



Обзорная статья
4.3.3. – Пищевые системы (технические науки)
УДК664

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.006

EDN: GMVVTB

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ АРАХИДОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ПРОБИОТИЧЕСКИХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ САХАРНОГО ДИАБЕТА ВТОРОГО ТИПА

Людмила Александровна Забодалова ¹, Виктория Сергеевна Ильина ²

^{1, 2} Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия

¹ lzabodalova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2324-8311>

² victoria.ilina@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6909-6819>

Аннотация. Проблема сахарного диабета становится все более актуальной в последние годы со значительным ростом числа людей, подверженных данному заболеванию. Ввиду отсутствия эффективных методов лечения данного заболевания особое внимание уделяется профилактике сахарного диабета 2 типа (СД2) с использованием функциональных пищевых продуктов. Среди функциональных ингредиентов, обладающих эффективностью при профилактике и облегчении симптомов СД2, арахидоновая кислота (АК) и пробиотические микроорганизмы отличаются высоким потенциалом, при этом сравнительно немного исследований посвящено изучению их противодиабетических эффектов.

Введение АК в рацион способствует улучшению инсулиновой чувствительности и снижению уровня провоспалительных маркеров. АК, содержащаяся в продуктах животного происхождения и синтезируемая из линолевой кислоты, показала эффективность в исследованиях, где её использование нормализовало метаболические параметры у лабораторных животных. Применение пробиотиков способствует регулированию микробиоты кишечника и, как следствие, снижению воспаления за счет активной выработки метаболитов и регулированию гормональной функции, что также играет ключевую роль в профилактике СД2.

Анализ литературных данных показал потенциальную эффективность данных ингредиентов в отношении профилактики и терапии СД. Тем не менее, несмотря на существующие доказательства эффективности этих компонентов, дальнейшие исследования необходимы для экспериментального подтверждения перспективности их совместного использования в составе новых функциональных продуктов и ингредиентов. Это позволит не только улучшить профилактику метаболических заболеваний, таких как СД2, но и повысить качество жизни в различных группах населения.

Ключевые слова: арахидоновая кислота, пробиотические штаммы микроорганизмов, сахарный диабет 2 типа, функциональные пищевые продукты.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-16-00243 «Разработка биоактивного функционального пищевого ингредиента на основе арахидоновой кислоты и пробиотических штаммов лактобактерий для профилактики сахарного диабета второго типа».

Для цитирования: Забодалова Л. А., Ильина В. С. Потенциал применения арахидоновой кислоты и пробиотических штаммов микроорганизмов в составе функциональных пищевых продуктов для профилактики сахарного диабета второго типа // Ползуновский вестник. 2026. № 1, С. 39–48. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.006. EDN: <https://elibrary.ru/GMVVTB>.

Original article

POTENTIAL USE OF ARACHIDONIC ACID AND PROBIOTIC STRAINS MICROORGANISMS IN FUNCTIONAL FOOD PRODUCTS FOR PREVENTION TYPE 2 DIABETES MELLITUS

Lyudmila A. Zabodalova ¹, Victoria S. Ilina ²

^{1, 2} ITMOUniversity, Saint-Petersburg, Russia

¹ lzabodalova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2324-8311>

² victoria.ilina@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6909-6819>

Abstract. The problem of diabetes mellitus has become increasingly important in recent years with a significant increase in the number of people affected by this disease. Due to the lack of effective treatments for this disease, special attention is being paid to the prevention of type 2 diabetes mellitus (T2DM) using functional foods. Among functional ingredients with efficacy in preventing and alleviating symptoms of T2DM, arachidonic acid (AA) and probiotic microorganisms have high potential, with relatively few studies investigating their anti-diabetic effects.

© Забодалова Л. А., Ильина В. С., 2026

The introduction of AA into the diet improves insulin sensitivity and reduces pro-inflammatory markers. AA contained in animal products and synthesized from linoleic acid has shown efficacy in studies where its use normalized metabolic parameters in laboratory animals. The use of probiotics helps to regulate the gut microbiota and, therefore, to reduce inflammation through the active production of metabolites and to regulate hormonal function, which also plays a key role in the prevention of T2DM.

Analyses of the literature have shown the potential efficacy of these ingredients with respect to the prevention and therapy of DM. However, despite the existing evidence of the efficacy of these ingredients, further research is needed to experimentally validate the prospect of their combined use in new functional foods and ingredients. This will not only improve the prevention of metabolic diseases such as T2DM but also improve the quality of life in different population groups.

Keywords: arachidonic acid, probiotic strains of microorganisms, type 2 diabetes mellitus, functional foods

Acknowledgments: *The work was supported by the Russian Science Foundation grant 23-16-00243 "Development of a bioactive functional food ingredient based on arachidonic acid and probiotic strains of lactobacilli for the prevention of type 2 diabetes mellitus".*

For citation: Zabodalova L.A. & Ilina V.S. (2025). Potential use of arachidonic acid and probiotic strains microorganisms in functional food products for prevention type 2 diabetes mellitus. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 39-38. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.006. EDN: <https://elibrary.ru/GMVVTB>.

ВВЕДЕНИЕ

Сахарный диабет (СД) – это патология, связанная с рядом метаболических нарушений в организме, которая занимает далеко не последнее место среди «болезней цивилизации». СД определяется как группа метаболических заболеваний, характеризующихся хронической гипергликемией, которая является результатом нарушения секреции инсулина, действия инсулина или комбинации этих факторов. Хроническая гипергликемия при СД сопровождается повреждением и дисфункцией и различных органов, особенно глаз, почек, нервной системы, сердца и кровеносных сосудов [1].

Численность больных СД в мире за последние 10 лет увеличилась более, чем в 2 раза, и к концу 2021 года превысила 537 млн человек. Согласно прогнозам Международной диабетической федерации, к 2030 году число людей, страдающих СД, достигнет 643 млн человек, а к 2045 году – 783 млн человек. В Российской Федерации также отмечается значительный рост распространенности СД. По данным Федерального регистра СД, в РФ на начало 2023 г. состояло на диспансерном учете 4 962 762 человека (3,42 % населения), из которых 92,3 % (4 581 990 млн) приходилось на больных сахарным диабетом второго типа (СД2). Однако эти данные учитывают только выявленные и зарегистрированные случаи заболевания, то есть реальная цифра значительно больше – по результатам масштабного российского эпидемиологического исследования (NATION) 54 % случаев СД2 не было диагностировано [1].

Ввиду того, что методов лечения СД2 на данный момент в мире нет, существует потребность в профилактике этого заболевания у разных слоев населения посредством изменения качества питания. На данный момент исследований, направленных на нутритивную профилактику СД2, недостаточно, а диетотерапия, в основном, заключается в снижении содержания добавленных сахаров в продуктах питания и/или замещения их подсластителями и сахарозаменителями, такими как ксилит, сорбит, эритрит, стевиозид, цикламат и другие [2].

Повысить биологическую ценность рациона можно за счет внесения биологически активных в отношении профилактики СД2 компонентов в состав функциональных пищевых продуктов. В последние 15 лет во многих странах наблюдается устойчивый рост интереса к данной сфере [3]. В качестве возможных функциональных ингредиентов рассматриваются различные биоактивные компоненты – от по-

лифенолов до полиненасыщенных жирных кислот [4]. На данный момент имеется достаточное количество данных об омега-3 жирных кислотах, однако мало внимания уделено потенциалу омега-6 жирных кислот, в частности биоактивной арахидоновой кислоте. Кроме того, имеются подтвержденные данные о потенциале использования пробиотиков в основе антидиабетического функционального ингредиента.

В данной обзорной статье приведены данные о возможности использования арахидоновой кислоты и пробиотических штаммов микроорганизмов для профилактики сахарного диабета 2 типа.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для поиска зарубежных научных источников по выбранной теме исследования проводился поиск информации, по ключевым словам, в библиографических базах данных «Google Scholar», «Scopus» и «Web of Science», для поиска отечественных источников – в «Google Scholar» и электронной библиотеке «Elibrary.ru». Приоритет отдавали часто цитируемым публикациям в высокорейтинговых журналах. Временные рамки выхода научных публикаций по теме исследования были определены периодом с 2014 по 2024 гг. При отсутствии новых публикаций по отдельным разделам исследуемой темы и для лучшего понимания фундаментальных исследований данной области были использованы более ранние научные и обзорные статьи.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Состояние проблемы возникновения сахарного диабета

В отличие от сахарного диабета первого типа (СД1), для которого характерна недостаточная выработка инсулина в организме, при СД2 гормона вырабатывается достаточно, однако наблюдается невосприимчивость к нему клеток – инсулинорезистентность, что приводит к повышению уровня глюкозы в крови (хронической гипергликемии). Помимо этого, в этиологии метаболических нарушений, таких как СД2, ведущую роль играет развитие системного воспаления [5]. При ожирении повышается концентрация липополисахаридов (ЛПС) – компонентов клеточной стенки всех грамотрицательных бактерий, которые являются эндотоксинами и одними из самых мощных индукторов воспаления [6]. При этом у людей с ожирением количество циркулирующих ЛПС увеличивается на 20 %, а у больных СД – на 125 % [7].

Прямая связь между высокожировой диетой,

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ АРАХИДОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ПРОБИОТИЧЕСКИХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ САХАРНОГО ДИАБЕТА ВТОРОГО ТИПА

ведущей к ожирению, и повышением содержания ЛПС в плазме крови подтверждена в экспериментах на мышах, различных моделях СД2 и при обследовании людей, страдающих ожирением и СД2 [8]. В организме человека ЛПС стимулирует выработку провоспалительных цитокинов: ряда интерлейкинов (ИК) – ИК-1, ИК-6, и фактора некроза опухоли- α (ФНО- α) [9]. Эти изменения приводят к развитию хронического системного воспаления и, как следствие, снижению чувствительности к инсулину, усилению липогенеза в печени, активации воспаления в жировой ткани [10]. Однако не все жиры и жирные кислоты оказывают одинаковое физиологическое воздействие на организм человека. Известен ряд полиненасыщенных кислот, обладающих биологической активностью в отношении ряда неинфекционных заболеваний, в том числе СД2 [11]. В последние годы особый интерес вызывает арахидоновая кислота.

2. Арахидоновая кислота и ее профилактический потенциал в отношении СД

Арахидоновая кислота (АК) – это омега-6 полиненасыщенная жирная кислота (ПНЖК), встречающаяся в основном в форме фосфолипидов в цитозоле клеток, прилегающих к мембране эндоплазматического ретикулума, содержащей белки, необходимые для синтеза фосфолипидов и их распределения по различным биологическим мембранам. Когда клетка находится в состоянии стресса, АК может высвобождаться из фосфолипидов под действием ферментов [12].

В организм человека АК поступает преимущественно из пищевых продуктов животного происхождения, таких как птица, органы и мясо животных, сало, рыба, морепродукты и яйца. АК содержится в большинстве продуктов животного происхождения, однако содержание АК умеренное, <200 мг на 100 г этих продуктов, что показывает широкое распространение, но невысокое содержание АК в основных продуктах животного происхождения (мясо, птица, яйца, рыба и молочные продукты). Стандартным потреблением АК является 100–250 мг/сут в развитых странах, в то время как в развивающихся странах с недостаточным потреблением продуктов животного происхождения потребление может не превышать 100 мг/сут [13].

АК участвует в цикле Лэндса, цикле рециклирования/деацелирования мембранных фосфолипидов, который служит для поддержания концентрации свободной АК в клетках на очень низком уровне. Поскольку АК является основополагающим компонентом структуры клетки, она особенно необходима в период развития и роста, а также при серьезных или обширных повреждениях и травмах клеток. Так, наблюдается высокое ее содержание в женском грудном молоке – средние уровни АК в человеческом грудном молоке, измеренные на различных стадиях лактации от 26 до 40 недель, составляют от 0,21 до 0,71 % [14].

Другим источником АК, важным для вегетарианцев, является омега-6 линолевая кислота. Линолевая кислота является незаменимой жирной кислотой для животных, поскольку они не могут синтезировать ее, в отличие от растений, которые могут синтезировать ее из олеиновой кислоты. Линолевая кислота в изобилии содержится во многих орехах, жирных семенах и их производных растительных маслах. В цитозоле животных клеток она преобразуется в АК, докозатетраеновую кислоту (22:4 ω -6) и другие жирные кислоты путем поэтапной десатурации и удлинения цепи. Однако конверсия линолевой кислоты в АК низкая. Линолевая кислота легко окисляется дельта-6-десатуразой до γ -

линоленовой кислоты (18:3 ω -6), но несколько факторов, таких как старение, несбалансированное питание, курение, ухудшают активность фермента.

Снижение концентрации АК в сыворотке является предшественником инсулинорезистентности, и, по данным клинических исследований, концентрация АК в сыворотке пациентов с СД2 значительно снижена. Исследования *in vitro* показали, что АК может способствовать утилизации глюкозы мышечными клетками и поглощению глюкозы адипоцитами. Так, в работе [15] описывают исследования *in vitro*, показывающие, что АК может улучшить способность β -клеток поджелудочной железы секретировать инсулин. В исследовании [16] отмечено, что у мужчин содержание в сыворотке крови АК отрицательно коррелирует с риском возникновения СД. Кроме того, у новорожденных детей, которых кормили грудью более трех месяцев, была зарегистрирована более низкая заболеваемость СД1, так как грудное молоко человека богато различными ПНЖК, особенно АК [17].

При СД определенные концентрации АК действуют как сильный индуктор секреции инсулина, но вклад ее метаболитов в инсулинорезистентность зависит от вовлеченных клеток и тканей [18]. АК может преобразовываться в лейкотриены и липоксины [19], таким образом широко участвуя в различных физиологических и патологических процессах.

Чтобы использовать АК в чистом виде в качестве потенциального противодиабетического средства, ее необходимо производить в больших количествах. АК является нестабильным соединением из-за наличия в ее структуре четырех двойных связей из-за чего она более подвержена перекисному окислению. Следовательно, необходимо исследовать другие источники АК, такие как масла, содержащие ее в значительных количествах. Одним из примеров является масло ARASCO – богатый источник (~ 40 %) АК, полученных из культуры почвенного гриба *Mortierella alpina*. В одном исследовании сообщалось о влиянии добавления этого масла крысам с индуцированным диабетом [20]. Диабет, вызванный диетой с высоким содержанием жиров и токсическим стрептозотоцином (СТЗ), вызвал окислительный стресс, увеличил уровни ИК-6 и ФНО- α в плазме и усилил экспрессию транскрипционного фактора NF- κ B, что привело к слабовыраженному системному воспалению в дополнение к гипергликемии и гиперинсулинемии. Все эти отклонения вернулись к почти нормальным значениям у животных, которым в рацион вводили масло ARASCO. Примечательно, что животные, получавшие масло ARASCO, показали повышение уровня липоксина A4 в плазме, что предполагает значительное противовоспалительное действие АК, которое может лежать в основе его терапевтического действия при СД [21].

Несмотря на то, что АК присутствует в рационе человека, ее может быть недостаточно для нужд организма, поскольку большая ее часть может быть разрушена или деградирована. Во время хранения продуктов питания и пищевого сырья, приготовления пищи и других процессов более 90 % АК может быть инактивировано. В связи с этим ткани организма зависят от эндогенного образования АК из ее предшественника линоленовой кислоты (ЛК). Здесь следует отметить, что существуют два вида – линоленовая и α -линоленовая кислота. Как ЛК, так и α -ЛК широко распространены в нашем рационе, и, следовательно, их дефицит маловероятен. Несмотря на то, что ЛК и α -ЛК необходимы для жизнедеятельности, некоторые их

действия обусловлены их длинноцепочечными метаболитами, такими как гамма-линоленовая кислота (ГЛК), дигомо-ГЛК, АК (полученные из линоленовой кислоты), эйкозапентаеновая кислота (ЭПК) и докозагексаеновая кислота (ДГК) (полученные из α -ЛК) [22].

Липооксигеназа ALOX15 в организме человека широко представлена в эозинофилах, макрофагах, бронхиальных эпителиальных клетках и коже и может преобразовывать ЛК, АК и другие ПНЖК в активные липидные метаболиты, тем самым влияя на структуру клеток, метаболизм и передачу сигнала. Липоксины, один из продуктов окисления липооксигеназой ALOX15 ряда незаменимых ПНЖК, оказывают значительное противовоспалительное действие. Текущие исследования показали, что при дефиците АК снижается образованию липоксина A4, что в итоге приводит к дисфункции β -клеток поджелудочной железы и возникновению СД [23]. В моделях СД2, вызванных СТЗ, пероральный прием АК может ингибировать выработку ИК-6 и ФНО- α , а ингибирование выработки липоксина A4, вызванное СТЗ, возвращается к норме, тем самым полностью предотвращая гипергликемию и улучшая чувствительность к инсулину [23]. Достаточное количество АК может способствовать образованию липоксина A4, который является мощным противовоспалительным соединением и может противодействовать провоспалительному эффекту лейкотриенов [24]. При СД2 АК возвращает плазменные уровни ИК-6 и ФНО- α к нормальным значениям, что может быть ответственно за возвращение чувствительности к инсулину к норме [23]. Следует отметить, что другие ненасыщенные жирные кислоты: ГЛК, ЭПК и ДГК также продемонстрировали цитопротекторное действие *in vitro* против β -цитотоксичности поджелудочной железы при СД1 и СД2, вызванных аллоксаном и СТЗ у экспериментальных животных, хотя их эффекты намного слабее, чем у АК.

Исследования АК в последние годы были сосредоточены на биологических аспектах, однако мало внимания уделялось потреблению с пищей и клиническим эффектам самой АК у взрослых людей, хотя знания о важности потребления АК в области детского питания достаточно обширны [25, 26, 27]. Исследования доказывают эффективность введения АК в качестве препарата в области когнитивного внимания и памяти, расстройств настроения, кровообращения и цирроза, однако необходимы дальнейшие исследования для понимания эффективности потребления АК с точки зрения питания.

3. Пробиотические штаммы микроорганизмов и их профилактический потенциал в отношении СД

В настоящее время считается, что микробиота кишечника играет важную роль в патобиологии СД. Предполагается, что увеличение заболеваемости СД в последние десятилетия может быть связано с изменениями в микробном составе ЖКТ человека. Некоторые из диетических компонентов, таких как сахар, жир или клетчатка, влияют и определяют, какие виды микробов преобладают в кишечнике. Микробиота кишечника играет решающую роль в регуляции выработки гормона серотонина, поскольку она может усиливать биосинтез серотонина из энтерохромаффинных клеток толстой кишки, которые транспортируют серотонин в слизистую оболочку. И ацетат, и бутират, короткоцепочечные жирные кислоты, вырабатываемые кишечной микробиотой, определяют выработку серотонина в кишечнике и, таким образом, регулируют пролиферацию и функционирование β -клеток поджелудочной железы [22].

В метагеномном исследовании жителей Китая с СД2 было подтверждено 60 000 маркеров, связанных с СД2, и все они коррелировали с дисбиозом кишечника, снижением количества бактерий, продуцирующих бутират, и увеличением окислительного стресса [28]. Таким образом, дисбактериоз в кишечнике может являться фактором риска развития СД2.

По определению Всемирной организации здравоохранения, пробиотики – это «живые микроорганизмы, которые, будучи примененными в адекватных количествах, улучшают здоровье организма-хозяина». Согласно ГОСТ 52349-2005, пробиотик – это функциональный пищевой ингредиент в виде полезных для человека непатогенных и нетоксикогенных живых микроорганизмов, обеспечивающий при систематическом употреблении в пищу в виде препаратов или в составе пищевых продуктов благоприятное воздействие на организм человека в результате нормализации состава и (или) повышения биологической активности нормальной микрофлоры кишечника.

Молочнокислые, пропионовокислые бактерии, термофильный стрептококк и некоторые штаммы дрожжей обладают широким спектром полезного действия на организм человека. В частности, они способны нормализовать и стабилизировать состав микробиоты кишечника, угнетать рост патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, вырабатывать антимикробные соединения (короткоцепочечные жирные кислоты, бактериоцины, перекись водорода, окись азота и др.), а также низкомолекулярные питательные вещества, антиоксиданты, факторы роста, ферменты и прочие биологически активные соединения, которые влияют на обмен веществ в организме и участвуют в функционировании различных его органов и систем. Пробиотики характеризуются также антиаллергическим, антидиабетическим и противовоспалительным действием [29, 30, 31].

Представленные в работе [32] сравнительные исследования влияния четырех штаммов бифидобактерий (*B. bifidum* L66-5, L75-4, M13-4 и FS31-12), полученных из кишечника здорового человека, на ожирение у крыс, вызванное диетой с высоким содержанием жира, показали, что все штаммы способны снижать уровень триглицеридов в сыворотке и печени и значительно уменьшать отложение липидов в печени. У всех исследованных штаммов была выявлена тенденция к снижению общего холестерина в сыворотке и печени, которая более выражена у *B. L66-5* и *B. FS31-12*. Значительных различий в изменении содержания сывороточного инсулина и глюкозы между исследуемыми штаммами не установлено.

Микробиота кишечника находится в тесных отношениях с макроорганизмом хозяина и, функционируя через продуцирование большого количества низкомолекулярных соединений, способна специфически реагировать на его сигналы и стабилизировать состояние его здоровья, либо в случае дисбиоза индуцировать те или иные функциональные нарушения [33].

В.М. Бондаренко и О.В. Рыбальченко, анализируя профилактическое и лечебное действие пробиотических препаратов с позиций новых научных технологий, отмечают, что пробиотическая концепция является на сегодняшний день ведущей при назначении бактериальных препаратов. При этом наибольшую эффективность в клинической практике демонстрируют лекарственные препараты и биологически активные добавки к пище на основе комбинаций нескольких видов или штаммов пробиотических микроорганизмов.

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ АРАХИДОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ПРОБИОТИЧЕСКИХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ САХАРНОГО ДИАБЕТА ВТОРОГО ТИПА

мов, обладающих широким спектром антагонистической активности в отношении условно патогенных бактерий и грибов [34].

Целесообразность применения многовидовых или многштаммовых пробиотических препаратов при лечении метаболических заболеваний и, в частности, СД2, подтверждается рядом клинических исследований. При монотерапии многштаммовой пробиотической добавкой Ecologic®Barrier, содержащей $2,5 \times 10^9$ КОЕ/г микроорганизмов (штаммы: *Bifidobacterium bifidum* W23, *Bifidobacterium lactis* W52, *Lactobacillus acidophilus* W37, *Lactobacillus brevis* W63, *Lactobacillus casei* W56, *Lactobacillus salivarius* W24, *Lactococcus lactis* W19 и *Lactococcus lactis* W58), дважды в день в течение 6 месяцев у больных СД2 наблюдалось значительное снижение инсулинорезистентности (64,2 %) и улучшение кардиометаболических параметров (глюкоза, инсулин, с-пептид, показатели липидного профиля и воспалительные маркеры) [35]. В другом исследовании [36] доказано, что потребление многштаммовой пробиотической добавки Ecologic®Barrier в течение 12 недель благоприятно изменило метаболизм глюкозы, липидный профиль, висцеральный жир, уровень мочевой кислоты в сыворотке и концентрацию ЛПС у страдающих ожирением женщин в постменопаузе.

В работе [37] исследовалось влияние многштаммовой пробиотической добавки на метаболические профили, С-реактивный белок и окислительный стресс у пациентов с СД. Пятьдесят четыре пациента в возрасте 35–70 лет с СД получали в течение 8 недель добавку, состоящую из 7 лиофилизированных штаммов: *Lactobacillus acidophilus* (2×10^9 КОЕ), *Lactobacillus casei* (7×10^9 КОЕ), *Lactobacillus rhamnosus* ($1,5 \times 10^9$ КОЕ), *Lactobacillus bulgaricus* (2×10^8 КОЕ), *Bifidobacterium breve* (2×10^{10} КОЕ), *Bifidobacterium longum* (7×10^9 КОЕ), *Streptococcus thermophilus* ($1,5 \times 10^9$ КОЕ) и 100 мг фруктоолигосахарида. В результате многштаммовая пробиотическая добавка в течение 8 недель предотвратила рост уровня глюкозы в плазме натощак, привела к снижению уровня С-реактивного белка в сыворотке и увеличению общего глутатиона в плазме у пациентов с диабетом по сравнению с плацебо. В исследовании [38] отмечается, что применение многштаммового пробиотического препарата, содержащего бактерии рода *Lactobacillus* и *Bifidobacterium*, выявило небольшое улучшение показателя гликированного гемоглобина и инсулина натощак у людей с СД2, остальные показатели (липидный профиль, артериальное давление и высокочувствительный С-реактивный белок) не имели значимых различий.

Исследование влияния кисломолочных продуктов, содержащих пробиотики, на прогрессирование СД, индуцированного СТЗ или высоким содержанием фруктозы у крыс, показало, что диета с добавлением пробиотического продукта задерживает развитие гипергликемии, дислипидемии и окислительного стресса [39, 40]. В работе [41] при изучении антидиабетического влияния пробиотического йогурта, содержащего *Lactobacillus acidophilus* и *Bifidobacterium lactis*, отмечено снижение общего холестерина и липопротеидов низкой плотности у людей с СД2, что может способствовать снижению факторов риска сердечно-сосудистых заболеваний. В других работах [42, 43] показано, что потребление 300 г пробиотического йогурта в день в течение 6–8 недель снижало уровень глюкозы в крови натощак, содержание гликированного гемоглоби-

на, некоторых воспалительных маркеров у пациентов с СД 2 и улучшало их антиоксидантный статус.

4. Технологические решения целевой доставки антидиабетических биологически активных компонентов

Современная пищевая промышленность широко использует биологически активные вещества (БАВ) и компоненты, в том числе при производстве функциональных продуктов питания. Использование чистых БАВ в пищевых продуктах осложняется тем, что они способны терять свои свойства в ходе технологических процессов и хранения. Для повышения эффективности используемых БАВ применяются различные методы их целевой доставки.

Инкапсулирование является широко используемым и хорошо зарекомендовавшим себя методом [44]. Доставка БАВ осуществляется путем создания матрицы-носителя, как правило, полимерного материала. В зависимости от типа БАВ, материала-носителя и параметров использования могут применяться различные варианты системы доставки.

Инкапсулирование позволяет не только сохранить БАВ при обработке и хранении в составе пищевого продукта, но также осуществлять целевую доставку БАВ. В зависимости от выбранного способа инкапсулирования и применяемых материалов матрицы можно контролировать высвобождение БАВ в нужном отделе ЖКТ. Таким образом, появляется потребность в подтверждении биодоступности БАВ *in vitro* и *in vivo*.

Существует множество способов формирования микро- и нанокапсул, включая распылительную и сублимационную сушку, покрытие в псевдоожоженном слое, экструзию и со-экструзию, многоступенчатую центробежную экструзию, молекулярное включение, межфазную полимеризацию, коацервацию, липосомальное включение и другие. Все эти методы могут быть применены для разработки функциональных пищевых ингредиентов и пищевых продуктов функционального назначения [45, 46, 47, 48].

Известен способ получения нанокапсул с экстрактом листьев шелковицы, *Pueraria Lobata* и рутином, средний размер которых составляет 120 нм, методом диффузии растворителя/восстановлением *insitu*. Инкапсулируемые БАВ могут ингибировать α -глюкозидазу, стимулировать выделение инсулина, модулировать кишечную микрофлору, усилить использование глюкозы и активировать β -клетки островков. Эффективность инкапсулирования составляла не менее 89 %. Разработанный способ инкапсулирования показал хорошую физиологическую стабильность и медленное высвобождение, а также усиление гипогликемического эффекта, наблюдаемое у видов крыс Goto-Kakizaki и Sprague-Dawley в модели *invivo* [49].

Методом нанопреципитации были получены наночастицы с маслом семян *Phoenix dactylifera* L. размером 207 нм. Наночастицы продемонстрировали лучшее ингибирование α -амилазы и α -глюкозидазы по сравнению с неинкапсулированным маслом. Эффективность инкапсулирования составила 97 % и были достигнуты следующие результаты: улучшенная стабильность, контролируемое и замедленное высвобождение для целевой доставки, улучшенная биодоступность и эффективность биоактивных соединений, а также антидиабетическая активность за счет ингибирования ферментов [50].

При инкапсулировании бетанина методом тонкослойной гидратации с ультразвуком в нанолипосо-

мы были получены частицы размером 36 нм. Инкапсулированный бетанин был более эффективным, чем свободный, в регулировании гипергликемии, гиперлипидемии и окислительного стресса у крыс с диабетом, вызванным стрептозотоцином. Инкапсулирование обеспечило профиль медленного высвобождения в имитированных пищеварительных жидкостях [51].

Микрокапсулирование коаксильным электро-распылением было использовано для создания частиц на основе зеина и АК, при этом диаметр капсул варьировал от 1 до 7 мкм. Морфология микрокапсул контролировалась с помощью параметров электро-распыления, а АК был централизован в ядре. Быстрое окисление АК за счет наличия двойных связей в структуре молекулы было нивелировано, АК в микрокапсулах обладала улучшенной окислительной стабильностью, что снижало риск прогоркания и возникновения неприятного запаха. Предложенный способ инкапсулирования несмешивающихся материалов может расширить возможности использования микрокапсул в качестве обогаателей пищевых продуктов в пищевой промышленности [52].

Была исследована возможность микроинкапсулирования масла с высоким содержанием АК методом распылительной сушки с использованием различных материалов стенок. В качестве материалов стенок использовались сывороточный белок (С), сывороточный белок-глюкоза (СГ) и сывороточный белок-глюкозный сироп-лактоза (СГЛ). Результаты показали, что более высокая эффективность инкапсулирования достигалась с использованием СГЛ в качестве материала стенки и составила 98,64 %, а растворимость инкапсулированной в СГЛ АК достигла 89,83 %. Ввиду возможности быстрого окисления АК были исследованы перекисные числа – в случае СГЛ они были значительно ниже, чем у С и СГ ($P < 0,05$), что указывает на более высокую окислительную стабильность СГЛ. Результаты исследования масла АК в процессе хранения ускоренным методом показало, что инкапсулирование в СГЛ улучшило окислительную стабильность АК при 25 °C и 50 °C [53].

Для смесей масел с незаменимыми $\omega 6/\omega 3$ полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК) использовались технологии нано- и микроинкапсулирования, чтобы сохранить и улучшить их свойства, а также сделать их доступными в виде порошка для последующего использования в составе пищевых продуктов. Диаметр полученных микрокапсул варьировал от 198,5 до 824,87 нм. Лучшая эффективность инкапсулирования была получена для капсул, содержащих микрофлюидизированные и высушенные распылительной сушкой порошки, которые также показали самую высокую эмульсионную и окислительную стабильность от 0 до 15 дней при 55 °C. Микроинкапсулирование повысило окислительную стабильность, термическую стабильность, срок годности и биологическую активность масел. Инкапсулирование также обеспечивает биодоступность масел, поскольку в наномасштабных системах доставки она дополнительно усиливает клеточное усвоение: процент высвобождения жирных кислот для образцов капсул с различными покрытиями в процессе кишечного пищеварения варьировал от 22 до 30 %. Кроме того, она также может быть полезна для контроля летучести масел [54].

Разнообразие методов получения и материала матриц позволяет инкапсулировать БАВ различной природы: водо- и спирторастворимые, жирорастворимые, а также нерастворимые, к которым и относятся микроорганизмы. Однако способы наноинкапсулиро-

вания бактериальных клеток, в том числе пробиотических микроорганизмов, затруднены ввиду их размера (от 0,5 до 5 мкм). Так, для инкапсулирования бактерий более эффективным является микроинкапсулирование.

Была разработана технология получения пробиотического мясного полуфабриката с инкапсулированной культурой *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG. Инкапсулированный ингредиент был получен экструзионным методом с использованием альгината кальция в качестве носителя. Выживаемость *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG в инкапсулированной форме после термической обработки полученного полуфабриката составила 59 ± 2 %, а итоговое количество жизнеспособных бактерий обеспечивало пробиотическую активность данного продукта [55].

Для поддержания количества жизнеспособных клеток *Lactobacillus acidophilus* LA-5 свыше 10^6 КОЕ/г в течение всего срока годности йогурта бактерии инкапсулировали распылительной сушкой с использованием смеси сывороточного белка и гуммиарабика в качестве носителя. Оптимальные условия обеспечили максимальную эффективность инкапсулирования 93,95 % и максимальную эффективность производства 48,36 %. После воздействия имитированных желудочно-кишечных условий микрокапсулы, полученные в оптимальных условиях, обеспечили лучшую защиту *Lactobacillus acidophilus* по сравнению со свободными клетками, со снижением количества жизнеспособных клеток в среднем на 10,84 % и 24,54 %, соответственно. Средний размер частиц микрокапсул составил 6 мкм, что приемлемо для включения в молочные и другие пищевые продукты [56].

Была проанализирована жизнеспособность *Lactobacillus acidophilus*, инкапсулированных в частицы альгината кальция с многослойным покрытием. Полученная эффективность инкапсулирования была выше 80 % во всех многослойных обработках, в то время как диаметр варьировал от 107 мкм до 222 мкм. В тестах на термостойкость многослойные частицы способствовали лучшей защите пробиотических культур по сравнению со свободными клетками, которые не выдержали тестируемых условий. Хранение до 120 дней при температурах охлаждения и замораживания было более эффективным для всех типов микрокапсул по сравнению со свободными клетками. Результаты показывают, что получение многослойных микрокапсул представляет собой эффективный метод улучшения жизнеспособности пробиотиков во время хранения, термической обработки и в условиях желудочно-кишечного тракта *in vitro* [57].

Авторами был разработан способ получения функционального пищевого ингредиента, содержащего пробиотические штаммы микроорганизмов *Bifidobacterium bifidum*, *Lactobacillus plantarum* и *Lactocaseibacillus rhamnosus*, в виде экструзионно инкапсулированных в альгинат натрия микрокапсул. При этом эффективность инкапсулирования была выше 90 %, была отмечена высокая выживаемость микроорганизмов в исследовании биодоступности *in vitro*, а также при хранении в составе функционального пищевого продукта [58].

Совместное использование АК и пробиотических штаммов микроорганизмов в инкапсулированной форме для профилактики СД2 не исследовано и не представлено в литературе, имеет научный и практический интерес.

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ АРАХИДОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ПРОБИОТИЧЕСКИХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ САХАРНОГО ДИАБЕТА ВТОРОГО ТИПА

ВЫВОДЫ

СД2 – заболевание, которое развивается постепенно, иногда годами, проходя ряд стадий нарушения толерантности к глюкозе, поэтому диабетические риски можно выявить задолго до появления первых клинических симптомов болезни. Современные тенденции в лечении СД2 предусматривают его раннюю диагностику, поскольку имеется реальная возможность путем первичной профилактики предотвратить развитие или значительно отдалить возникновение заболевания [59, 60].

Анализ результатов исследований зарубежных и отечественных ученых свидетельствует о том, что для направленной коррекции, а также профилактики метаболических нарушений, имеющих место при СД2, целесообразно использовать продукты с доказанными гипогликемическими, противовоспалительными и антиоксидантными свойствами.

Создание средств нутритивной профилактики СД2 путем разработки функциональных пищевых ингредиентов и продуктов с их использованием является актуальным и перспективным.

Масштабность задачи определяется недостаточной представленностью методов профилактики СД2, а также функциональных пищевых продуктов для его профилактики.

Согласно приведенным выше данным, АК и пробиотические штаммы микроорганизмов продемонстрировали свой потенциал как эффективное средство профилактики СД2 не только сами по себе, но и за счет образования различных метаболитов, позволяющих снизить риск возникновения СД2 за счет воздействия на определенные звенья его патогенеза. Однако совместное их применение в составе функционального пищевого ингредиента (ФПИ) с доказанной профилактической активностью в отношении СД2 предполагает проведение комплекса дальнейших исследований, в частности, доклинический анализ эффективности профилактического действия ФПИ на экспериментальной модели СД2 с привлечением лабораторных животных; определение технологических параметров получения ФПИ (включая капсулирование), обеспечивающих сохранность биологической активности АК и выживаемость пробиотических микроорганизмов в процессе производства, хранения и дальнейшего использования ФПИ в составе функционального пищевого продукта, а также в процессе пищеварения; определение характеристик ФПИ и сроков его годности.

ФПИ на основе АК и пробиотических штаммов микроорганизмов может использоваться в рационе как самостоятельно, так и в составе продуктов, предназначенных для профилактики СД2 – социально значимого заболевания, которое, по данным эпидемиологических исследований, приобрело в настоящее время характер пандемии.

Можно предположить, что предлагаемый подход будет способствовать улучшению состояния здоровья и повышению качества жизни значительной группы населения страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов И.И. [и др.]. Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом / Под редакцией И.И. Дедова, М.В. Шестаковой, А.Ю. Майорова. 11-й выпуск // Сахарный диабет. 2023. Т. 26. № 2S. С. 1–157.
2. Klebanova E.M. [et al.]. Lipid reducing and antioxidant action of mexicor in patients with diabetes mellitus type 2. 2006. Т. 78. № 8. С. 67–70.
3. Wiyono N. [et al.]. Exploring the therapeutic potential of functional foods for diabetes: A bibliometric analysis and scientific mapping // *Narra J.* 2024. Т. 4. № 1.

4. Alkhatib A. [et al.]. Functional foods and lifestyle approaches for diabetes prevention and management // *Nutrients.* 2017. Т. 9. № 12. С. 1310.

5. Кузнецова Э.Э., Горохова В.Г., Богородская С.Л. Микробиота кишечника. Роль в развитии различных патологий // *Клиническая лабораторная диагностика.* 2016. Т. 61. № 10. С. 723–726.

6. Clarke G. [et al.]. Minireview: gut microbiota: the neglected endocrine organ // *Molecular endocrinology.* 2014. Т. 28. № 8. С. 1221–1238.

7. Покровская Е.В., Шамхалова М.Ш., Шестакова М.В. Новые взгляды на состояние кишечной микробиоты при ожирении и сахарном диабете 2 типа // *Сахарный диабет.* 2019. Т. 22. № 3. С. 253–262.

8. Creely S.J. [et al.]. Lipopolysaccharide activates an innate immune system response in human adipose tissue in obesity and type 2 diabetes // *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism.* 2007. Т. 292. № 3. С. E740–E747.

9. Tseng C.H., Wu C.Y. The gut microbiome in obesity // *Journal of the Formosan Medical Association.* 2019. Т. 118. С. S3–S9.

10. Айтбаев К.А., Муркамилов И.Т. Ожирение и метаболический синдром: патофизиологическая роль кишечной микробиоты и потенциальные возможности альтернативной терапии // *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2017. Т. 6. № 3. С. 120–130.

11. Bathina S., Das U. N. PUFAs, BDNF and lipoxin A4 inhibit chemical-induced cytotoxicity of RIN5F cells in vitro and streptozotocin-induced type 2 diabetes mellitus in vivo // *Lipids in health and disease.* 2019. Т. 18. С. 1–25.

12. Tallima H., El Ridi R. Arachidonic acid: physiological roles and potential health benefits—a review // *Journal of advanced research.* 2018. Т. 11. С. 33–41.

13. Forsyth S., Gautier S., Salem Jr.N. Global estimates of dietary intake of docosahexaenoic acid and arachidonic acid in developing and developed countries // *Annals of Nutrition and Metabolism.* 2016. Т. 68. № 4. С. 258–267.

14. Salem Jr.N., Van Dael P. Arachidonic acid in human milk // *Nutrients.* 2020. Т. 12. № 3. С. 626.

15. Dixon G. [et al.]. Arachidonic acid, palmitic acid and glucose are important for the modulation of clonal pancreatic β -cell insulin secretion, growth and functional integrity // *Clinical science.* 2004. Т. 106. № 2. С. 191–199.

16. Wu B. [et al.]. The arachidonic acid metabolism protein-protein interaction network and its expression pattern in esophageal diseases // *American journal of translational research.* 2018. Т. 10. № 3. С. 907.

17. Grzywa M.A., Sobel A.K. Incidence of IDDM in the province of Rzeszow, Poland, 0-to 29-year-old age-group, 1980-1992 // *Diabetes Care.* 1995. Т. 18. С. 542–544.

18. Luo P., Wang M.H. Eicosanoids, β -cell function, and diabetes // *Prostaglandins & other lipid mediators.* 2011. Т. 95. № 1–4. С. 1–10.

19. Yates C.M., Calder P.C., Rainger G.E. Pharmacology and therapeutics of omega-3 polyunsaturated fatty acids in chronic inflammatory disease // *Pharmacology & therapeutics.* 2014. Т. 141. № 3. С. 272–282.

20. Kikukawa H. [et al.]. Arachidonic acid production by the oleaginous fungus *Mortierella alpinia* 1S-4: A review // *Journal of advanced research.* 2018. Т. 11. С. 15–22.

21. Gundala N.K.V., Das U.N. Arachidonic acid-rich ARASCO oil has anti-inflammatory and antidiabetic actions against streptozotocin+ high fat diet induced diabetes mellitus in Wistar rats // *Nutrition.* 2019. Т. 66. С. 203–218.

22. Das U.N. Arachidonic acid in health and disease with focus on hypertension and diabetes mellitus: A review // *Journal of advanced research.* 2018. Т. 11. С. 43–55.

23. Gundala N.K.V., Naidu V.G.M., Das U.N. Amelioration of streptozotocin-induced type 2 diabetes mellitus in Wistar rats by arachidonic acid // *Biochemical and Biophysical Research Communications.* 2018. Т. 496. № 1. С. 105–113.

24. Tan Y.Q. [et al.]. Host/microbiota interactions-derived tryptophan metabolites modulate oxidative stress and inflammation via aryl hydrocarbon receptor signaling // *Free Radical Biology and Medicine*. 2022. Т. 184. С. 30–41.
25. Tounian P., Bellaïche M., Legrand P. ARA or no ARA in infant formulae, that is the question // *Archives de Pédiatrie*. 2021. Т. 28. № 1. С. 69–74.
26. Ni X., Zhang Z., Li Z.D.J. Optimizing ARA and DHA in infant formula: A systematic review of global trends, regional disparities, and considerations for precision nutrition // *Food Research International*. 2024. С. 114049.
27. Wendel K. [et al.]. Effect of arachidonic and docosahexaenoic acid supplementation on respiratory outcomes and neonatal morbidities in preterm infants // *Clinical Nutrition*. 2023. Т. 42. № 1. С. 22–28.
28. Qin J. [et al.]. A metagenome-wide association study of gut microbiota in type 2 diabetes // *nature*. 2012. Т. 490. № 7418. С. 55–60.
29. Шендеров Б.А., Сеница А.В., Захарченко М.М. Метабиотики: вчера, сегодня, завтра // Санкт-Петербург : Крафт. 2017. Т. 79.
30. Kerry R.G. [et al.]. Probiotics: the ultimate nutritional supplement // *Microbial Biotechnology: Volume 2. Application in Food and Pharmacology*. 2018. С. 141–152.
31. Олескин А.В., Шендеров Б.А. Пробиотики, психобиотики и метабиотики: проблемы и перспективы // *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2020. Т. 2. № 3. С. 233–243.
32. Yin Y.N. [et al.]. Effects of four Bifidobacteria on obesity in high-fat diet induced rats // *World journal of gastroenterology: WJG*. 2010. Т. 16. № 27. С. 3394.
33. Олескин А.В., Шендеров Б.А., Роговский В.С. Социальность микроорганизмов и взаимоотношения в системе микробиота-хозяин: роль нейромедиаторов // Москва : Изд-во МГУ. 2020. С. 286.
34. Бондаренко В.М., Рыбальченко О.В. Анализ профилактического и лечебного действия пробиотических препаратов с позиций новых научных технологий // *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии*. 2015. № 2. С. 90–104.
35. Sabico S. [et al.]. Effects of a 6-month multi-strain probiotics supplementation in endotoxemic, inflammatory and cardiometabolic status of T2DM patients: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial // *Clinical nutrition*. 2019. Т. 38. № 4. С. 1561–1569.
36. Szulińska M. [et al.]. Dose-dependent effects of multispecies probiotic supplementation on the lipopolysaccharide (LPS) level and cardiometabolic profile in obese postmenopausal women: A 12-week randomized clinical trial // *Nutrients*. 2018. Т. 10. № 6. С. 773.
37. Asemi Z. [et al.]. Effect of multispecies probiotic supplements on metabolic profiles, hs-CRP, and oxidative stress in patients with type 2 diabetes // *Annals of nutrition and metabolism*. 2013. Т. 63. № 1–2. С. 1–9.
38. Firouzi S. [et al.]. Effect of multi-strain probiotics (multi-strain microbial cell preparation) on glycemic control and other diabetes-related outcomes in people with type 2 diabetes: a randomized controlled trial // *European journal of nutrition*. 2017. Т. 56. С. 1535–1550.
39. Yadav H., Jain S., Sinha P.R. Oral administration of dahi containing probiotic *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* delayed the progression of streptozotocin-induced diabetes in rats // *Journal of Dairy Research*. 2008. Т. 75. № 2. С. 189–195.
40. Yadav H., Jain S., Sinha P.R. Antidiabetic effect of probiotic dahi containing *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* in high fructose fed rats // *Nutrition*. 2007. Т. 23. № 1. С. 62–68.
41. Ejtahed H.S. [et al.]. Effect of probiotic yogurt containing *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium lactis* on lipid profile in individuals with type 2 diabetes mellitus // *Journal of dairy science*. 2011. Т. 94. № 7. С. 3288–3294.
42. Ejtahed H.S. [et al.]. Probiotic yogurt improves antioxidant status in type 2 diabetic patients // *Nutrition*. 2012. Т. 28. № 5. С. 539–543.
43. Mohamadshahi M. [et al.]. Effects of probiotic yogurt consumption on inflammatory biomarkers in patients with type 2 diabetes // *BiolImpacts: Bl*. 2014. Т. 4. № 2. С. 83.
44. Desai K.G.H., Jin Park H. Recent developments in microencapsulation of food ingredients // *Drying technology*. 2005. Т. 23. № 7. С. 1361–1394.
45. Nedovic V. [et al.]. An overview of encapsulation technologies for food applications // *Procedia food science*. 2011. Т. 1. С. 1806–1815.
46. Timilsena Y.P., Haque M.A., Adhikari B. Encapsulation in the food industry: A brief historical overview to recent developments // *Food and Nutrition Sciences*. 2020. Т. 11. № 6. С. 481–508.
47. Reque P.M., Brandelli A. Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Т. 114. С. 1–10.
48. Marcillo-Parra V. [et al.]. Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application-A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Т. 116. С. 11–23.
49. Deng W. [et al.]. Selenium-layered nanoparticles serving for oral delivery of phytomedicines with hypoglycemic activity to synergistically potentiate the antidiabetic effect // *Acta pharmaceutica sinica B*. 2019. Т. 9. № 1. С. 74–86.
50. Lammari N. [et al.]. Encapsulation of essential oils via nanoprecipitation process: Overview, progress, challenges and prospects // *Pharmaceutics*. 2020. Т. 12. № 5. С. 431.
51. Amjadi S. [et al.]. Enhancement of therapeutic efficacy of betanin for diabetes treatment by liposomal nanocarriers // *Journal of functional foods*. 2019. Т. 59. С. 119–128.
52. Hu M.X. [et al.]. Arachidonic acid-encapsulated microcapsules with core-shell structure prepared by coaxial electrospray // *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. Т. 138. № 19. С. 50403.
53. Meng L.I. [et al.]. Effects of different wall materials on the physicochemical properties and stability of ARA oil microcapsules // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2024. Т. 40. № 12. С. 295–303.
54. Abdel-Razek A.G. [et al.]. Omega fatty acid-balanced oil formula and enhancing its oxidative stability by encapsulation with whey protein concentrate // *Food Bioscience*. 2022. Т. 50. С. 101975.
55. Астафьева Б.В. [и др.]. Разработка замороженного мясного полуфабриката с пробиотической культурой *Lactocaseibacillus rhamnosus GG* // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2022. Т. 84. № 3. С. 53–59.
56. Leylak C. [et al.]. Optimisation of spray drying parameters for *Lactobacillus acidophilus* encapsulation in whey and gum Arabic: Its application in yoghurt // *International Dairy Journal*. 2021. Т. 112. С. 104865.
57. de Araújo Etchepare M. [et al.]. Improvement of the viability of encapsulated probiotics using whey proteins // *Lwt*. 2020. Т. 117. С. 108601.
58. Забодалова Л.А. [и др.]. Йогурт с инкапсулированными пробиотическими микроорганизмами для профилактики сахарного диабета 2-го типа // *Аграрная наука*. 2025. № 3. С. 123–136.
59. Смирнова О.М. Комбинированная терапия сахарного диабета типа 2 // *Проблемы эндокринологии*. 2005. Т. 51. № 3. С. 7–10.
60. Заикина М.А. Применение сырья с низким гликемическим индексом в технологии мучных кондитерских изделий // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания*. 2022. № 1. С. 10–16.

ПОТЕНЦИАЛ ПРИМЕНЕНИЯ АРАХИДОНОВОЙ КИСЛОТЫ И ПРОБИОТИЧЕСКИХ ШТАММОВ МИКРООРГАНИЗМОВ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ САХАРНОГО ДИАБЕТА ВТОРОГО ТИПА

Информация об авторах

Л. А. Забодалова – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник факультета биотехнологий Университета ИТМО.

В. С. Ильина – к.т.н., научный сотрудник международного научного центра «Биотехнологии третьего тысячелетия» Университета ИТМО.

REFERENCES

1. Дедов, И.И., Шестакова, М.В., Майоров, А.Ю., Мокрышева, Н.Г., Андреева, Е.Н., Безлепкина, О.Б. & Ярославцева, М.В. (2023). Алгоритмы специализированной медицинской помощи больным сахарным диабетом / Под редакцией И.И. Дедова, М.В. Шестаковой, А.Ю. Майорова. 11-й выпуск. *Сахарный диабет*, 26(2S), 1-157.

2. Klebanova, E.M., Balabolkin, M.I., Kremnskaia, V.M. & Smirnov, L.D. (2006). Lipid reducing and antioxidant action of mexicosin in patients with diabetes mellitus type 2. *Terapevticheskiy arkhiv*, 78(8), 67-70.

3. Wiyono, N., Yudhani, R.D., Wasita, B., Suyatmi, S., Wardhani, L.O., Pesik, R.N. & Rahayu, R.F. (2024). Exploring the therapeutic potential of functional foods for diabetes: A bibliometric analysis and scientific mapping. *Narra J*, 4(1).

4. Alkhatib, A., Tsang, C., Tiss, A., Bahorun, T., Arefanian, H., Barake, R. & Tuomilehto, J. (2017). Functional foods and lifestyle approaches for diabetes prevention and management. *Nutrients*, 9(12), 1310.

5. Кузнецова, Э.Э., Горохова, В.Г. & Богородская, С.Л. (2016). Микробиота кишечника. Роль в развитии различных патологий. *Клиническая лабораторная диагностика*, 61(10), 723-726.

6. Clarke, G., Stilling, R.M., Kennedy, P.J., Stanton, C., Cryan, J.F. & Dinan, T.G. (2014). Minireview: gut microbiota: the neglected endocrine organ. *Molecular endocrinology*, 28(8), 1221-1238.

7. Покровская, Е.В., Шамхалова, М.Ш. & Шестакова, М.В. (2019). Новые взгляды на состояние кишечной микробиоты при ожирении и сахарном диабете 2 типа. *Сахарный диабет*, 22(3), 253-262.

8. Creely, S.J., McTernan, P.G., Kusminski, C.M., Fisher, F.M., Da Silva, N.F., Khanolkar, M. & Kumar, S. (2007). Lipopolysaccharide activates an innate immune system response in human adipose tissue in obesity and type 2 diabetes. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 292(3), E740-E747.

9. Tseng, C.H. & Wu, C.Y. (2019). The gut microbiome in obesity. *Journal of the Formosan Medical Association*, 118, S3-S9.

10. Айтбаев, К.А. & Муркамилов, И.Т. (2017). Ожирение и метаболический синдром: патофизиологическая роль кишечной микробиоты и потенциальные возможности альтернативной терапии. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний*, 6(3), 120-130.

11. Bathina, S. & Das, U.N. (2019). PUFAs, BDNF and lipoxin A4 inhibit chemical-induced cytotoxicity of RIN5F cells in vitro and streptozotocin-induced type 2 diabetes mellitus in vivo. *Lipids in health and disease*, 18, 1-25.

12. Tallima, H. & El Ridi, R. (2018). Arachidonic acid: physiological roles and potential health benefits-a review. *Journal of advanced research*, 11, 33-41.

13. Forsyth, S., Gautier, S. & Salem Jr.N. (2016). Global estimates of dietary intake of docosahexaenoic acid and arachidonic acid in developing and developed countries. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 68(4), 258-267.

14. Salem, Jr.N. & Van Dael, P. (2020). Arachidonic acid in human milk. *Nutrients*, 12(3), 626.

15. Dixon, G., Nolan, J., McCLENAGHAN, N.H., Flatt, P.R. & Newsholme, P. (2004). Arachidonic acid, palmitic acid and glucose are important for the modulation of clonal pancreatic β -cell insulin secretion, growth and functional integrity. *Clinical Science*, 106(2), 191-199.

16. Wu, B., Bai, C., Du, Z., Zou, H., Wu, J., Xie, W. & Li, E. (2018). The arachidonic acid metabolism protein-protein interaction network and its expression pattern in esophageal diseases. *American journal of translational research*, 10(3), 907.

17. Grzywa, M.A. & Sobel, A.K. (1995). Incidence of IDDM in the province of Rzeszow, Poland, 0-to 29-year-old age-group, 1980-1992. *Diabetes Care*, 18(4), 542-544.

18. Luo, P. & Wang, M.H. (2011). Eicosanoids, β -cell function, and diabetes. *Prostaglandins & other lipid mediators*, 95(1-4), 1-10.

19. Yates, C.M., Calder, P.C. & Rainger, G.E. (2014). Pharmacology and therapeutics of omega-3 polyunsaturated fatty acids in chronic inflammatory disease. *Pharmacology & therapeutics*, 141(3), 272-282.

20. Kikukawa, H., Sakuradani, E., Ando, A., Shimizu, S. & Ogawa, J. (2018). Arachidonic acid production by the oleaginous fungus *Mortierella alpina* 1S-4: A review. *Journal of advanced research*, 11, 15-22.

21. Gundala, N.K. & Das, U.N. (2019). Arachidonic acid-rich ARASCO oil has anti-inflammatory and antidiabetic actions against streptozotocin+ high fat diet induced diabetes mellitus in Wistar rats. *Nutrition*, 66, 203-218.

22. Das, U.N. (2018). Arachidonic acid in health and disease with focus on hypertension and diabetes mellitus: A review. *Journal of advanced research*, 11, 43-55.

23. Gundala, N.K., Naidu, V.G. & Das, U.N. (2018). Amelioration of streptozotocin-induced type 2 diabetes mellitus in Wistar rats by arachidonic acid. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 496(1), 105-113.

24. Tan, Y.Q., Wang, Y.N., Feng, H.Y., Guo, Z.Y., Li, X., Nie, X.L. & Zhao, Y.Y. (2022). Host/microbiota interactions-derived tryptophan metabolites modulate oxidative stress and inflammation via aryl hydrocarbon receptor signaling. *Free Radical Biology and Medicine*, 184, 30-41.

25. Tounian, P., Bellaïche, M. & Legrand, P. (2021). ARA or no ARA in infant formulae, that is the question. *Archives de Pédiatrie*, 28(1), 69-74.

26. Ni, X., Zhang, Z. & Li, Z.D.J. (2024). Optimizing ARA and DHA in infant formula: A systematic review of global trends, regional disparities, and considerations for precision nutrition. *Food Research International*, 114049.

27. Wendel, K., Aas, M.F., Gunnarsdottir, G., Rossholt, M.E., Brattlie, M., Nordvik, T. & Moltu, S.J. (2023). Effect of arachidonic and docosahexaenoic acid supplementation on respiratory outcomes and neonatal morbidities in preterm infants. *Clinical Nutrition*, 42(1), 22-28.

28. Qin, J., Li, Y., Cai, Z., Li, S., Zhu, J., Zhang, F. & Wang, J. (2012). A metagenome-wide association study of gut microbiota in type 2 diabetes. *nature*, 490(7418), 55-60.

29. Шендеров, Б.А., Саница, А.В. & Захарченко, М.М. (2017). Метабиотики: вчера, сегодня, завтра. Санкт-Петербург: Крафт, 79.

30. Kerry, R.G., Pradhan, P., Samal, D., Gouda, S., Das, G., Shin, H.S. & Patra, J.K. (2018). Probiotics: the ultimate nutritional supplement. *Microbial Biotechnology: Volume 2. Application in Food and Pharmacology*, 141-152.

31. Олескин, А.В. & Шендеров, Б.А. (2020). Пробиотики, психобиотики и метабиотики: проблемы и перспективы. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*, 2(3), 233-243.

32. Yin, Y.N., Yu, Q.F., Fu, N., Liu, X.W. & Lu, F.G. (2010). Effects of four Bifidobacteria on obesity in high-fat diet induced rats. *World journal of gastroenterology: WJG*, 16(27), 3394.

33. Олескин, А.В., Шендеров, Б.А. & Роговский, В.С. (2020). Социальность микроорганизмов и взаимоотношения в системе микробиота-хозяин: роль нейромедиаторов. Москва: Изд-во МГУ. 286.

34. Бондаренко, В.М. & Рыбальченко, О.В. (2015). Анализ профилактического и лечебного действия пробиотических препаратов с позиций новых научных технологий. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии*, (2), 90-104.

35. Sabico, S., Al-Mashharawi, A., Al-Daghri, N.M., Wani, K., Amer, O.E., Hussain, D.S. & McTernan, P.G. (2019). Effects of a 6-month multi-strain probiotics supplementation in endotoxemic, inflammatory and cardiometabolic status of T2DM patients: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Clinical nutrition*, 38(4), 1561-1569.
36. Szulińska, M., Łoniewski, I., Van Hemert, S., Sobieska, M. & Bogdański, P. (2018). Dose-dependent effects of multispecies probiotic supplementation on the lipopolysaccharide (LPS) level and cardiometabolic profile in obese postmenopausal women: A 12-week randomized clinical trial. *Nutrients*, 10(6), 773.
37. Asemi, Z., Zare, Z., Shakeri, H., Sabihi, S.S. & Esmailzadeh, A. (2013). Effect of multispecies probiotic supplements on metabolic profiles, hs-CRP, and oxidative stress in patients with type 2 diabetes. *Annals of nutrition and metabolism*, 63(1-2), 1-9.
38. Firouzi, S., Majid, H.A., Ismail, A., Kamaruddin, N.A. & Barakatun-Nisak, M.Y. (2017). Effect of multi-strain probiotics (multi-strain microbial cell preparation) on glycemic control and other diabetes-related outcomes in people with type 2 diabetes: a randomized controlled trial. *European journal of nutrition*, 56, 1535-1550.
39. Yadav, H., Jain, S. & Sinha, P.R. (2008). Oral administration of dahi containing probiotic *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* delayed the progression of streptozotocin-induced diabetes in rats. *Journal of Dairy Research*, 75(2), 189-195.
40. Yadav, H., Jain, S. & Sinha, P.R. (2007). Antidiabetic effect of probiotic dahi containing *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus casei* in high fructose fed rats. *Nutrition*, 23(1), 62-68.
41. Ejtahed, H.S., Mohtadi-Nia, J., Homayouni-Rad, A., Niafar, M., Asghari-Jafarabadi, M., Mofid, V. & Akbarian-Moghari, A. (2011). Effect of probiotic yogurt containing *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium lactis* on lipid profile in individuals with type 2 diabetes mellitus. *Journal of dairy science*, 94(7), 3288-3294.
42. Ejtahed, H.S., Mohtadi-Nia, J., Homayouni-Rad, A., Niafar, M., Asghari-Jafarabadi, M. & Mofid, V. (2012). Probiotic yogurt improves antioxidant status in type 2 diabetic patients. *Nutrition*, 28(5), 539-543.
43. Mohamadshahi, M., Veissi, M., Haidari, F., Shahbazian, H., Kaydani, G.A. & Mohammadi, F. (2014). Effects of probiotic yogurt consumption on inflammatory biomarkers in patients with type 2 diabetes. *Biolimpacts: BI*, 4(2), 83.
44. Desai, K.G.H. & Jin Park, H. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying technology*, 23(7), 1361-1394.
45. Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S. & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia food science*, 1, 1806-1815.
46. Timilsena, Y.P., Haque, M.A. & Adhikari, B. (2020). Encapsulation in the food industry: A brief historical overview to recent developments. *Food and Nutrition Sciences*, 11(6), 481-508.
47. Reque, P.M. & Brandelli, A. (2021). Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 1-10.
48. Marcillo-Parra, V., Tupuna-Yerovi, D. S., González, Z. & Ruales, J. (2021). Encapsulation of bioactive compounds from fruit and vegetable by-products for food application-A review. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 11-23.
49. Deng, W. [et al.]. (2019). Selenium-layered nanoparticles serving for oral delivery of phytomedicines with hypoglycemic activity to synergistically potentiate the antidiabetic effect. *Acta pharmaceutica sinica B*.9(1). C. 74-86.
50. Lammari, N. [et al.]. (2020). Encapsulation of essential oils via nanoprecipitation process: Overview, progress, challenges and prospects. *Pharmaceutics*. 12(5). P. 431.
51. Amjadi, S. [et al.]. (2019). Enhancement of therapeutic efficacy of betanin for diabetes treatment by liposomal nanocarriers. *Journal of functional foods*. (59).119-128.
52. Hu, M.X. [et al.]. (2021). Arachidonic acid-encapsulated microcapsules with core-shell structure prepared by coaxial electrospray // *Journal of Applied Polymer Science*. 138(19). P. 50403.
53. Meng, L.I. [et al.]. (2024). Effects of different wall materials on the physicochemical properties and stability of ARA oil microcapsules // *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 40(12). 295-303.
54. Abdel-Razek, A.G. [et al.]. (2022). Omega fatty acid-balanced oil formula and enhancing its oxidative stability by encapsulation with whey protein concentrate. *Food Bioscience*. (50). P. 101975.
55. Astafieva, B.V. and others. (2022). Development of a frozen semi-finished meat product with a probiotic culture of *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 84(3). 53-59. (In Russ).
56. Leylak, C. [et al.]. (2021). Optimisation of spray drying parameters for *Lactobacillus acidophilus* encapsulation in whey and gum Arabic: Its application in yoghurt. *International Dairy Journal*. (112). P. 104865.
57. De Araújo Etchepare, M. [et al.]. (2020). Improvement of the viability of encapsulated probiotics using whey proteins. *Lwt*. (117). P. 108601.
58. Zabodalova, L.A. and others. (2025). Yogurt with encapsulated probiotic microorganisms for the prevention of type 2 diabetes mellitus. *Agrarian Science*. (3). 123-136. (In Russ.).
59. Smirnova, O.M. (2005). Combination therapy of type 2 diabetes mellitus. *Problems of endocrinology*. 51(3). 7-10. (In Russ.).
60. Zaikina, M.A. (2022). The use of raw materials with a low glycemic index in the technology of flour confectionery. *Technologies of the food and processing industry of the agroindustrial complex-healthy food products*. (1). 10-16. (In Russ.).

Information about the authors

L.A. Zabodalova - Doctor of Sciences in engineering, Professor, Chief Researcher at the Faculty of Biotechnology, ITMO University.

V.S. Ilina - PhD in engineering, researcher, international research centre "Biotechnologies of the Third Millennium" (Bio3M), ITMO University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mar 2026.