксидантных свойств. Активность ферментов у штамма *L.a. 97* немного ниже, чем у *L.a. АЦ* и *L.a. NK1*, но все же на достаточно высоком уровне. Штамм *L.a. K3HII35* про-

Таблица 1

Ферментативная активность штаммов молочнокислых микроорганизмов, у.е.

Table 1

Enzymatic Activity of Lactic Acid Bacteria (LAB) Strains, Arbitrary Units (a.u.)

Фермент	Штамм											
	<i>L.a. АЦ</i>	<i>L.a. A97</i>	<i>L.a. NK1</i>	<i>L.a. K3HII35</i>	<i>L.b. 200</i>	<i>L.b. 52</i>	<i>L.b. B2</i>	<i>L.b. B10</i>	<i>S.t. 11</i>	<i>S.t. 14</i>	<i>S.t. 91</i>	<i>S.t. TCB</i>
Эстераза (C4)	0.40	0.30	0.50	—	—	—	—	—	—	0.30	0.20	0.30
Липаза (C14)	0.20	—	0.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Лейцин-ариламидаза	5.00	4.50	5.00	3.00	1.00	4.00	4.00	4.50	4.50	4.00	3.80	4.00
Валин-ариламидаза	2.00	1.00	1.50	0.80	—	1.00	—	1.00	0.20	0.10	0.40	—
Цистин-ариламидаза	3.50	3.00	3.50	3.00	0.20	2.50	2.50	3.50	0.20	0.10	—	0.40
α -химотрипсин	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Кислая фосфатаза	1.50	1.30	1.50	1.20	1.00	0.50	0.50	1.50	1.20	1.50	1.20	1.50
Нафтол-AS-BI-фосфогидролаза	1.00	0.90	2.00	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10	1.20	2.00
α -галактозидаза	—	—	—	0.10	—	—	—	—	0.10	0.10	0.10	0.10
β -галактозидаза	5.00	4.80	5.00	5.00	3.00	3.00	4.50	5.00	5.00	5.00	5.00	4.80

Т.С. Бычкова, Е.М. Крутина, Ю.А. Дягилева

явил самую слабую активность по протеолитическим ферментам. Из *S. thermophilus*, наилучший результат по лейцин-ариламидазе показал штамм *S.t. 11*, что может указывать на его потенциальную пользу в дальнейшем применении при разработке консорциумов для целевой ферментации молочного белка. Однако по показателям активности валин- и цистин-ариламидаз все штаммы продемонстрировали крайне низкие значения, с чем связано ограничение их вклада в расщеплении белков

Анализируя ферментативную активность по протеазам штаммов *L. bulgaricus*, можно сделать вывод, что штамм *L.b. B10* демонстрирует наибольшую активность по лейцин- и цистин-ариламидазам. Штамм *L.b. B2* близок по активности к штамму *L.b. B10*. Особенностью штамма *L.b. 52* является высокое содержание в системе цистин-ариламидазы, однако по другим показателям он проявляет более слабую активность. Наименее активно по продуцированию протеолитических ферментов из *L. bulgaricus* проявил себя *L.b. 200*.

Исследование аминокислотного профиля опытных образцов, изготовленных с использованием штаммов МКМ

Поскольку в формировании антиоксидантного потенциала существенную роль выполняют аминокислоты, целесообразно предположить, что именно протеолитические ферменты, продуцируемые МКМ, оказывают влияние на аминокислотный профиль ферментированных систем. Для подтверждения данного аспекта была проведена оценка аминокислотного профиля кисломолочных продуктов, приготовленных на основе соответствующих штаммов МКМ. Результаты представлены в Таблице 2.

Исходя из полученных данных, среди *L. acidophilus* штамм *L.a. 97* продуцирует наибольшее количество глутаминовой кислоты, триптофана и тирозина. Образец на штамме *L.a. АЦ* отличался повышенным содержанием лейцина и изолейцина, способствующих более активному росту бактерий в стрессовых условиях, что может

Таблица 2

Аминокислотный состав опытных образцов, изготовленных с использованием штаммов МКМ

Table 2

Amino Acid Composition of Experimental Samples Prepared Using Lactic Acid Bacteria (LAB) Strains

Образец	Аминокислота, мг/100г							
	Глутаминовая кислота + глутамин	Цистин + цистеин	Лейцин + изо-лейцин	Метионин	Валин	Глицин	Триптофан	Тирозин
L.a. 97	631.29 ± 126.26	30.42 ± 7.30	345.68 ± 62.22	97.91 ± 22.52	129.71 ± 23.35	51.34 ± 9.24	43.44 ± 8.69	122.89 ± 28.26
L.a. K3HII35	598.24 ± 119.65	31.38 ± 7.53	348.91 ± 62.80	96.65 ± 22.23	124.92 ± 22.49	44.51 ± 8.01	40.38 ± 8.08	119.75 ± 27.54
L.a.АЦ	595.04 ± 119.01	29.83 ± 7.16	384.11 ± 69.14	97.15 ± 22.34	134.72 ± 24.25	51.36 ± 9.24	25.04 ± 5.01	99.42 ± 22.87
L.a.NK1	565.18 ± 113.04	34.97 ± 8.39	346.46 ± 62.36	113.31 ± 26.06	123.36 ± 22.20	45.44 ± 8.18	43.12 ± 8.62	121.61 ± 27.97
L.b 52	427.00 ± 85.40	13.00 ± 3.12	283.80 ± 51.08	70.30 ± 16.17	93.90 ± 16.90	35.80 ± 6.44	42.00 ± 8.40	97.70 ± 22.47
L.b Lb200	459.40 ± 91.88	35.00 ± 8.40	247.90 ± 44.62	58.60 ± 13.48	90.10 ± 16.22	33.10 ± 5.96	44.90 ± 8.98	99.70 ± 22.93
L.b B2	431.20 ± 86.24	28.00 ± 6.72	267.50 ± 48.15	67.00 ± 15.41	89.20 ± 16.06	35.50 ± 6.39	44.30 ± 8.86	104.00 ± 23.92
L.b B10	374.70 ± 74.94	33.30 ± 7.99	237.40 ± 42.73	57.60 ± 13.25	75.90 ± 13.66	35.30 ± 6.35	42.70 ± 8.54	99.80 ± 22.96
S.t.91	587.50 ± 117.50	30.30 ± 7.27	308.30 ± 55.49	98.70 ± 22.70	97.00 ± 17.46	39.90 ± 7.18	41.20 ± 8.24	118.60 ± 27.28
S.t.11	1124.70 ± 224.94	97.30 ± 23.35	439.10 ± 79.04	129.90 ± 29.88	162.40 ± 29.23	60.60 ± 10.91	44.40 ± 8.88	137.30 ± 31.58
S.t.14	573.40 ± 114.68	29.60 ± 7.10	330.60 ± 59.51	134.20 ± 30.87	109.90 ± 19.78	41.80 ± 7.52	33.70 ± 6.74	114.20 ± 26.27
S.t.TCB	621.20 ± 124.24	51.80 ± 12.43	325.50 ± 58.59	94.80 ± 21.80	112.20 ± 20.20	41.90 ± 7.54	41.00 ± 8.20	115.70 ± 26.61
Погрешность измерений	±20 % (отн.)	±24 % (отн.)	±18 % (отн.)	±23 % (отн.)	±18 % (отн.)	±18 % (отн.)	±20 % (отн.)	±23 % (отн.)

быть связано с повышенной активностью лейцин-ариламидазы. При этом образец на *L.a. АЦ* содержал самый низкий уровень триптофана. Наибольшим количеством цистина характеризовался образец, приготовленный на основе штамма *L.a. NK1*, что подтверждает зависимость аминокислотного профиля от ферментативной активности МКМ, в частности, по цистин-ариламидазе. Также этот образец отличался повышенным содержанием фенилаланина и метионина, напрямую оказывающих влияние на антиоксидантную активность пищевой системы. Образец на штамме *L.a. K3HII3* показал хорошие результаты по взаимно превращающимся друг в друга глутамину и глутаминовой кислоте. Однако по остальным аминокислотам данный образец имел пониженное содержание по сравнению с другими штаммами *L. acidophilus*, что может быть связано со его слабой ферментативной активностью.

Что касается штаммов *L. bulgaricus*, то можно сделать вывод, что образец, приготовленный на основе штамма *L.b. 200* отличается наибольшим содержанием глутаминовой кислоты, цистина и триптофана. Образец на штамме *L.b. B2* имеет повышенный уровень тирозина. Опытный образец на штамме *L.b. 52* характеризовался высоким содержанием разветвленных аминокислот — лейцина, изолейцина и валина. Наименьшие концентрации аминокислот, особенно глутаминовой кислоты, лейцина и изолейцина, отмечены в продукте, ферментированном штаммом *L.b. B10*.

На основании полученных результатов среди *S. thermophilus* наибольшим содержанием ряда аминокислот отличался образец, приготовленный на штамме *S.t. 11*. Образец на основе указанного штамма содержал рекордное количество глутаминовой кислоты, лейцина и изолейцина, высокий уровень цистина, метионина и валина. Образец, приготовленный на основе штамма *S.t. 14* имеет самое низкое содержание триптофана, но высокий уровень метионина. Образцы на штаммах *S.t. 91* и *S.t. TCB* близкие по аминокислотному составу, но в образце с *S.t. TCB* содержится больше цистина и валина.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что наиболее активными в образовании аминокислот показали себя штаммы *L. acidophilus*, показывающие хорошие результаты по суммарному содержанию лейцина и изолейцина, валина и глицина. *L. bulgaricus* продемонстрировал наименьшую способность к высвобождению всех аминокислот, особенно цистина, валина

и глутаминовой кислоты. *S. thermophilus* благодаря высокому содержанию разветвленных аминокислот — лейцину, изолейцину и валину, может быть полезен для интенсивного роста бактерий в молочной системе.

Из представленных аминокислот наибольший интерес представляют метионин и триптофан, как непосредственные антиоксиданты, лейцин, изолейцин и валин, как участвующие в обеспечении роста и развития клеточных структур МКМ, а также глутаминовая кислота, цистин и глицин, как структурные компоненты одного из важнейших антиоксидантов живого организма — глутатиона.

Исследование АОА и содержания глутатиона в опытных образцах, изготовленных с использованием штаммов МКМ

Для подтверждения влияния ферментативной активности, и, как следствие, аминокислотного профиля на антиоксидантный потенциал кисломолочных продуктов была проведена оценка содержания глутатиона в пищевых системах и антиоксидантной активности (Рисунок 1). При этом содержание глутатиона характеризовали соотношением восстановленной и окисленной его форм.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что образцы, ферментированные штаммами *L.a. 97* и *L.a. АЦ* имеют схожий уровень антиоксидантной активности, что вероятно связано со сбалансированными аминокислотными профилями, при этом образец на *L.a. NK1* имеет показатель антиоксидантной активности незначительно выше предыдущих, что может быть связано с большим содержанием аминокислот метионина и цистина, а также общего глутатиона. Существенный уровень цистина обеспечил вероятность его перехода в цистеин и, как следствие, синтез глутатиона. Образец на штамме *L.a. K3HII35* имеет наиболее слабую антиоксидантную активность относительно других образцов *L. acidophilus*, что может быть связано с бедным аминокислотным составом вследствие слабой ферментативной активности микроорганизмов. Таким образом, повышение антиоксидантной активности в образцах со штаммами *L. acidophilus* напрямую коррелирует с содержанием в системах глутатиона как общего, так и восстановленного.

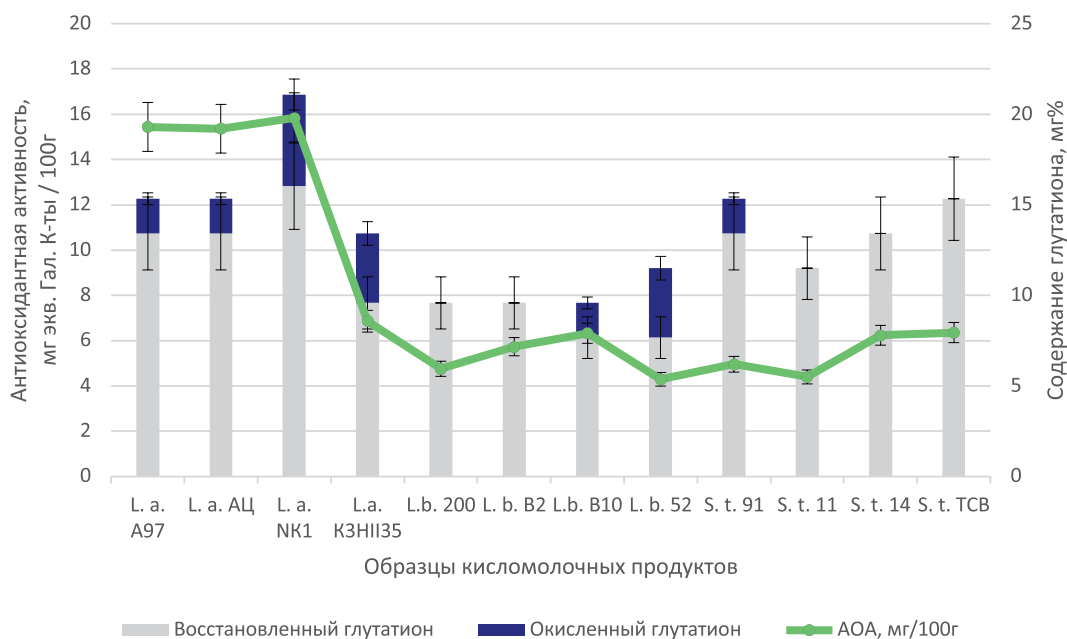
Среди *L. bulgaricus* наилучшие показатели АОА отмечены в образце на штамме *L.b. B10*, образец на *L.b. B2* менее

Рисунок 1

Антиоксидантная активность МКМ, мг/100 г и содержание глутатиона в образцах кисломолочных продуктов, мг %

Figure 1

Antioxidant Activity of LAB (mg/100 g) and Glutathione Content in Fermented Dairy Product Samples (mg %)



активен, но показатель на достаточно высоком уровне среди всех образцов. Образцы на штаммах *L.b. 200* и *L.b. 52* продемонстрировали наименьшую активность в своей группе. При этом максимальным содержанием глутатиона характеризовался образец на штамме *L.b. 52* при одновременно невысоком значении антиоксидантной активности, что связано с соотношением его форм (окисленный и восстановленный).

В целом можно отметить, что штаммы *L. acidophilus* наиболее активно участвуют в формировании антиоксидантного потенциала кисломолочной продукции по сравнению со штаммами *L. bulgaricus*, что объясняется высокой ферментативной активностью в части ариламидаз и глутатионсинтезирующей способностью.

Уровень антиоксидантной активности образцов со штаммами *S. thermophilus* ниже, чем образцов на молочнокислых палочках. При этом большинство штаммов *S. thermophilus* имеют в своем составе только восстановленный глутатион, что может говорить об отсутствии процессов окисления в продукте. А ингибирование процессов окисления может свидетельствовать

о возможном накоплении штаммами *S.t. 11* и *S.t. TCB* цистеина в продукте, а не его переходе в цистин. Более того, несмотря на достаточно низкие уровни глутатиона в образцах кисломолочных продуктов, ферментированных данными микроорганизмами, *S.t. 11*, как было указано выше, значительно повысил содержание глутаминовой кислоты в продукте — структурной единицы глутатиона, что делает штамм *S.t. 11* перспективным для использования в качестве продуцента биологически активных веществ, формирующих антиоксидантный потенциал продукта.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Следует отметить, что для некоторых аминокислот (серосодержащих и ароматических) были зафиксированы относительно высокие погрешности измерений. Это связано с ограниченной чувствительностью метода при низких концентрациях, а также с возможными вариациями в метаболизме отдельных штаммов. Как показывают данные Gilmour et al. (2024), существенная вариабельность может быть обусловлена методологи-

ческими особенностями анализа, включая фракционирование белков и влияние небелкового азота. Кроме того, Ulmer et al. (2022) продемонстрировали, что динамика аминокислотного профиля в моно- и ко- культурах может приводить к неожиданной вариабельности результатов, даже при контролируемых условиях. Несмотря на это, общие тенденции по группам сохранялись, что подтверждает достоверность выявленных зависимостей.

В ходе исследования установлено, что ферментативная активность молочнокислых микроорганизмов (МКМ) напрямую влияет на аминокислотный профиль и антиоксидантный потенциал кисломолочных продуктов. Наибольшая протеолитическая активность (лейцин- и цистин-ариламидазы) отмечена у *L. acidophilus*, что коррелировало с повышенным содержанием соответствующих аминокислот (лейцин, цистин, метионин) и высокой антиоксидантной активностью (АОА). *L. bulgaricus* показал умеренную активность, а *S. thermophilus* продемонстрировал значительное накопление глутаминовой кислоты, но более низкую АОА.

Полученные данные подтверждают гипотезу о том, что ферментативный профиль МКМ определяет антиоксидантные свойства продукта за счет высвобождения специфических аминокислот. Например, высокая активность цистин-ариламидазы у *L.a. NK1* привела к увеличению содержания цистина, что способствовало синтезу глутатиона — ключевого антиоксиданта. Однако не все штаммы с высокой протеазной активностью показали значимую АОА. Это согласуется с данными Loghman et al. (2022) и Zheng et al. (2020), которые показали, что протеолитическая активность способствует проявлению более выраженной антиоксидантной активности, но не всегда линейно — возможны случаи, когда чрезмерный протеолиз разрушает активные пептиды. Как указывают Kim et al. (2022), антиоксидантная активность может зависеть от комплекса внеклеточных метаболитов — пептидов, экзополисахаридов и ферментов, а не только от свободных аминокислот. Данное обоснование может объяснить, почему высокопротеолитические штаммы не всегда показывали высокую АОА. Корреляции между активностью ферментов и АОА могут также отражать баланс между окисленной и восстановленной формами глутатиона (GSSH/GSH) и вклад других биоактивных соединений.

Полученные результаты согласуются с данными Зобковой (2020) и Каночкиной (2023), которые также отмеча-

ли связь между протеолитической активностью МКМ и антиоксидантными свойствами ферментированных продуктов. Их поддерживают исследования Stobiecka et al. (2022), показавшие, что ферментация активирует высвобождение биоактивных пептидов, увеличивающих антиоксидантный потенциал продукта. Однако в отличие от исследований Рожковой (2021), в котором АОА преимущественно связывали с пептидами, наше исследование выявило значимую роль свободных аминокислот, особенно серосодержащих (цистин, метионин).

В своих исследованиях Vasudha (2023) обнаружил высокую β -галактозидазную активность у *S. thermophilus*, но в нашем случае этот фермент не оказал прямого влияния на АОА, что может быть связано с различиями в применяемых штаммах. Наблюдавшаяся значительная вариабельность активности даже внутри одного вида полностью согласуется с данными Lerecka et al. (2025), а также Dan et al. (2023), которые описали различную антиоксидантную активность среди штаммов, и подчеркивает важность индивидуального подбора культур. Кроме того, Колмакова (2014) указывала на важность пептидов в антиоксидантной активности, тогда как наши данные подчеркивают вклад именно свободных аминокислот, что расширяет понимание механизмов формирования функциональных свойств кисломолочных продуктов.

Практическая значимость полученных результатов подтверждается современными исследованиями. Как показывает Loghman et al. (2022), комбинирование штаммов при ферментации может позволить создавать функциональные продукты с направленным действием. Данные Alexandraki et al. (2025) подтверждают, что используемые заквасочные культуры существенно влияют на антиоксидантный статус продукта, что диктует необходимость их тщательного подбора для достижения прогнозируемого функционального эффекта. Более того, использование МКМ как источников натуральных антиоксидантов и биологически активных соединений находит поддержку в работах Wijesekara et al. (2025) и Balthazar et al. (2024), которые продемонстрировали, что ферментированные молочные продукты обладают выраженными антиоксидантными, антидиабетическими и антигипертензивными свойствами.

На вариабельность результатов могли повлиять штаммовые различия, так как даже внутри одного вида (*L. acidophilus*) наблюдалась значительная разница в ферментативной активности, что согласуется с данными

Holzappel (2002) и Poluektova et al. (2021) о высокой внутривидовой гетерогенности МКМ. Условия ферментации — в отличие от Park (2011), использовавшего термофильные условия, наши эксперименты проводились при мезофильном режиме, что могло снизить активность некоторых ферментов. Методология анализа — применение амперометрического метода для оценки АОА, как и в работах Яшина (2004), в отличие от спектрофотометрических подходов, могло дать более точную количественную оценку, но затрудняет прямое сравнение с некоторыми предыдущими исследованиями.

Ограничения исследования

В работе использовались штаммы из коллекции ФГАНУ «ВНИМИ», что не охватывает всего биоразнообразия МКМ. Результаты могут быть неприменимы к другим штаммам, особенно промышленным или природным изолятам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования установлена зависимость аминокислотного профиля кисломолочного продукта от ферментативной активности МКМ, а также подтверждена корреляция антиоксидантного потенциала с содержанием соответствующих аминокислот в пищевой системе. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что повышенное содержание аминокислот может служить основанием для применения соответствующих штаммов при проектировании микробиологических консорциумов с целью направленной ферментации молочного сырья для повышения антиоксидантного потенциала кисломолочной продукции. Таким образом, выявлена необходимость получения данных не только о качественном, но и о количественном содержании ферментов в пищевой системе с использованием раз-

личных штаммов МКМ и их консорциумов, что позволит в дальнейшем прогнозировать антиоксидантный потенциал ферментированной молочной продукции.

В дальнейшем, основываясь на результатах данного исследования, мы будем проводить анализ синергетических эффектов при совместном использовании штаммов, поскольку комбинации микроорганизмов могут давать иной аминокислотный и антиоксидантный профиль по сравнению с монокультурами, а также проводить оптимизацию условий ферментации с целью разработки функциональных кисломолочных продуктов с прогнозируемым антиоксидантным эффектом.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Татьяна Сергеевна Бычкова: концептуализация, формальный анализ, рецензирование и редактирование рукописи

Екатерина Михайловна Крутина: проведение исследования, формальный анализ, визуализация результатов, написание рукописи — редактирование

Юлия Алексеевна Дягилева: проведение исследования, формальный анализ, визуализация результатов, написание черновика рукописи

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatyana S. Bychkova: conceptualization, formal analysis, writing — review & editing.

Ekaterina M. Krutina: investigation, formal analysis, visualization, writing — editing.

Yulia A. Diaghileva: investigation, formal analysis, visualization, writing — original draft preparation

ЛИТЕРАТУРА

- Донская, Г.А. & Креккер, Л.Г. (2022). Влияние окислительно-восстановительных процессов на антиоксидантную активность биомассы симбиотической закваски. *Пищевые системы*, 5(4), 337–343. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-337-343>
- Донская, Г.А., Бычкова, Т.С. & Юрова, Е.А. (2024). Исследование радиопротекторного потенциала муки из масличных культур. *Ползуновский вестник*, (4), 86–92. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.013>
- Зобкова, З.С. (2020). Зависимость относительной биологической ценности кисломолочных напитков от вида заквасочных. *Молочная промышленность*, (8), 36–37. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-08-36-37>

- Каночкина, М.С., Иванова, Л.А., Коновалова, А.Д., & Левин, О.Н. (2023). Особенности подбора заквасочных культур в производстве функциональных кисломолочных продуктов. *Вестник МГТУ*, 26(4), 511–528. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-511-528>
- Колмакова, Т.С., Белик, С.Н., Чистяков, В.А., Моргуль, Е.В. & Чистякова, И.Б. (2014). Характеристика кефира как ценного пробиотического продукта и его биологических свойств. *Медицинский вестник Юга России*, (3), 35–42. <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2014-3-35-42>
- Рожкова, И.В. & Бегунова, А.В. (2021). Пробиотический потенциал *Bifidobacterium adolescentis* MC-42. *Молочная промышленность*, (3), 34–37. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-03-34-36>
- Яшин, А.Я., Яшин, Я.И., Черноусова, Н.И. & Пахомов, В.П. (2004). Экспрессный электрохимический метод анализа антиоксидантной активности пищевых продуктов. *Пиво и напитки*, (6), 32–34.
- Alexandraki, M., Maisoglou, I., Koureas, M., Kossyva, V., Tzereme, A., Meleti, E., Vrontaki, M., Manouras, V., Dimitriou, L., & Malissiova, E. (2025). Physicochemical properties and antioxidant profile of a fermented dairy beverage enriched with coffee by-products. *Beverages*, 11(4), 121. <https://doi.org/10.3390/beverages11040121>
- Ayivi, R. D., & Ibrahim, S. A. (2022) Lactic acid bacteria: An essential probiotic and starter culture for the production of yoghurt. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(11), 7008–7025. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16076>
- Balthazar, C.F., Teixeira, S., Bertolo, M-R.V., Ranadheera, C.S., Raices, R-S.L., Russo, P., Spano, G., Bogusz, S.J., Cruz, A.G., & Anderson S.A. (2024). Functional benefits of probiotic fermented dairy drink elaborated with sheep milk processed by ohmic heating. *Food Bioscience*, 59, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103781>
- Dan, T., Hu, H., Tian, J., & He, B. (2023) Influence of different ratios of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* on fermentation characteristics of yogurt. *Molecules*, 28(5), Article 1213. <https://doi.org/10.3390/molecules28051213>
- de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Junqueira, A. C. D. O., & Karp, S. G. (2020) A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry. *Food Reviews International*, 36(2), 135–167. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630636>
- Feng, T. & Wang J. (2020) Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: A systematic re-v view. *Gut Microbes*, 12(1), <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>
- Gilmour, S.R., Holroyd, S.E., Fuad, M.D., Elgar, D., & Fanning, A.C. (2024). Amino acid composition of dried bovine dairy powders from a range of product streams. *Food*, 13(23), 3901. <https://doi.org/10.3390/foods13233901>
- Gu, Y., Li, Xi., Xiao, R., & Dudu, O. E. (2020) Impact of *Lactobacillus paracasei* IMC502 in coculture with traditional starters on volatile and non-volatile metabolite profiles in yogurt. *Process Biochemistry*, (99), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.07.003>
- Holzappel, W.H. (2002) Appropriate starter culture technologies for small-scale fermentation in developing countries. *International Journal of Food Microbiology*, 75, 197–212. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00707-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00707-3)
- Lepecka, A., Szymański, P., & Okoń, A. (2025). Isolation, identification, and evaluation of the antioxidant properties of lactic acid bacteria strains isolated from meat environment. *PloS One*, 20(7), e0327225. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327225>
- Loghman, S., Moayedi, A., Mahmoudi, M., Khomeiri, M., Gómez-Mascaraque, L.G., & Garavand, F. (2022). Single and co-cultures of proteolytic lactic acid bacteria in the manufacture of fermented milk with high ACE inhibitory and antioxidant activities. *Fermentation*, 8(9), 448. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090448>
- Mataczewska, J., & Kaczorek-Lukowska, E. (2021) Nisin-A lantibiotic with immunomodulatory properties: A review. *Peptides*. (137), Article 170479. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2020.170479>
- Park, J., Hirano, J-I, Thangavel, V., Riebel, B., & Bommarius, A. (2011). NAD(P)H oxidase V from *Lactobacillus plantarum* (NoxV) displays enhanced operational stability even in absence of reducing agents. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, (71), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2011.04.013>
- Poluektova, E., Yunes, R., & Danilenko, V. (2021) The putative antidepressant mechanisms of probiotic bacteria: relevant genes and proteins. *Nutrients*, 13(5), 1591. <https://doi.org/10.3390/nu13051591>
- Stasiewicz, A., & Skrzydlewska, E. (2020). Thioredoxin-dependent system. Application of inhibitors. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, (36), 362–371. <https://doi.org/10.1080/14756366.2020.1867121>

- Stobiecka, M., Król, J., & Brodziak, A. (2022). Antioxidant activity of milk and dairy products. *Animals*, 12(3), 245. <https://doi.org/10.3390/ani12030245>
- Ulmer, A., Erdemann, F., Mueller, S., Loesch, M., Wildt, S., Jensen, M.L., Gaspar, P., Zeidan, A.A., & Takors, R. (2022). Differential amino acid uptake and depletion in mono-cultures and co-cultures of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* in a novel semi-synthetic medium. *Microorganisms*, 10(9), 1771. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091771>
- Vamanu, E. & Gatea, F. (2020) Correlations between microbiota bioactivity and bioavailability of functional compounds: A mini-review. *Biomedicines*, 8(2), Article 39. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8020039>
- Vasudha, M, Prashantkumar, CS, Bellurkar, M, Kaveeshwar, V & Gayathri, D. (2023). Probiotic potential of β -galactosidase-producing lactic acid bacteria from fermented milk and their molecular characterization. *Biomedical Reports*, 18(3), 23. <https://doi.org/10.3892/br.2023.1605>.
- Weimer, A., Kohlstedt, M., Volke, D. C., Nikel, P. I., & Wittmann, C. (2020). Industrial biotechnology of *Pseudomonas putida*: Advances and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(18), 7745–7766. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10811-9>
- Wijesekara, A., Weerasingha, V., Jayarathna, S., Vidanarachchi, J.K., & Priyashantha, H. (2025). Microbial strains in fermented dairy: Unlocking biofunctional properties and health benefits. *International Journal of Food Science*, Article 6672700. <https://doi.org/10.1155/ijfo/6672700>
- Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C.M.A.P., Harris, H.M.B., Mattarelli, P., O'Toole, P.W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., Watanabe, K., Wuyts, S., Felis, G.E., Gänzle, M.G., & Lebeer, S. (2020) 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*. *The International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70(4), 2782–2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>

REFERENCES

- Donskaya, G.A., & Krekker, L.G. (2022). Influence of redox processes on the antioxidant activity of the symbiotic starter biomass. *Food Systems*, 5(4), 337–343. (In Russ.) <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-4-337-343>
- Donskaya, G.A., Bychkova, T.S., & Yurova, E.A. (2024). Investigation of the radioprotective potential of oilseed flour. *Polzunovsky Bulletin*, (4), 86–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.013>
- Zobkova, ZS. (2020). Dependence of the relative biological value of fermented milk drinks on the type of starter microorganisms. *Dairy Industry*, (8), 36–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-08-36-37>
- Kanochkina, M.S., Ivanova, L.A., Konovalova, A. D., & Levin, O.N. (2023). Features of the selection of starter cultures in the production of functional fermented milk products. *Vestnik of MSTU*, 26(4), 511–528. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-511-528>
- Kolmakova, T.S., Belik, S.N., Chistyakov, V.A., Morgul', E.V., & Chistyakova, I.B. (2014). Characteristics of kefir as a valuable probiotic product and its biological properties. *Medical Bulletin of the South of Russia*, (3), 35–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.21886/2219-8075-2014-3-35-42>
- Rozhkova, I.V., & Begunova, A.V. (2021). Probiotic potential of *Bifidobacterium adolescentis* MC-42. *Dairy industry*, (3), 34–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-03-34-36>
- Yashin, A.Ya, Yashin, Ya.I., Chernousova, N.I. , & Pakhomov, V.P. (2004). Express electrochemical method for the analysis of antioxidant activity of food products. *Beer and Beverages*, (6), 32–34. (In Russ.)
- Alexandraki, M., Maisoglou, I., Koureas, M., Kossyva, V., Tzereme, A., Meleti, E., Vrontaki, M., Manouras, V., Dimitriou, L., & Malissiova, E. (2025). Physicochemical properties and antioxidant profile of a fermented dairy beverage enriched with coffee by-products. *Beverages*, 11(4), 121. <https://doi.org/10.3390/beverages11040121>
- Ayivi, R. D., & Ibrahim, S. A. (2022) Lactic acid bacteria: An essential probiotic and starter culture for the production of yoghurt. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(11), 7008–7025. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16076>

- Balthazar, C.F., Teixeira, S., Bertolo, M.-R.V., Ranadheera, C.S., Raices, R.-S.L., Russo, P., Spano, G., Bogusz, S.J., Cruz, A.G., & Anderson S.A. (2024). Functional benefits of probiotic fermented dairy drink elaborated with sheep milk processed by ohmic heating. *Food Bioscience*, 59, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.103781>
- Dan, T., Hu, H., Tian, J., & He, B. (2023) Influence of different ratios of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* on fermentation characteristics of yogurt. *Molecules*, 28(5), Article 2123. <https://doi.org/10.3390/molecules28052123>
- de Melo Pereira, G. V., de Carvalho Neto, D. P., Junqueira, A. C. D. O., & Karp, S. G. (2020) A review of selection criteria for starter culture development in the food fermentation industry. *Food Reviews International*, 36(2), 135–167. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1630636>
- Feng, T. & Wang J. (2020) Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: A systematic re-v view. *Gut Microbes*, 12(1), <https://doi.org/10.1080/19490976.2020.1801944>
- Gilmour, S.R., Holroyd, S.E., Fuad, M.D., Elgar, D., & Fanning, A.C. (2024). Amino acid composition of dried bovine dairy powders from a range of product streams. *Food*, 13(23), 3901. <https://doi.org/10.3390/foods13233901>
- Gu, Y., Li, Xi., Xiao, R., & Dudu, O. E. (2020) Impact of *Lactobacillus paracasei* IMC502 in coculture with traditional starters on volatile and non-volatile metabolite profiles in yogurt. *Process Biochemistry*, (99), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2020.07.003>
- Holzappel, W.H. (2002) Appropriate starter culture technologies for small-scale fermentation in developing countries. *International Journal of Food Microbiology*, 75, 197–212. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(01\)00707-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(01)00707-3)
- Lepecka, A., Szymański, P., & Okoń, A. (2025). Isolation, identification, and evaluation of the antioxidant properties of lactic acid bacteria strains isolated from meat environment. *PloS One*, 20(7), e0327225. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327225>
- Loghman, S., Moayedi, A., Mahmoudi, M., Khomeiri, M., Gómez-Mascaraque, L.G., & Garavand, F. (2022). Single and co-cultures of proteolytic lactic acid bacteria in the manufacture of fermented milk with high ACE inhibitory and antioxidant activities. *Fermentation*, 8(9), 448. <https://doi.org/10.3390/fermentation8090448>
- Mataczewska, J., & Kaczorek-Lukowska, E. (2021) Nisin-A lantibiotic with immunomodulatory properties: A review. *Peptides*. (137), Article 170479. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2020.170479>
- Park, J., Hirano, J-I, Thangavel, V., Riebel, B., & Bommarius, A. (2011). NAD(P)H oxidase V from *Lactobacillus plantarum* (NoxV) displays enhanced operational stability even in absence of reducing agents. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, (71), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2011.04.013>
- Poluektova, E., Yunes, R., & Danilenko, V. (2021) The putative antidepressant mechanisms of probiotic bacteria: relevant genes and proteins. *Nutrients*, 13(5), 1591. <https://doi.org/10.3390/nu13051591>
- Stasiewicz, A., & Skrzydlewska, E. (2020). Thioredoxin-dependent system. Application of inhibitors. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, (36), 362–371. <https://doi.org/10.1080/14756366.2020.1867121>
- Stobiecka, M., Król, J., & Brodziak, A. (2022). Antioxidant activity of milk and dairy products. *Animals*, 12(3), 245. <https://doi.org/10.3390/ani12030245>
- Ulmer, A., Erdemann, F., Mueller, S., Loesch, M., Wildt, S., Jensen, M.L., Gaspar, P., Zeidan, A.A., & Takors, R. (2022). Differential amino acid uptake and depletion in mono-cultures and co-cultures of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* in a novel semi-synthetic medium. *Microorganisms*, 10(9), 1771. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10091771>
- Vamanu, E. & Gatea, F. (2020) Correlations between microbiota bioactivity and bioavailability of functional compounds: A mini-review. *Biomedicines*, 8(2), Article 39. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8020039>
- Vasudha, M, Prashantkumar, CS, Bellurkar, M, Kaveeshwar, V & Gayathri, D. (2023). Probiotic potential of β -galactosidase-producing lactic acid bacteria from fermented milk and their molecular characterization. *Biomedical Reports*, 18(3), 23. <https://doi.org/10.3892/br.2023.1605>
- Weimer, A., Kohlstedt, M., Volke, D. C., Nikel, P. I., & Wittmann, C. (2020). Industrial biotechnology of *Pseudomonas putida*: Advances and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(18), 7745–7766. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10811-9>

- Wijesekara, A., Weerasingha, V., Jayarathna, S., Vidanarachchi, J.K., & Priyashantha, H. (2025). Microbial strains in fermented dairy: Unlocking biofunctional properties and health benefits. *International Journal of Food Science*, Article 6672700. <https://doi.org/10.1155/ijfo/6672700>
- Zheng, J., Wittouck, S., Salvetti, E., Franz, C.M.A.P., Harris, H.M.B., Mattarelli, P., O'Toole, P.W., Pot, B., Vandamme, P., Walter, J., Watanabe, K., Wuyts, S., Felis, G.E., Gänzle, M.G., & Lebeer S. (2020) 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*. *The International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 70(4), 2782–2858. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.004107>

ОБ АВТОРАХ

Бычкова Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией технологий функциональных продуктов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, д.35, корп. 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9539-1600>, Scopus ID: 57219092812, Researcher ID: ABI-1733–2020, SPIN-код: 5699–5975, e-mail: t_bychkova@vnimi.org

Крутина Екатерина Михайловна, младший научный сотрудник лаборатории технологий функциональных продуктов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, д.35, корп. 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9066-2078>, SPIN-код: 4999–8179, e-mail: e_krutina@vnimi.org

Дягилева Юлия Алексеевна, инженер лаборатории технологий функциональных продуктов Федерального государственного автономного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности» (115093, Российская Федерация, г. Москва, ул. Люсиновская, д.35, корп. 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8255-7702>, SPIN-код: 4518–3206, e-mail: yu_diaghileva@vnimi.org

ABOUT THE AUTHORS

Bychkova Tatyana Sergeevna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Functional Products Technologies, All- Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Str., 35, blok 7), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9539-1600>, Scopus ID: 57219092812, Researcher ID: ABI-1733–2020, SPIN-code: 5699–5975, e-mail: t_bychkova@vnimi.org.

Krutina Ekaterina Mikhailovna, Junior research assistant Laboratory of Functional Products Technologies, All- Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Str., 35, blok 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9066-2078>, SPIN-code: 4999–8179, e-mail: e_krutina@vnimi.org.

Dyagileva Yuliya Alekseevna, engineer Laboratory of Functional Products Technologies, All- Russian Dairy Research Institute (115093, Russian Federation, Moscow, Lyusinovskaya Str., 35, blok 7), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9066-2078>, SPIN-code: 4999–8179, e-mail: yu_diaghileva@vnimi.org.