



УДК 577.637.1

<https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-4-53>

ЗАВИСИМОСТЬ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОМОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ОТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЛОЧНОКИСЛЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Источник изображения: pxels.com

Татьяна Сергеевна Бычкова, канд. технич. наук, доцент, заведующий лабораторией
E-mail: t_bychkova@vniimi.org

Юлия Алексеевна Дягилева, инженер

Екатерина Михайловна Крутина, младший научный сотрудник

Евгения Юрьевна Агаркова, д-р техн. наук, старший научный сотрудник

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, г. Москва

Антиоксиданты являются важной составляющей для поддержания иммунной системы организма, так как проявляют защитные свойства против веществ, образующихся в процессах окисления, вызванных свободными радикалами вследствие действия активных форм кислорода. Организм человека имеет нативную систему защиты организма от окислительного стресса, а также антиоксиданты могут поступать в организм извне, например вместе с пищей. Наиболее богата антиоксидантами прямого действия растительная пища, также достаточно высоким антиоксидантным потенциалом обладают кисломолочные продукты. Процесс ферментации молока под действием молочнокислых микроорганизмов сопровождается синтезом ряда биологически активных веществ, некоторые из которых характеризуются антиоксидантными свойствами. Большую группу подобных веществ представляют витамины, особенно группы В. Хотя они не являются антиоксидантами прямого действия, эти витамины оказывают большое влияние на работу нативной системы антиоксидантной защиты организма, что обуславливает важность их поступления в организм вместе с пищей в достаточном количестве. Большое значение для регуляции и стабильной работы нативной системы антиоксидантной защиты от окислительного стресса играют аминокислоты, которые являются основой для последующего синтеза глутатиона. В статье представлен обзор научно-технической литературы, посвященной биологической активности различных видов и штаммов молочнокислых микроорганизмов, оказывающей влияние на формирование антиоксидантного потенциала продукта посредством повышения содержания витаминов и аминокислот в пищевой системе. На основе изученных данных произведена сравнительная оценка способности *Lactobacillus acidophilus* и *Streptococcus thermophilus* к повышению содержания витаминов и аминокислот, которые могут положительно влиять на антиоксидантный потенциал кисломолочных продуктов *in situ*.

Ключевые слова: молоко, молочнокислые микроорганизмы, кисломолочные продукты, витамины, аминокислоты, антиоксидантная активность

Для цитирования: Зависимость антиоксидантной активности кисломолочных продуктов от показателей биологической активности молочнокислых микроорганизмов / Т. С. Бычкова, Ю. А. Дягилева, Е. М. Крутина, Е. Ю. Агаркова // Молочная промышленность. 2025. № 4. С. 22–31. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-4-53>

ВВЕДЕНИЕ

Молочные продукты являются неотъемлемой частью здорового и сбалансированного рациона питания. Они обладают пищевой и биологической ценностью, имеют богатый химический состав, пробиотические свойства и др. Все молочные продукты характеризуются высоким содержанием кальция, особенно творог и сыр, причем в сыре кальций и фосфор содержатся в оптимальном для усвоения организмом количестве, а кисломолочные продукты характеризуются достаточно низким содержанием лактозы. Таким образом, каждый потребитель может найти подходящие под индивидуальные запросы молочные продукты. Научные исследования последних лет подтверждают высокий уровень совместимости молочного и растительного сырья, обеспечивая тем самым обогащение готовых продуктов витаминами и антиоксидантами природного происхождения. При этом молоко и как самостоятельное сырье содержит в своем составе большое количество витаминов и аминокислот, некоторые из которых обладают антиоксидантными свойствами. Молочнокислые микроорганизмы также способны проявлять биологическую активность к синтезу антиоксидантных метаболитов [1–6].

Антиоксиданты – это вещества, способствующие устранению или предотвращению действия свободных радикалов на организм. Клетки, подверженные действию окислительного стресса, вызванного действием свободных радикалов, теряют способность к нормальной жизнедеятельности или полностью разрушаются, что приводит к развитию таких заболеваний, как болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона, рассеянный склероз и др. Организм человека имеет собственную систему антиоксидантной защиты, представленную глутатионом и глутатион-зависимыми ферментами, без которых невозможна работа его защитных функций. Однако системы глутатиона может быть недостаточно для борьбы со свободными радикалами, поэтому необходимо дополнительно получать антиоксиданты извне. Природными источниками антиоксидантов чаще всего является растительное сырье, богатое флавоноидами, полифенолами, витаминами и т. д.

Витамины – низкомолекулярные, биологически активные химические вещества, различные по своему строению и составу. В организме человека они играют важную роль, регулируя биохимические процессы жизнедеятельности, рост, развитие,

выработку гормонов и др. Жирорастворимые витамины – А, D, E, К – имеют свойство накапливаться в организме, поэтому чрезмерное их употребление ведет к нарушениям физиологических процессов. Водорастворимые витамины, напротив, не задерживаются в организме, а потому требуют постоянного восполнения. В организме человека вырабатывается всего несколько витаминов, и лишь в незначительном количестве, что обуславливает обязательный характер их поступления вместе с пищей [8].

Известно, что некоторые молочнокислые микроорганизмы обладают способностью в процессе своей жизнедеятельности синтезировать *in situ* витамины, которые переходят в продукт. Молочнокислые микроорганизмы способны синтезировать широкий спектр витаминов, включая витамины группы В и витамин К [9].

При этом разные штаммы демонстрируют различную витаминсинтезирующую активность, что открывает возможности для разработки комбинированных заквасок для создания ферментированных продуктов с заданным витаминным профилем.

Наиболее существенное влияние на проявление антиоксидантных свойств биотехнологической системы способны оказывать витамины группы В (В₁, В₂, В₆, В₉, В₁₂) – водорастворимые витамины, каждый из которых выполняет взаимосвязанные функции в организме: от преобразования пищи в энергию до поддержания здоровья нервной системы.

Тиамин, или витамин В₁, – водорастворимый серо-содержащий витамин, который играет важную роль в энергетическом обмене. Некоторые тиамин-зависимые ферменты участвуют в энергетическом метаболизме и биосинтезе нуклеиновых кислот, в то время как другие являются частью антиоксидантной системы, что заслуживает особого внимания. До 90 % общего количества тиамина в организме остается в дифосфатной, метаболически активной форме, которая является кофактором для тиамин-зависимых ферментов, участвующих, в частности, в генерировании молекул никотинамидадениндинуклеотидфосфата (НАДФ), необходимых для работы глутатионпероксидазы и глутатионредуктазы – ферментов для поддержания работы системы глутатиона. Дефицит тиамина может приводить к накоплению продуктов неполного окисления, таких как пировиноградная кислота и впоследствии лактат, что нарушает энергетический обмен и способствует усилению окислительного стресса [10].



Источник изображения: rexeib.com

Рибофлавин, или витамин В₂, который является важным компонентом глутатионредуктазы, служит предшественником коферментов флавиномононуклеотида (ФМН) и флавинадениндинуклеотида (ФАД). Дефицит рибофлавина может приводить к снижению активности глутатионредуктазы, что влечет за собой уменьшение уровня восстановленного глутатиона, повышая восприимчивость клеток к окислительному повреждению.

Ниацин, или витамин В₃, существует в двух основных формах: никотиновая кислота и никотинамид. Обе формы являются предшественниками коферментов никотинамидадениндинуклеотида (НАД) и (НАДФ), участвующих в окислительно-восстановительных реакциях [11]. Некоторые исследования показали, что никотинамид может проявлять прямые антиоксидантные свойства. Причем в отношении окисления белков он проявлял более выраженные ингибирующие свойства, чем в отношении перекисного окисления липидов [12].

Витамин В₆ представляет собой шесть взаимопревращаемых метаболитов: пиридоксин, пиридоксамин, пиридоксаль и их соответствующие фосфаты. Пиридоксальфосфат (PLP) характеризуется высокой реакционной способностью, которая обуславливает значительную скорость гашения активных форм кислорода, сопостави-

мую с действием витаминов С и Е [13]. PLP – зависимые ферменты, катализируют большинство реакций превращения гомоцистеина в цистеин, синтезируя около 50 % всего цистеина человека и далее белков глутатионпероксидазы (ГПХ) [14].

Фолиевая кислота – витамин В₉, или фолат, функционирует как кофермент при синтезе нуклеиновых кислот, участвует в синтезе ДНК и РНК и метаболизме аминокислот. Фолиевая кислота вместе с витамином В₁₂ в качестве кофакторов играют важную роль в синтезе цистеина из гомоцистеина. При повышенном уровне гомоцистеина растет риск развития сердечно-сосудистых заболеваний и инсульта, поэтому важно поддерживать его оптимальное содержание в организме [15].

Витамин В₁₂, или кобаламин (КБ), – это группа водорастворимых кобальтсодержащих биологически активных соединений, участвующих в синтезе ДНК, образовании красных кровяных телец и функционировании нервной системы. Он также играет важную роль в метаболизме гомоцистеина, подобно витаминам В₆ и В₉. Установлено, что отсутствие или дефицит КБ в рационе пропорционально снижает антиоксидантный потенциал клеток организма [16].

Помимо витаминов, которые играют важную роль в поддержании работы нативной антиоксидантной защиты, представленной системой глутатиона, ключевым фактором в ее функционировании являются аминокислоты. Глутатион – это трипептид, который образуется под действием глутатионсинтетазы из глутаминовой кислоты, цистеина и глицина. Для постоянного функционирования системы антиоксидантной защиты необходимо наличие этих аминокислот в организме. Помимо этого, некоторые аминокислоты, например гистидин, цистеин или лизин, обладают антиоксидантными свойствами. Это обусловлено в большей степени наличием у них различных функциональных групп [17]. Особенно большое значение в формировании антиоксидантного потенциала аминокислот играют нуклеофильные серосодержащие и ароматические группы. По данным исследований А. А. Савиной и др. [18], способность триптофана к проявлению антиоксидантных свойств в несколько раз превышает таковую у тирозина и фенилаланина. Также высокая антиоксидантная способность выявлена у метионина, что, вероятно, связано с наличием у него серосодержащей группы, которая и подвергается

окислению. Наиболее важными в проявлении прямых антиоксидантных свойств являются такие аминокислоты, как цистеин, метионин, триптофан и тирозин.

Триптофан – незаменимая ароматическая α-аминокислота, которая необходима для синтеза белка и является предшественником таких важных соединений, как серотонин, мелатонин, триптамин, ниацин, хинолиновая и кинуреновая кислоты, никотинамидадениндинуклеотид. Помимо исследования антиоксидантного потенциала самого триптофана, было проведено изучение этих свойств у его производных. Было установлено, что антиоксидантные свойства способны проявлять 5-гидрокситриптофан и серотонин, что, вероятно, обусловлено способностью восстанавливать радикалы за счет реакции переноса электронов с неподеленных атомов азота аминогрупп [19].

Тирозин – монофенольная аминокислота, образующаяся при гидроксировании фенилаланина. Исследователями установлена ее способность ингибировать перекисное окисление, а также поглощать радикалы DPPH и ABTS, супероксид-анионных радикалов, восстанавливать и хелатировать ионы железа, что может говорить о достоверности проявления антиоксидантных свойств [20].

Метионин – серосодержащая незаменимая аминокислота. Метионин является одним из наиболее легко окисляемых остатков в белках и может подвергаться действию активных форм кислорода в биологических системах. Согласно исследованиям S. Luo и R. L. Levine, метиониновые остатки на поверхности белков могут действовать как поглотители активных форм кислорода и, следовательно, функционировать как антиоксиданты. При этом окисление отдельных метиониновых остатков до метионинсульфоксида (MetO) не всегда влияет на белковую активность. В исследовании глутаминсинтетазы было показано, что 8 из 16 остатков метионина в белке поглощают перекись водорода, в результате чего окисляются до MetO. Примечательно, что эти 8 остатков находятся на поверхности или в растворе, в то время как остальные относительно скрыты. При этом каталитическая активность глутаматсинтетазы сохранилась. Окисленные остатки метионина были расположены вдоль углубления, образующего вход в центр активного участка фермента. Способность остатков метионина поглощать активные формы кислорода в сочетании с их случайным расположением указывает на то, что их функция заключается в защите важных остатков в активном участке от окислительной модификации [21].

Цистеин – серосодержащая аминокислота, которая может образовываться из гомоцистеина, а метионин поставляет атом серы для его синтеза [22]. Помимо того, что цистеин является одним из ключевых молекул для синтеза глутатиона, он также способен самостоятельно проявлять антиоксидантные свойства.

Протеолиз у молочнокислых бактерий можно разделить на несколько этапов, включая деградацию белков, транспорт пептидов, деградацию пептидов и катаболизм аминокислот. Первый этап – расщепление белков до олигопептидов, далее – перенос дипептидов, трипептидов и олигопептидов в клетки. Пептиды расщепляются в клетках до аминокислот с помощью различных пептидаз, которые молочнокислые микроорганизмы используют в качестве источника азота. За счет расщепления белков в продукте может значительно повышаться количество свободных аминокислот. Кроме этого, молочнокислые микроорганизмы в процессе своей жизнедеятельности также производят белки и аминокислоты. Так, в работе Л. Э. Глаголевой и др. было установлено, что в процессе ферментации молока *Bifidobacterium bifidum*, *Bifidobacterium longum*, *Bifidobacterium adolescentis*, *Bifidobacterium bifidum* Y-4 или *Lactobacillus casei rhamnosus* наблюдалось увеличение количества белка: на 1,0 % для бифидобактерий и на 0,2 % для лактобактерий, что говорит о специфичности синтеза белков различными видами микроорганизмов [23].



Подбор применяемых молочнокислых микроорганизмов для ферментации молочного сырья должен быть обоснован как их технологическими свойствами, так и способностью продуцировать биологически активные вещества, участвующие в формировании антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов.

Цель данной работы – изучить перспективность использования различных штаммов *Lactobacillus acidophilus* и *Streptococcus thermophilus* в формировании антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выступали кисломолочные продукты, изготовленные с применением моновидовых заквасок *Lactobacillus acidophilus* (штаммы: *L. a.* A97, *L. a.* H9, *L. a.* АЦ, *L. a.* NK1) и *Streptococcus thermophilus* (штаммы: *S. t.* 91, *S. t.* 11, *S. t.* 14, *S. t.* ТСВ), взятых из коллекции штаммов микроорганизмов ФГАНУ «ВНИМИ».

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

Содержание витаминов группы В определяли в соответствии с ГОСТ 31483-2012 «Премиксы. Определение содержания витаминов: В₁ (тиаминхлорида), В₂ (рибофлавина), В₃ (пантотеновой кислоты), В₅ (никотиновой кислоты и никотинамида), В₆ (пиридоксина), В₉ (фолиевой кислоты), С (аскорбиновой кислоты) методом капиллярного электрофореза».

Содержание аминокислот определяли методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-205». Оценка аминокислотного состава про-



Источник изображения: pexels.com

водилась на основе методики М-4-94-2021 «Определение аминокислот в пищевой продукции». Для каждой аминокислоты методика измерений позволяет определять общее содержание в пробах (суммарно свободные, в том числе добавленные, и связанные формы) в пересчете на соответствующую кислоту.

Для оценки антиоксидантной активности, эквивалентной галловой кислоте, использовали амперометрический метод с применением прибора «ЦветЯуза 01-АА».

Исследования проводились в трехкратной повторности и обрабатывались на основе методов математической статистики с использованием Microsoft Excel.

Таблица 1. Сравнительный анализ витаминсинтезирующей активности молочнокислых микроорганизмов согласно литературным источникам

Витамин	<i>Lactobacillus acidophilus</i>	<i>Streptococcus thermophilus</i>	Источник
Тиамин (В ₁)	–	+	M. d. M. Teran [31]
Рибофлавин (В ₂)	+	+ / –	V. Guru, K. Viswanathan [24]
Ниацин (В ₃)	+	+ / –	E. T. Adesemoye et al. [26]
Пантотеновая кислота (В ₅)	+ / –	–	N. Yu. Khromova [29]
Пиридоксин (В ₆)	–	+ / –	C. P. Champagne [30]
Фолиевая кислота (В ₉)	–	+	A. Patel [27]
Кобаламин (В ₁₂)	+ / –	–	C. P. Champagne [30]
К	+	–	B. Walther, M. Chollet [28]

Примечание: (+) способны к синтезу; (–) не способны к синтезу; (+ / –) способность зависит от штамма и условий



Источник изображения: rezelex.com

они являются ауксотрофами [26]. В таблице 1 представлено сравнение способности *L. acidophilus* и *S. thermophilus* к синтезу тех или иных витаминов.

Проанализировав таблицу 1, можно сделать вывод, что рассматриваемые культуры могут активно продуцировать витамины при индивидуальном применении, и их совместное использование в различных комбинациях позволит создавать функциональные продукты питания, обладающие высоким антиоксидантным потенциалом, особенно за счет содержания в ферментированных продуктах витаминов группы В. Для установления потенциально перспективных штаммов, наиболее значимо формирующих антиоксидантный потенциал, были изготовлены образцы кисломолочных продуктов с применением штаммов из коллекции ВНИМИ. Опытные образцы изготавливали внесением закваски в количестве 5 % от массы продукта и термостатировали при температуре 38 °С в течение 4 ч, до достижения продуктом титруемой кислотности 80 °Т. Перед проведением исследований образцы кисломолочных продуктов хранились при температуре 4 ± 2 °С не более 24 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Витаминосинтезирующая способность напрямую зависит от применяемых культур в закваске. Оценка отобранных штаммов базировалась на их способности синтезировать витамины группы В как факторе формирования антиоксидантного потенциала.

L. acidophilus выделяется своей способностью синтезировать рибофлавин (B_2), что делает его особенно ценным для обогащения продуктов этим витамином [24]. Некоторые штаммы также способны синтезировать тиамин (B_1), никотиновую (B_3) и пантотеновую (B_5) кислоты, кобаламин (B_{12}), хотя для него требуется наличие кобальта в среде [25].

S. thermophilus вносит вклад в синтез фолиевой кислоты и тиамина, а некоторые штаммы способны синтезировать активную форму пиридоксина и ниацина, в то время как по отношению к витаминам B_2 и B_5

В рамках научного исследования было проведено изучение количественного содержания витаминов группы В в составе полученных кисломолочных продуктов. Маркерами выступали витамины B_1 , B_2 и B_6 , как имеющие наибольшее значение в формировании антиоксидантного потенциала, и синтез которых не требует выполнения дополнительных условий (например, наличия кобальта в среде). Результаты представлены в таблице 2.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что штаммы *L. acidophilus* обладают более выраженной способностью к синтезу витаминов B_1 и B_2 в сравнении с *S. thermophilus*. Более того, можно заметить более высокое содержание витамина B_2 в образцах, ферментированных штаммами *L. a.* A97 и *L. a.* АЦ, что делает их наиболее перспективными для использования в качестве продуцентов витаминных метаболитов для повышения антиоксидантного

Таблица 2. Зависимость содержания витаминов в образцах кисломолочного продукта от применяемого штамма микроорганизмов

Витамин, мкг/100г	Наименование культуры / штамма							
	<i>Lactobacillus acidophilus</i>				<i>Streptococcus thermophilus</i>			
	<i>L. a.</i> A97	<i>L. a.</i> H9	<i>L. a.</i> АЦ	<i>L. a.</i> NK1	<i>S. t.</i> 91	<i>S. t.</i> 11	<i>S. t.</i> 14	<i>S. t.</i> TCB
B_1	4,010	3,914	4,008	3,008	3,218	3,014	3,673	3,519
B_2	30,405	0,114	38,476	15,562	0,184	0,079	0,128	0,099
B_6	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

потенциала молочной продукции. Ни один из рассматриваемых штаммов не показал значительной способности к синтезу в отношении витамина В₆.

Как уже было сказано ранее, на формирование антиоксидантного статуса продукта влияют не только витамины, но и аминокислоты. Для подтверждения данного аспекта было проведено определение качественного и количественного аминокислотного состава полученных кисломолочных продуктов. В качестве контроля выступало молоко пастеризованное. Результаты представлены в таблице 3.

Исходя из полученных данных, можно заметить, что в большинстве образцов содержание аминокислот либо уменьшилось, либо осталось неизменным. Предположительно, это обусловлено метаболизмом молочнокислых микроорганизмов, которые обладают способностью преобразовывать аминокислоты в биогенные амины и другие азотсодержащие соединения. Особое внимание заслуживает глицин, содержание которого значительно увеличилось у всех образцов, что является положительным фактором

формирования антиоксидантного потенциала кисломолочных продуктов, т. к. данная аминокислота является одной из ключевых составляющих глутатиона.

Среди *L. acidophilus* штаммы имеют количественно схожие результаты в оценке содержания аминокислот. Штамм *L. a. 97* позволил получить большее количество по сравнению с другими образцами триптофана, глутаминовой кислоты, тирозина, штамм *L. a. АЦ* – глицина, а штамм *L. a. Н9* – метионина.

Из штаммов *S. thermophilus* особенно выделяется *S. t. 11*, т. к. он пре восходит по содержанию аминокислот все остальные образцы. В частности, в образце с *S. t. 11* выделяется глутаминовая кислота, содержание которой не только не уменьшилось, но и значительно (в 2 раза) увеличилось по сравнению с контролем. Помимо глутаминовой кислоты, содержание цистина у данного образца увеличилось в 3 раза, а содержание глицина является самым высоким из представленных и в 6 раз превышает контроль. Этот факт позволяет предположить, что использование данного штамма позволит создавать

Таблица 3. Аминокислотный состав кисломолочных продуктов

Аминокислота, мг/100г	Молоко пасте- ризованное (контроль)	Наименование культуры / штамма								Погрешность (относительная)
		Lactobacillus acidophilus				Streptococcus thermophilus				
		L. a. A97	L. a. H9	L. a. АЦ	L. a. NK1	S. t. 91	S. t. 11	S. t. 14	S. t. TCB	
Триптофан	49,00	43,44	42,98	25,04	43,12	41,20	44,40	33,70	41,00	± 20 %
Глутаминовая кислота + + глутамин	680,00	631,29	602,47	595,04	565,18	587,50	1124,70	573,40	621,20	± 20 %
Аспарагино- вая кислота + + аспарагин	166,00	237,06	218,84	221,86	211,49	241,20	435,70	256,10	266,30	± 20 %
Цистин	32,00	30,42	31,33	29,83	34,97	30,30	97,30	29,60	51,80	± 24 %
Аргинин	129,00	63,36	42,65	35,31	41,20	56,90	89,80	36,60	69,30	± 23 %
Лизин	277,00	173,17	164,29	172,91	173,23	148,90	219,80	148,50	152,20	± 18 %
Тирозин	179,00	122,89	122,65	99,42	121,61	118,60	137,30	114,20	115,70	± 23 %
Фенилаланин	172,00	109,67	112,28	116,26	120,73	105,70	146,40	99,60	111,00	± 23 %
Гистидин	95,00	75,67	84,38	81,60	73,77	77,80	91,20	87,30	87,80	± 23 %
Лейцин + + изолейцин	578,00	345,68	351,82	384,11	346,46	308,30	439,10	330,60	325,50	± 18 %
Метионин	88,00	97,91	117,85	97,15	113,31	98,70	129,90	134,20	94,80	± 23 %
Валин	245,00	129,71	125,92	134,72	123,36	97,00	162,40	109,90	112,20	± 18 %
Пролин	250,00	246,33	247,93	263,53	247,00	237,70	327,50	232,70	232,30	± 18 %
Треонин	164,00	111,26	120,73	111,93	99,29	105,20	131,30	96,50	101,80	± 18 %
Серин	160,00	125,94	115,86	148,64	116,12	106,00	161,00	107,00	109,50	± 18 %
Аланин	75,00	89,78	81,52	95,46	83,27	73,20	118,60	72,60	71,00	± 18 %
Глицин	11,00	51,34	41,43	51,36	45,44	39,90	60,60	41,80	41,90	± 18 %

продукты с высоким антиоксидантным потенциалом, так как он обладает повышенным содержанием всех аминокислот, необходимых для синтеза глутатиона.

Содержание цистина оказалось практически неизменным для большинства штаммов, за исключением *S. t. 11* и *S. t. TCB*, которые способствовали увеличению данного показателя в 3 и 1,6 раз соответственно. Цистин является продуктом окисления двух молекул цистеина. Повышение содержания цистина, предположительно, может свидетельствовать о накоплении цистеина в продукте, который в последствии был окислен. Однако в то же время это может говорить о наличии сильных окислителей в продуктах жизнедеятельности данных штаммов, из-за которых цистеин переходит в цистин.

Примечательно, что содержание метионина увеличилось во всех образцах продукта с разными штаммами. Наибольшую активность в его образовании, однако, показали *S. t. 11* и *S. t. 14*, которые увеличили содержание данной аминокислоты более чем на 40 %.

Повышение уровня определенных аминокислот, предположительно, может быть связано со специфической ферментативной активностью штаммов микроорганизмов, которая обуславливает превращения азотосодержащих соединений в продукте. Одним из изучаемых показателей было содержание глутатиона в продукте (рис. 1).

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что большинство штаммов *S. thermophilus* имеют в своем составе только восстановленный глутатион, что может говорить об отсутствии процессов окисления в продукте. Следовательно, можно говорить о накоплении штаммами *S. t. 11* и *S. t. TCB* цистеина в продукте, а не его переходе в цистин.

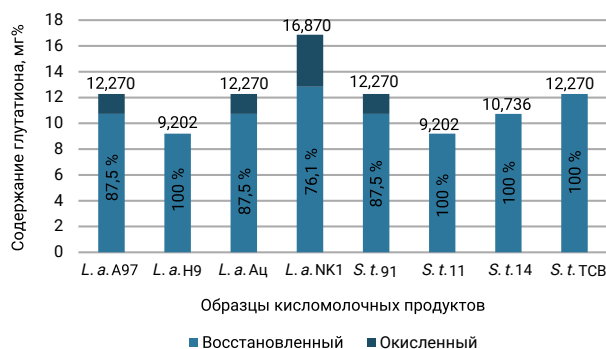


Рисунок 1. Содержание глутатиона в образцах кисломолочных продуктов, приготовленных на разных штаммах *L. acidophilus* и *S. thermophilus*

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. В дальнейшем, при попадании ее вместе с продуктом в организм человека возможно повышение уровня глутатиона, так как для его синтеза необходима глутаминовая кислота, что делает штамм *S. t. 11* перспективным для использования в качестве продуцента биологически активных веществ, формирующих антиоксидантный потенциал продукта.

Для подтверждения влияния витаминов, аминокислот и глутатиона на антиоксидантный потенциал кисломолочных продуктов была изучена их антиоксидантная активность (рис. 2).

Из полученных данных видно, что штаммы *L. acidophilus* обладают большей антиоксидантной активностью, чем *S. thermophilus*. Предположительно, это обусловлено более высоким содержанием витаминов, обладающих прямым антиоксидантным действием, т. к. более низкое содержание аминокислот не оказало значительного влияния на результат. Можно отметить, что образцы кисломолочных продуктов, ферментированные штаммами *L. a. A97*, и *L. a. Aц*, имеют схожий уровень антиоксидантной активности, что, вероятно, связано с более высоким содержанием витамина B2 в системе. При этом образец кисломолочного продукта *L. a. NK1* имеет аналогичную антиоксидантную активность, хотя содержание витамина B2 в нем в 2 раза меньше. Вероятно, это может быть обусловлено более высоким содержанием глутатиона, в том числе и восстановленного, что может вносить значительный вклад в формирование общего антиоксидантного потенциала продукта. Хотя представленные штаммы *S. thermophilus* и не обладают выра-

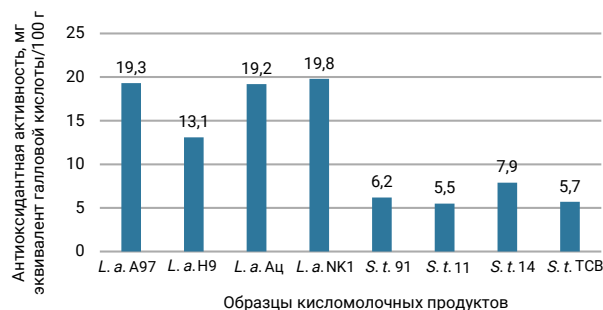


Рисунок 2. Оценка антиоксидантной активности продуктов, приготовленных на разных штаммах *L. acidophilus* и *S. thermophilus*



Источник изображения: rexeis.com

женной антиоксидантной активностью, *S. t.* 14 показал более значимые результаты по данному показателю, обладая при этом самым высоким содержанием метионина, что, возможно, могло внести свой вклад в формирование антиоксидантного статуса данного продукта за счет наличия серосодержащего остатка.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты, полученные при комплексной оценке влияния таких метаболитов, как витамины группы В и аминокислоты, на формирование антиоксидантного потенциала кисломолочного продукта как *in situ*, так и *in vivo*, целесообразным является комбинирование различных видов и штаммов микроорганизмов, обладающих специфичностью к синтезу тех или иных метаболитов. Так, *L. acidophilus*, в частности штаммы *L. a.* АЦ и *L. a.* А97, выступили активными продуцентами витаминов В₁ и В₂, а также проявляют повышенную антиоксидантную активность, тогда как, например, штамм *S. t.* 11 позволил получить самое большое количество серосодержащих аминокислот в продукте, а также высокий уровень глутаминовой кислоты, что может оказывать положительное влияние на антиоксидантную защиту *in vivo* при употреблении кисломолочного продукта, содержащего эти штаммы. Совместное использование штаммов, проявляющих разностороннюю биологическую активность, может оказать комплексное воздействие против свободных радикалов и активных форм кислорода, что станет объектом исследований в дальнейшем. ■

Поступила в редакцию: 12.02.2025
Принята в печать: 16.06.2025

EFFECT OF BIOLOGICAL ACTIVITY OF LACTIC ACID MICROORGANISMS ON ANTIOXIDANT PROFILE OF FERMENTED DAIRY PRODUCTS

Tatyana S. Bychkova, Yuliya A. Diaghileva, Ekaterina M. Krutina, Evgeniya Yu. Agarkova

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow

ORIGINAL ARTICLE

Antioxidants support human immune system by providing protection against oxidation products caused by free radicals and reactive oxygen species. The human body has a native system of protection against oxidative stress; however, antioxidants may also be acquired with food. Plant foods are rich in direct-acting antioxidants; fermented dairy products also possess a rather high antioxidant potential. Lactic fermentation synthesizes biologically active substances, some of which are known for their antioxidant properties, e.g., group B vitamins. Although they are not direct-acting antioxidants, these vitamins improve the native antioxidant defense system, which means they are to be present in human diet in sufficient quantities. Amino acids provide the synthesis of glutathione, thus maintaining the native defense system and its action against oxidative stress. This review covered scientific and technical publications on the biological activity of various species and strains of lactic acid microorganisms able to improve the antioxidant potential of dairy products, fortifying them with vitamins and amino acids. The authors also compared *Lactobacillus acidophilus* and *Streptococcus thermophilus* as means of improving the antioxidant potential of fermented dairy products *in situ* by increasing the content of vitamins and amino acids.

Keywords: milk, lactic acid microorganisms, fermented dairy products, vitamins, amino acids, antioxidant activity

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рожкова, И. В.** Кефир - пробиотик / И. В. Рожкова // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. Т. 1, № 1(1). С. 451–456. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-451-456>; <https://www.elibrary.ru/vryyrs>
2. **Донская, Г. А.** Антиоксидантные свойства молока и молочных продуктов: обзор / Г. А. Донская // Пищевая промышленность. 2020. № 12. С. 86–91. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2020-10150>; <https://www.elibrary.ru/xncfer>
3. **Зобкова, З. С.** Кисломолочные продукты как составляющая функционального питания / З. С. Зобкова [и др.] // Молочная промышленность. 2019. № 2. С. 44–46. <https://www.elibrary.ru/yygbnj>
4. **Бегунова, А. В.** Антимикробные свойства *Lactobacillus* в кисломолочных продуктах / А. В. Бегунова [и др.] // Молочная промышленность. 2020. № 6. С. 22–23. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-06-22-23>; <https://www.elibrary.ru/ctaqtq>
5. **Леонова, В. А.** Потенциальные пробиотические свойства и профили органических кислот метаболитного комплекса *L. helveticus* / В. А. Леонова // Пищевая промышленность. 2024. № 1. С. 78–82. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.1.1.015>; <https://www.elibrary.ru/oytntt>
6. **Рожкова, И. В.** Бифидогенные и антиоксидантные свойства постбиотиков пробиотических культур / И. В. Рожкова, А. В. Бегунова, В. А. Леонова // Молочная промышленность. 2022. № 12. С. 20–21. <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-12-20-21>; <https://www.elibrary.ru/rhqqcd>
7. **Halliwell, B.** Role of Free Radicals in the Neurodegenerative Diseases. / B. Halliwell // Drugs & Aging. 2012. Vol. 18(9). P. 685–716. <https://doi.org/10.2165/00002512-200118090-00004>
8. **Косачева, К. А.** Модель физиологической системы биосинтеза витаминов и витаминоподобных веществ в организме здорового человека / К. А. Косачева // Международный студенческий научный вестник. 2017. № 3. С. 78. <https://www.elibrary.ru/ytqaff>
9. **Dhir, S.** Neurological, Psychiatric, and Biochemical Aspects of Thiamine Deficiency in Children and Adults. / S. Dhir [et al.] // Front. Psychiatry. 2019. Vol. 10. P. 207. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2019.00207>
10. **Lonsdale, D.** A review of the biochemistry, metabolism and clinical benefits of thiamin(e) and its derivatives / D. Lonsdale // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2006. Vol. 3(1). P. 49–59. <https://doi.org/10.1093/ecam/nek009>
11. **Kamat, J. P.** Nicotinamide (vitamin B₃) as an effective antioxidant against oxidative damage in rat brain mitochondria. / J. P. Kamat, T. P. Devasagayam // Redox Rep. 1999. Vol. 4(4). P. 179–184. <https://doi.org/10.1179/135100099101534882>
12. **Bisello, G.** Oxygen reactivity with pyridoxal 5'-phosphate enzymes: biochemical implications and functional relevance / G. Bisello [et al.] // Amino Acids. 2020. Vol. 52(8). P. 1089–1105. <https://doi.org/10.1007/s00726-020-02885-6>
13. **Загубная, О. А.** Молекулярные механизмы, лежащие в основе терапевтического действия витамина B₆ / О. А. Загубная, Я. Р. Нарциссов // Фармация и фармакология. 2022. Т. 10, № 6. С. 500–514. <https://doi.org/10.19163/2307-9266-2022-10-6-500-514>; <https://www.elibrary.ru/yyplud>
14. **Cui, R.** Serum total homocysteine concentrations and risk of mortality from stroke and coronary heart disease in Japanese: The JACC study / R. Cui [et al.] // Atherosclerosis. 2008. Vol. 198(2). P. 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2007.09.029>
15. **Пристром, А. М.** Роль фолатов в сердечно - сосудистой профилактике: современное состояние проблемы / А. М. Пристром // Международные обзоры: клиническая практика и здоровье. 2020. № 1. С. 62–77. <https://www.elibrary.ru/waccdq>
16. **Бышевский, А. Ш.** Витамин B12 и гемостаз / А. Ш. Бышевский [и др.] // Фундаментальные исследования. 2013. № 2-1. С. 221–226. <https://www.elibrary.ru/puukaj>
17. **Nayak, B. N.** Evaluation of the antioxidant properties of tryptophan and its metabolites in in vitro assay / B. N. Nayak, H. S. Buttar // Journal of Complementary and Integrative Medicine. 2016. Vol. 13(2). P. 129–136. <https://doi.org/10.1515/jcim-2015-0051>
18. **Савина, А. А.** Амперометрическое детектирование антиоксидантной активности модельных и биологических жидкостей / А. А. Савина [др.] // Вестник Московского университета. 2020. Т. 61, № 6. С. 429–437. <https://www.elibrary.ru/gyqhre>
19. **Свердлов, Р. Л.** Взаимодействие триптофана и его производных с кислород- и азотцентрированными радикалами / Р. Л. Свердлов [и др.] // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49, № 2. С. 89. <https://doi.org/10.7868/S0023119315020126>; <https://www.elibrary.ru/ujhsrx>
20. **Gülçin, İ.** Comparison of in vitro antioxidant and antiradical activities of L-tyrosine and L-Dopa / İ. Gülçin // Amino Acids. 2007. Vol. 32(3). P. 431–438. <https://doi.org/10.1007/s00726-006-0379-x>
21. **Luo, S.** Methionine in proteins defends against oxidative stress / S. Luo, R. L. Levine // FASEB Journal. 2009. Vol. 23(2). P. 464–472. <https://doi.org/10.1096/fj.08-118414>
22. **Щербатых, А. А.** Исследование антигиперлипидных и антиоксидантных свойств цистеина, глутатиона и метионина методами спектрофотометрии и высокоэффективной жидкостной хроматографии / А. А. Щербатых, М. С. Черновьян // Журнал аналитической химии. 2021. Т. 76, № 4. С. 313–323. <https://doi.org/10.31857/S0044450221040125>; <https://elibrary.ru/glvvgf>
23. **Глаголева, Л. Э.** Исследование аминокислотной активности лакто- и бифидобактерий в процессе ферментации / Л. Э. Глаголева [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 4(70). С. 160–165. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-160-165>; <https://www.elibrary.ru/xwesmz>
24. **Guru, V.** Riboflavin production in milk whey using probiotic bacteria – *Lactobacillus acidophilus* and *Lactococcus lactis* / V. Guru, K. Viswanathan // Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences. 2013. Vol. 3(4). P. 169–176.
25. **LeBlanc, J. G.** B-Group vitamin production by lactic acid bacteria - current knowledge and potential applications / J. G. LeBlanc [et al.] // Journal of Applied Microbiology. 2011. Vol. 111(6). P. 1297–1309. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05157.x>
26. **Adesemoye, E. T.** Lactic Acid Bacteria Diversity in Fermented Foods as Potential Bio-Resources Contributing to Alleviate Malnutrition in Developing Countries: Nigeria as a Case Study / E. T. Adesemoye [et al.] // Fermentation. 2025. Vol. 11(2). 103. <https://doi.org/10.3390/fermentation11020103>
27. **Patel, A.** Biosynthesis of vitamins and enzymes in fermented foods by lactic acid bacteria and related genera – A promising approach / A. Patel, N. Shah, J. B. Prajapati // Croatian journal of food science and technology. 2013. Vol. 5(2). P. 85–91.
28. **Walther, B.** Menaquinones, Bacteria, and Foods: Vitamin K2 in the Diet / B. Walther, M. Chollet // Vitamin K2 - Vital for Health and Wellbeing. Ed. by J. O. Gordeladze. – IntechOpen, 2017. <https://doi.org/10.5772/61430>
29. **Khromova, N. Yu.** The Combination of In Vitro Assessment of Stress Tolerance Ability, Autoaggregation, and Vitamin B-Producing Ability for New Probiotic Strain Introduction / N. Yu. Khromova [et al.] // Microorganisms. 2022. Vol. 10(2). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020470>
30. **Champagne, C. P.** Effect of fermentation by pure and mixed cultures of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus helveticus* on isoflavone and B-vitamin content of a fermented soy beverage. / C. P. Champagne [et al.] // Food Microbiology. 2010. Vol. 27(7). P. 968–972. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.06.003>
31. **Teran, M. d. M.** Thiamine-producing lactic acid bacteria and their potential use in the prevention of neurodegenerative diseases / M. d. M. Teran [et al.] // Applied Microbiology and Biotechnology. 2021. Vol. 105(5). P. 2097–2107. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11148-7>