

Пребиотик арабиногалактан: физиологические эффекты, механизмы действия и потенциал клинического применения

Е. А. Бурляева^{1,2,3}

¹ ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания и биотехнологии», Москва, Россия

² ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Россия

³ ФГБУН Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

В представленной обзорной работе систематизированы современные данные о роли пребиотических волокон в регуляции кишечного микробиоценоза, метаболизма и иммунного ответа. Пищевые волокна не перевариваются в желудочно-кишечном тракте человека, а, попадая в толстый кишечник, служат пребиотическим субстратом для симбиотной микробиоты. Сегодня не вызывает сомнений важная роль микроорганизмов-симбионтов в нормальном функционировании различных систем организма человека. Особое внимание уделено короткоцепочечным жирным кислотам – основным метаболитам микробной ферментации пребиотиков, которые осуществляют ключевое посредничество между микробиотой и иммунной системой организма. Раскрыты механизмы взаимодействия микробных метаболитов с популяциями Т-лимфоцитов, макрофагов, дендритных и NK-клеток, а также описано их влияние на барьерные функции и иммугомеостаз. В фокусе обзора – арабиногалактан лиственницы сибирской как один из наиболее изученных и клинически перспективных пребиотиков природного происхождения. Рассмотрены его структурные особенности, пути метаболизации, пребиотический и иммуномодулирующий потенциал, а также возможности включения в функциональное питание, нутрицевтики и фармакологические композиции. Обобщены данные отечественных и зарубежных исследований, подтверждающие биологическую активность и безопасность арабиногалактана, а также его перспективность в профилактике нарушений микробиоценоза и системной иммунной дисрегуляции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пищевые волокна, клетчатка, пребиотики, кишечная микробиота, короткоцепочечные жирные кислоты, иммунная регуляция, арабиногалактан, функциональное питание, кишечный барьер.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Arabinogalactan as a prebiotic: physiological effects, mechanisms of action, and clinical application potential

Е. А. Burlyayeva^{1,2,3}

¹ Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia

² I. M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

³ State Scientific Center of the Russian Federation Institute of Medical and Biological Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

SUMMARY

This literature review presents current data on the role of prebiotic fibers in the regulation of gut microbiota composition, host metabolism, and immune homeostasis. Dietary fiber is not digested in the human gastrointestinal tract, but, entering the large intestine, serves as a prebiotic substrate for symbiotic microbiota. Today, there is no doubt about the important role of symbiotic microorganisms in the normal functioning of various systems of the human body. Particular emphasis is placed on short-chain fatty acids – the principal microbial fermentation products of dietary fibers – that serve as key mediators between symbiotic microbiota and host immune responses. The mechanisms by which these metabolites modulate immune cell populations, including T lymphocytes, macrophages, dendritic cells, and NK cells, are described, alongside their effects on intestinal barrier function and systemic immunity. Special focus is given to larch arabinogalactan, a well-studied natural polysaccharide with established prebiotic and immunomodulatory properties. Its structural characteristics, metabolic fate in the colon, biological activity, and clinical relevance are reviewed. The article also summarizes findings from Russian and international studies supporting the safety and efficacy of arabinogalactan and its potential applications in functional nutrition, preventive medicine, and pharmaceutical formulations.

KEYWORDS: dietary fiber, cellulose, prebiotics, gut microbiota, short-chain fatty acids, immune modulation, arabinogalactan, functional nutrition, intestinal barrier.

CONFLICT OF INTEREST. The author declares no conflict of interest.

Введение

Последние десятилетия значительно расширились представления о физиологической и патофизиологической роли человеческого микробиома. Этому в значительной степени способствовало внедрение новых методов метагеномного анализа, которые позволили идентифицировать сотни ранее неизвестных видов микроорганизмов, населяющих

различные локусы человеческого организма и недоступных для изучения традиционными культуральными методами, применявшимися в XX в. Симбиотическая микрофлора кишечника играет ключевую роль в функционировании различных систем организма современного человека, о чем свидетельствуют данные многочисленных масштабных

исследований. Установлено, что большинство физиологических процессов связано с состоянием микробиоты кишечника, включая метаболизм, иммунный гомеостаз, регуляцию деятельности сердечно-сосудистой, эндокринной, репродуктивной и центральной нервной систем, а также высшей нервной деятельности. В толстом кишечнике человека присутствует от 10^{10} до 10^{12} микроорганизмов на грамм содержимого, относящихся, по разным данным, к 500–1000 таксономическим единицам [1, 2].

Будучи интегрированными с организмом человека в форме симбионтов, эти микроорганизмы получают необходимые для своей жизнедеятельности питательные вещества из пищи хозяина, и, в свою очередь, их метаболиты существенно влияют на физиологические процессы организма. Сбалансированное питание важно не только для общего здоровья, но и как ключевой фактор формирования состава микробиоты желудочно-кишечного тракта. Рациональное питание, включающее преобладание овощей, фруктов, бобовых культур, продуктов из цельного зерна и рыбы, способствует поддержанию устойчивой и таксономически разнообразной микробной экосистемы кишечника, обладающей высокой метаболической и трофической активностью. В противоположность этому диеты, характеризующиеся высоким содержанием продуктов глубокой промышленной переработки, красного мяса, насыщенных жиров и рафинированных углеводов, ассоциированы с формированием нарушенной структуры кишечного микробиома (дисбиоза), что проявляется снижением видового разнообразия и функциональной активности микробных сообществ. Подобные изменения повышают риск развития метаболических нарушений, заболеваний желудочно-кишечного тракта и сердечно-сосудистой системы. Ключевым патогенетическим звеном в данном контексте выступает дефицит пищевых волокон, необходимых для поддержания трофической активности симбиотной микробиоты и синтеза короткоцепочечных жирных кислот [3–8].

Пищевые волокна не перевариваются в ЖКТ человека, а, попадая в толстый кишечник, служат пребиотическим субстратом для симбиотной микробиоты. Данный класс соединений представлен множеством органических

полимеров со сложной и гетерогенной структурой, состоящих из мономеров, соединенных между собой гликозидными связями. В связи с разнообразием химического состава и свойств этих веществ в научной литературе предпринимались многочисленные попытки их классификации с учетом таких параметров, как растворимость, вязкость и степень ферментируемости [1, 9, 10]. Нерастворимые пищевые волокна, к числу которых относятся целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин, практически не подвергаются ферментации со стороны кишечной микробиоты. Они выполняют преимущественно структурную функцию, формируя основу каловых масс и обеспечивая механическую стимуляцию моторной активности кишечника. В то же время растворимые пищевые волокна (включая бета-глюканы, пектины, инулин) служат субстратом для метаболической активности симбиотически ассоциированных микроорганизмов, влияя на их количество и разнообразие. Таким образом, растворимые волокна являются наиболее ценным пребиотическим субстратом [11]. В результате метаболизма растворимых пищевых волокон образуется множество полезных и важных для человека веществ, в первую очередь короткоцепочечных жирных кислот (КЖК), имеющих широкий спектр эффектов в отношении гомеостаза человеческого организма [12, 13]. Систематизация наиболее характерных пребиотиков, относящихся к классу растворимых пищевых волокон, представлена в *таблице 1*. Таблица переведена и адаптирована на основе данных, опубликованных в работе Guan Z. W. и соавт. (2021) [23].

Поскольку охватить весь спектр биологических эффектов, связанных с пребиотиками, в рамках одной публикации не представляется возможным, в данном обзоре будут освещены вопросы, касающиеся роли растворимых пребиотических волокон, в частности арабиногалактана, в иммунном гомеостазе человеческого организма.

Функциональный метаболизм пребиотиков микробиотой: синтез КЖК

Ферментные системы человека не способны расщеплять растворимые пищевые волокна, поэтому, достигая толстого кишечника, они становятся субстратом для симбиотных бактерий. Микроорганизмы с помощью

Таблица 1
Классификация растворимых пищевых волокон, обладающих пребиотическими свойствами [23]

Тип	Структура	Основные источники	Влияние на микробиоту кишечника
Фруктоолигосахариды (ФОС)	Сахароза, связанная с 1–3 фруктозами β-гликозидными связями	Овощи, фрукты и синтетические	Увеличение α-разнообразия, <i>Bifidobacteria</i> и <i>Lactobacilli</i> [14]
Галактоолигосахариды (ГОС)	Галактоза или глюкоза, связанная с 1–7 галактозами β-гликозидными связями	Молоко и некоторые растения	Увеличение β-разнообразия, <i>Lactobacillaceae</i> и <i>Lachnospiraceae</i> ; снижение <i>Ruminococcaceae</i> [15]
Инулин	D-фруктоза, связанная с терминальной глюкозой β-гликозидной связью	Овощи, фрукты, злаки	Увеличение β-разнообразия, <i>Prevotellaceae</i> [16]; увеличение α-разнообразия, <i>Bifidobacteria</i> ; снижение <i>Desulfovibrio</i> [17]
β-глюкан	Крупный полимер из мономеров D-глюкозы, связанных β-гликозидными связями	Злаки, грибы	Увеличение <i>Bifidobacteria</i> и <i>Lactobacilli</i> ; снижение <i>Enterobacteriaceae</i> [18]
Пектины	Сложные полисахариды, содержащие D-галактуроновую кислоту, рамнозу, арабинозу и галактозу	Овощи, фрукты, бобовые	Увеличение <i>Bifidobacteria</i> , <i>Lactobacilli</i> и <i>Faecalibaculum</i> spp. [19]; увеличение β-разнообразия; ингибирование <i>Citrobacter rodentium</i> [20]
Камеди, включая арабиногалактаны	Сложные полисахариды, содержащие D-галактуроновую кислоту, маннозу, глюкозу, арабинозу и галактозу	Бобовые, орехи, водоросли	Увеличение <i>Bifidobacteria</i> и <i>Lactobacilli</i> [21]; ингибирование <i>Clostridium histolyticum</i> [22]

собственных ферментов гидролизуют волокна до олиго- и моносахаридов, которые далее транспортируются внутрь бактериальных клеток с участием специализированных мембранных переносчиков и используются в качестве источника энергии [24]. Каждый отдельный вид бактерий обладает ограниченным спектром целлюлолитических ферментов, совокупный метаболический потенциал кишечного микробиома включает энзимы, относящиеся к 130 семействам гликозил-гидролаз, 22 семействам полисахарид-лиаз и 16 семействам карбогидрат-эстераз [25]. В целом бактериальное сообщество обладает широким ферментативным разнообразием, что позволяет утилизировать большой спектр полисахаридов растительного происхождения и использовать в качестве энергии различные пищевые волокна.

В качестве доказательного примера влияния пищевых волокон на микробиоту кишечника So D. и соавт. (2018) [36] провели систематический обзор и метаанализ, направленные на оценку влияния пищевых волокон на состав микробиоты у здоровых взрослых. В исследование включили 64 рандомизированных контролируемых исследования (на основе культуральных и/или молекулярных методов), общее число участников составило 2099 человек. Критериями оценки были альфа-разнообразие, количество определенных бактерий-симбионтов, включая *Bifidobacterium* и *Lactobacillus spp.*, а также концентрация КЖК в стуле в сравнении с плацебо или группами сравнения, получавшими малое количество пищевых волокон. В сравнении с контрольными группами (плацебо или диета с низким содержанием клетчатки) введение пищевых волокон достоверно увеличивало относительную численность *Bifidobacterium spp.* (стандартизированное среднее различие [ССР]: 0,64; 95 % ДИ 0,42–0,86; $p < 0,00001$), *Lactobacillus spp.* (ССР: 0,22; 95 % ДИ 0,03–0,41; $p = 0,02$), а также концентрацию бутирата в фекалиях (ССР: 0,24; 95 % ДИ 0,00–0,47; $p = 0,05$). Подгрупповой анализ показал, что фруктаны

и галактоолигосахариды вызывали наибольшее увеличение численности *Bifidobacterium spp.* и *Lactobacillus spp.* ($p < 0,00001$ и $p = 0,002$ соответственно). При этом не было выявлено статистически значимых различий между группами по внутригрупповому микробному разнообразию, относительной численности других заранее определенных бактериальных таксонов и содержанию прочих короткоцепочечных жирных кислот.

Бактериальные ферменты нередко объединяются в мультиферментные комплексы, известные как целлюлосомы, обеспечивающие эффективное расщепление высокомолекулярных полисахаридов до простых сахаров. Эти сахара затем транспортируются внутрь бактериальных клеток и фосфорилируются с участием фосфотрансферазной системы для последующей ферментации [1]. Кишечные бактерии в различной степени способны утилизировать как растворимые, так и нерастворимые пищевые волокна, но именно растворимые представляют собой основной источник энергии для симбиотической микробиоты и служат ключевым субстратом для микробной продукции короткоцепочечных жирных кислот [11–13]. КЖК представляют собой насыщенные жирные кислоты с длиной углеродной цепи от одного до шести атомов; наибольшее физиологическое значение в контексте метаболизма человека имеют ацетат (C2), пропионат (C3) и бутират (C4) [26, 27]. КЖК влияют на широкий спектр клеток организма и модулируют многие биологические функции, включая энергетический обмен, моторную и барьерную активность желудочно-кишечного тракта, а также параметры врожденного и адаптивного иммунного ответа [14, 28–30].

Способность расщеплять различные пищевые волокна и продуцировать те или иные КЖК сильно различается в зависимости от рода и вида бактерий. Так, представители *Bacteroidetes* продуцируют значительные количества C2 и C3, тогда как *Firmicutes* являются эффективными продуцентами C4 [1]. Говоря об особенностях конкретных видов, *Akkermansia muciniphila* продуцирует C3 из муцина. [44]. *Roseburia inulinivorans* и *Coprococcus catus* продуцируют как C3, так и C4 [32, 33]. *Faecalibacterium prausnitzii*, *Eubacterium rectale*, *Eubacterium hallii* и *Ruminococcus bromii* продуцируют большие количества C4 [33]. Кроме того, *Roseburia intestinalis*, *Eubacterium rectale* и *Clostridium symbiosum* являются эффективными продуцентами C4, и их количество увеличивается при повышенном употреблении пищевых волокон [34]. *Ruminococcus bromii* продуцирует C4 из устойчивого к расщеплению крахмала [35]. Сводные данные по некоторым ключевым продуцентам КЖК в толстом кишечнике человека представлены в таблице 2. Таблица переведена и адаптирована на основе данных, опубликованных в работе Zhang D. и соавт. (2023) [30].

Короткоцепочечные жирные кислоты абсорбируются колоноцитами и другими клетками кишечника посредством как пассивной диффузии, так и активного транспорта. Ключевую роль в транспорте анионных форм КЖК играют транспортеры MCT1 (SLC 16A1) и SMCT1 (SLC 5A8) [37]. C4 утилизируется преимущественно колоноцитами

Таблица 2
Микроорганизмы, являющиеся ключевыми источниками КЖК для человека [30]

КЖК	Продуценты
Ацетат (C2)	<i>Akkermansia muciniphila</i> , <i>Bacteroides spp.</i> , <i>Bifidobacterium spp.</i> , <i>Prevotella spp.</i> , <i>Ruminococcus spp.</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Blautia hydrogenotrophica</i> , <i>Clostridium spp.</i> , <i>Streptococcus spp.</i>
Пропионат (C3)	<i>Bacteroides uniformis</i> , <i>Bacteroides vulgatus</i> , <i>Prevotellacopr</i> , <i>Alistipes putredinis</i> , <i>Roseburia inulinivorans</i> , <i>Eubacterium hallii</i> , <i>Blautia obeum</i> , <i>Coprococcus catus</i> , <i>Dialister invisus</i> , <i>Phascolarctobacterium succinatutens</i> , <i>Akkermansia muciniphila</i> , <i>Dialister spp.</i> , <i>Veillonella spp.</i> , <i>Megasphaera elsdenii</i> , <i>Coprococcus catus</i> , <i>Bacteroides spp.</i> , <i>Salmonella spp.</i> , <i>Roseburia inulinivorans</i> , <i>Ruminococcus obeum</i>
Бутират (C4)	<i>Clostridium</i> кластеры IV и XIVa, <i>Faecalibacterium prausnitzii</i> , <i>Ruminococcus bromii</i> , семейство <i>Lachnospiraceae</i> , <i>Eubacterium rectale</i> , <i>Roseburia spp.</i> , <i>Roseburia inulinivorans</i> , <i>Roseburia intestinalis</i> , <i>Eubacterium hallii</i> , <i>Anaerostipes hadrus</i> , <i>Anaerostipes spp.</i> , <i>Coprococcus eutactus</i> , <i>Coprococcus comes</i> , <i>Coprococcus catus</i> , <i>Subdoligranulum variabile</i> , <i>Eubacterium bifforme</i> , <i>Actinobacteria</i> , <i>Fusobacteria</i> , <i>Spirochaetes</i> , <i>Thermotogae</i>

для собственного энергообеспечения, а С2 и С3 всасываются в системный кровоток и транспортируются в печень, мышцы, головной мозг и другие органы. С2 конвертируется в ацетил-СоА для липогенеза или окисления в мышцах. Большая часть С3 метаболизируется в печени и участвует в глюконеогенезе. КЖК оказывают большое влияние на клетки человека, активируя множественные метаболические пути для выработки энергии, синтеза различных веществ и, в целом, регулируя обменные процессы [38, 39]. Также кишечная микробиота вырабатывает лактат и сукцинат, которые могут быть конвертированы в С3 многими видами бактерий [40].

КЖК являются лигандами и вызывают активацию нескольких клеточных рецепторов, сопряженных с G-белком (GPCR): GPR 43, GPR 41, GPR 109A и OR 51E2 [1]. GPCR являются самым крупным семейством рецепторов у млекопитающих, представляя 7 трансмембранных доменов, и участвуют в регулировании практически всех клеточных функций *in vivo* [41]. Лигандами GPCR могут быть различные внеклеточные вещества – гормоны, нейротрансмиттеры, хемокины, углеводы и липиды [39, 41]. GPR 41 и GPR 43 активируются всеми тремя основными КЖК (ацетатом, пропионатом и бутиратом), тогда как GPR 109A предпочтительно связывается с более длинноцепочечными жирными кислотами, главным образом бутиратом [42]. Рецепторы отличаются по аффинности к КЖК: для GPR 41 характерен порядок активации $C_3 = C_4 = C_5 > C_2 > C_1$, тогда как для GPR 43 – $C_2 = C_3 > C_4 > C_5 = C_1$ [43, 44]. Активация SCFA-чувствительных GPCR участвует в патогенезе метаболических, неврологических, сердечно-сосудистых, онкологических и воспалительных заболеваний, что делает их вместе с КЖК перспективной терапевтической мишенью [30].

Арабиногалактан: строение и метаболические пути

Арабиногалактаны (синонимы: галактоарабианы, арабогалактаны, галактоарабинины) представляют собой биополимеры, состоящие из моносахаридов арабинозы и галактозы. Они принадлежат к большой группе углеводов, известных как гемицеллюлозы, являющиеся некрахмалистыми полисахаридами, широко представленными в клетках растений. В растениях арабиногалактаны являются основным структурным компонентом ряда камедей, включая гуммиарабик и гумми гхатти. Часто они ковалентно связываются с белками, формируя арабиногалактановые белки (AGP), которые выполняют функцию межклеточных сигнальных молекул, а также участвуют в формировании защитного матрикса, способствующего герметизации участков механических повреждений и ран на поверхности растительных тканей [45, 46].

Арабиногалактаны широко распространены в тканях высших растений и выявляются в семенах, листьях, корнях, плодах и соке представителей практически всех ботанических родов. На протяжении тысячелетий они являются естественным компонентом рациона человека. К числу продуктов питания, содержащих значительное количество арабиногалактана, относятся такие растения, как лук-порей, редька, морковь, груша, кукуруза, пшеница,

томаты, а также ряд фитотерапевтических видов, включая *Echinacea spp.*, *Baptisia tinctoria*, *Curcuma longa* и *Angelica acutiloba* [47, 48].

Арабиногалактаны подразделяются на два основных типа – арабиногалактаны I типа (AG-I) и арабиногалактаны II типа (AG-II). AG-I состоит из (1→4)-связанной β-D-галактопиранозы с короткими боковыми цепями (1→5)-связанной α-L-арабинофуранозы, присоединенной в позиции О-3 к остаткам галактозила. AG-I часто ассоциируются с пектинами и были описаны в составе пектинового комплекса рамногалактоуронана I [49, 50]. Помимо галактозы и арабинозы, в их составе могут присутствовать другие моносахариды, включая рамнозу, ксилозу, а также уроновые и фенольные кислоты. На сегодняшний день не подтверждена способность AG-I к образованию арабиногалактановых белков (AGP), то есть к ковалентному связыванию с белками [51]. Наиболее распространенной в природе формой являются арабиногалактаны II типа (AG-II). В отличие от AG-I, они не входят в состав клеточной стенки, а находятся во внеклеточных матриксах и на поверхности плазмалеммы [52]. AG-II представляют собой разветвленные биополимеры, состоящие из β-D-галактопиранозных остатков, соединенных (1→3) и (1→6)-гликозидными связями. Основной каркас построен на (1→3)-β-D-галактопиранозе, а ветвления формируются за счет остатков (1→6)-β-D-галактопиранозы [51]. Галактановый каркас может быть заменен короткой олигосахаридной цепью (1→3)-α-L-арабинофуранозы; реже встречаются L-рамнофураноза, D-маннанопираноза, D-глюкопираноза, D-глюкопираноза А и D-галактопираноза А [51]. Во многих случаях AG-II имеют ковалентную связь с белками и образуют арабиногалактановые белки (AGP). Арабиногалактановые белки (AGP) представляют собой высокогликозилированные макромолекулы, которые в зависимости от структуры и степени гликозилирования классифицируются либо как гликопротеины, либо как протеоглики. Белковая часть AGP характеризуется устойчивостью к протеолитическому расщеплению, что обусловлено высоким содержанием остатков гидроксипролина, серина, аланина, треонина и глицина [53, 54]. Исключение составляет лиственничный арабиногалактан, получаемый из древесины *Larix laricina* и широко используемый в составе биологически активных добавок. Лиственничный арабиногалактан не содержит белкового компонента, что подтверждается результатами элементного анализа, демонстрирующими отсутствие атомов азота в его составе [55, 56]. Структура AG-II приведена на рисунке 1. Схематическое изображение структуры AG-II представлено на рисунке 1.

Основным коммерческим источником арабиногалактана являются деревья, относящиеся к лиственничным (род *Larix*); в западных странах это обычно североамериканская лиственница (*Larix laricina*), а в России – сибирская и даурская лиственницы (*Larix dahurica*, *Larix sibirica*). Хотя показатель содержания арабиногалактана в разных видах лиственницы варьирует, он может достигать 35 % сухой массы сердцевины дерева [51, 57]. В воде арабиногалактан образует гидроколлоид. Объединенный

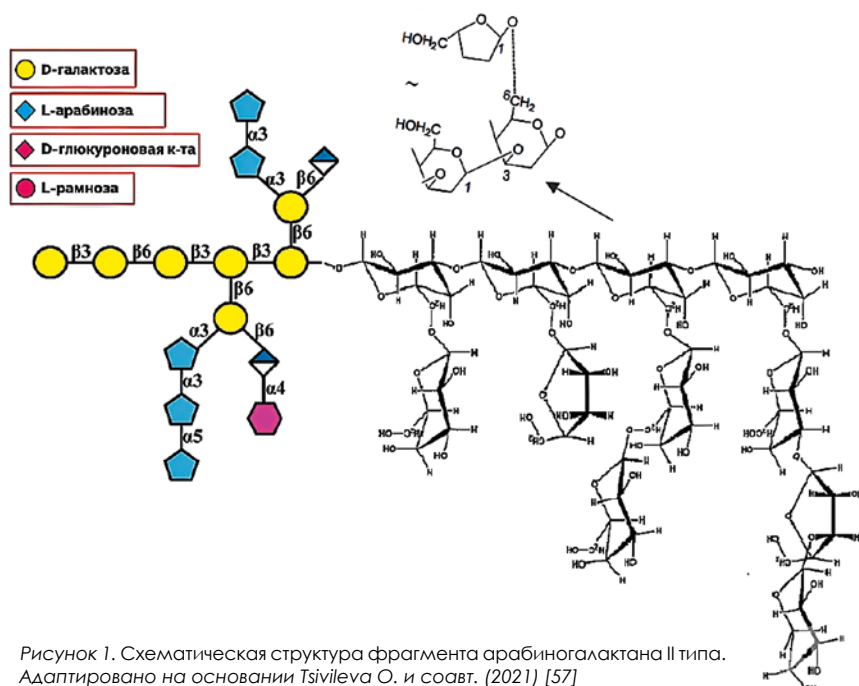


Рисунок 1. Схематическая структура фрагмента арабиногалактана II типа. Адаптировано на основании Tsivileva O. и соавт. (2021) [57]

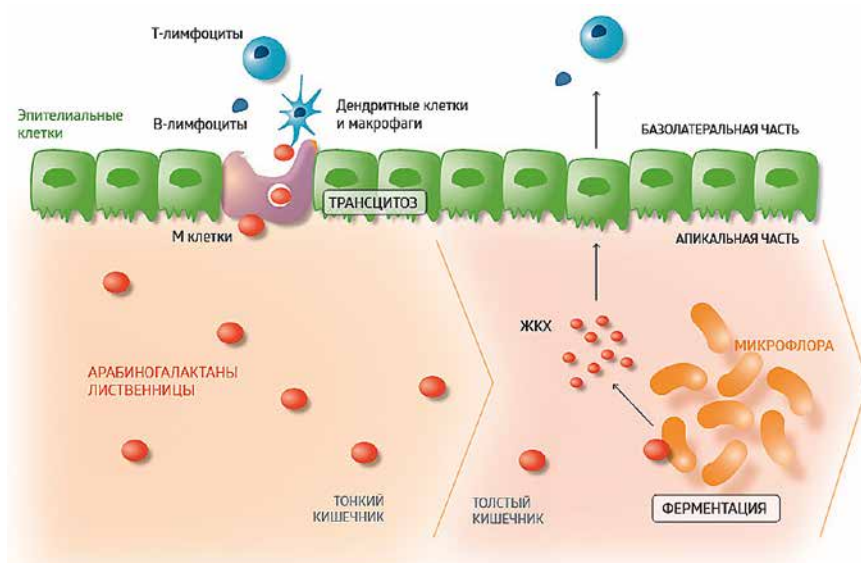


Рисунок 2. Принципы реализации эффектов арабиногалактана

экспертный комитет по пищевым добавкам ВОЗ отнес его к категории «желирующие агенты, структурирующие агенты и стабилизаторы растительного происхождения» и присвоил номер E-409. В 1965 г. арабиногалактан получил разрешение FDA в США для использования в качестве пищевой добавки, и в 2000-м получил обозначение «признанный в целом безопасным» [48]. Безопасность арабиногалактана хорошо изучена и не вызывает сомнений на основании данных ряда токсикологических исследований, проводившихся с 1960-х гг. [55, 58].

Являясь пребиотическим пищевым волокном, арабиногалактан не расщепляется ферментами человека, но, попадая в толстый кишечник, практически полностью метаболизируется микроорганизмами-симбионтами с выработкой значительного количества КЖК, роль которых обсуждалась выше. Для примера: арабиноксилан, имеющий

схожее с арабиногалактаном строение, усваивается кишечной микрофлорой человека на 85–100%, а полная ферментация арабиногалактана акации происходит в течение 48 ч [60, 61]. Ферментация бактериями кишечника арабиногалактана лиственницы приводит к образованию основных типов КЖК – бутирата, ацетата и пропионата, причем первые два количественно доминируют [60, 62, 63]. Помимо этого, прямой перенос молекул арабиногалактана М-клетками лимфоидной ткани кишечника и их взаимодействие с клетками иммунной системы подтверждаются экспериментальными данными Yamashita и соавт. [64]. Таким образом, арабиногалактан может влиять на физиологические параметры и иммунный гомеостаз человеческого организма как опосредованно через образующиеся в результате его ферментации КЖК, так и вследствие прямого взаимодействия с иммунной системой. Общие принципы реализации эффектов арабиногалактана отражены на рисунке 2.

Обращает на себя внимание определенная селективность пребиотического эффекта арабиногалактана. Так, наряду с общим увеличением содержания бактерий в кишечнике отмечено повышение концентрации *Bacteroides*, *Bifidobacterium longum*, *Faecalibacterium prausnitzii* и *Clostridium perfringens*, тогда как концентрация патогенных штаммов *C. perfringens* снижалась [65]. Кроме того, обнаружены определенные различия во влиянии арабиногалактана на микробиоту здоровых лиц и пациентов, страдающих некоторыми заболеваниями; эти сведения обобщены в таблице 3.

В Российской Федерации проведены исследования, продемонстрировавшие высокую научную и прикладную значимость применения арабиногалактана.

В экспериментах на лабораторных животных было установлено, что ржано-пшеничный хлеб и овсяные пряники, обогащенные арабиногалактаном, обладают выраженной иммуномодулирующей активностью в условиях медикаментозно индуцированной иммунодепрессии. Помимо этого, выявлено, что данные продукты способствуют ограничению прироста массы тела, а также снижению концентрации общего холестерина и липопротеидов низкой плотности в сыворотке крови. В условиях экспериментальной модели сахарного диабета отмечено достоверное уменьшение уровня глюкозы в крови у животных, получавших хлебобулочные изделия с добавлением арабиногалактана [70].

Таблица 3
Влияние арабиногалактана на микробиоту кишечника человека. ВЗК – воспалительные заболевания кишечника
Адаптировано на основании Li S. и соавт. (2023) [69]

Состояние	Модель	Изменение микробиоты	Изменение КЖК	Источник
Здоровые лица	Ферментация in vitro в фекалиях	<i>Bifidobacterium longum</i> ↑ <i>Bacteroides caccae</i> ↑ <i>Bacteroides thetaiotaomicron</i> ↑ <i>Lactobacillus mucosae</i> ↓ <i>Enterococcus faecium</i> ↓	Пропионат ↑	Aguirre M. и соавт., 2016 [141]
Здоровые лица		<i>Bacteroides</i> ↑ <i>Bifidobacterium longum</i> ↑ <i>Faecalibacterium prausnitzii</i> ↑ <i>Clostridium perfringens</i> ↑	Пропионат ↑ Бутират ↑	Terpend K. и соавт., 2013 [140]
Здоровые лица*		<i>Bifidobacterium</i> ↑ <i>Clostridium coccoides-Eubacterium rectale</i> ↑	Ацетат ↑ Лактат ↓	Harris S. и соавт., 2020 [142]
Лица с ожирением		<i>Lactobacillus mucosae</i> ↑ <i>Enterococcus faecium</i> ↑ <i>Lactobacillus gasseri</i> ↑ <i>Bifidobacterium longum</i> ↓	Пропионат ↑	Aguirre M. и соавт., 2016 [141]
Пациенты с воспалительными заболеваниями кишечника (ВЗК)		<i>Bifidobacterium</i> spp. ↑ <i>Faecalibacterium prausnitzii</i> ↑ <i>Roseburia</i> sp. ↑ <i>Lactobacillus</i> spp. ↓	Ацетат ↑	Daguet D. и соавт., 2016 [143]

Примечание. * – в исследовании Harris S. и соавт. (2020) применялся пептид арабиногалактана из пшеничной муки.

На российском рынке представлены биологически активные добавки, содержащие комбинацию арабиногалактана лиственницы (в дозе около 5,5 г) и лактоферрина (примерно 50 мг). Метаболизация указанного количества арабиногалактана приводит к образованию порядка 2,5 г короткоцепочечных жирных кислот, оказывающих вышеописанные положительные эффекты на здоровье. Лактоферрин – многофункциональный белок, присутствующий в организме человека, обладающий антимикробной активностью за счет хелатирования железа, иммуностропным действием, влиянием на проницаемость кишечного барьера, а также способностью стимулировать рост некоторых бактерий-симбионтов [71, 72]. Таким образом, сочетание арабиногалактана и лактоферрина обеспечивает не только поступление физиологически обоснованной дозы пищевых волокон, но и синергическое действие, усиливающее пребиотический эффект.

В Институте химии и химической технологии СО РАН (г. Красноярск) проведены исследования, в результате которых из арабиногалактана лиственницы сибирской был синтезирован полиальдегид и получены гидрогелевые композиты с хитозаном и парааминобензойной кислотой. Спектральный анализ свидетельствует об образовании прочной сетчатой структуры – гидрогелей, способных к контролируемому высвобождению веществ, биосовместимых и биоразлагаемых. Такие гидрогели способны служить пребиотиками, стимулирующими рост полезной микрофлоры, и компонентами синбиотических препаратов, средств доставки терапевтических и диагностических агентов [73].

Диссертационная работа Алексеенко С. Н. (2006) продемонстрировала антиоксидантные свойства лиственничного арабиногалактана в условиях холодового стресса. В эксперименте на крысах установлено, что введение арабиногалактана в рацион снижает уровень малонового диальдегида (МДА), стабилизирует активность антиоксидантных ферментов – каталазы и супероксиддисмутазы, а также уменьшает степень повреждения клеточных мембран. Эти данные свидетельствуют о мембраностабилизирующем и цитопротективном потенциале вещества в условиях экстремальных температурных воздействий [74].

В статье Коновалова А. Ю., Буторина Н. В. (2019) [75] подчеркивается, что арабиногалактан, получаемый из древесины лиственницы (в частности, видов *Larix sibirica* и *Larix gmelinii*), является высокомолекулярным полисахаридом с доказанными иммуномодулирующими, антиоксидантными, гипохолестеринемическими и пребиотическими свойствами. Он устойчив к воздействию желудочного и панкреатического сока, не всасывается в тонком кишечнике, полностью достигая толстой кишки, где используется как субстрат симбиотной микрофлоры с образованием короткоцепочечных жирных кислот, включая бутират. Это способствует нормализации микробиома и активации локального и системного иммунного ответа. Особый акцент в статье сделан на применении арабиногалактана в косметологии, где он проявляет увлажняющие, защитные и антиоксидантные свойства. Указано, что за счет своей способности удерживать воду и образовывать на поверхности кожи тонкую полимерную пленку он улучшает барьерную функцию кожи, способствует заживлению микроразрывов и уменьшает трансэпидермальную потерю влаги. Также сообщается о способности снижать чувствительность кожи и уменьшать выраженность воспалительных реакций. Это делает арабиногалактан востребованным компонентом в составе эмульсий, сывороток и гелей для чувствительной и зрелой кожи.

В эксперименте Решетник Е. И. и соавт. (2010) [76] по обогащению кисломолочного продукта в качестве объекта использовалось обезжиренное молоко, заквашенное культурами термофильных стрептококков и бифидобактерий. Арабиногалактан вносился в дозировках 1,5 и 2,5 % от массы молока. Сбраживание проводилось в течение 6 ч при температуре 30 °С. Оптимальный результат был достигнут при одновременном внесении арабиногалактана и закваски в дозе 2,5 %, что обеспечило равномерную густую консистенцию готового продукта и отсутствие отделения сыворотки. Арабиногалактан проявил выраженные пребиотические свойства, способствуя росту бифидо- и лактобактерий. Совместное использование с пробиотическими культурами обеспечивало синбиотический эффект, что усиливало биологическую ценность продукта. Введение арабиногалактана не оказывало от-

рицательного влияния на органолептические характеристики, а напротив, улучшало их. С технологической точки зрения введение арабиногалактана на стадии сквашивания поддерживало стабильность структуры и микрофлоры. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования арабиногалактана в составе функциональных молочных продуктов пробиотической направленности. Кроме того, применение таких продуктов может быть перспективным в рамках диетического, геронтологического и детского питания, а также для расширения ассортимента функциональных продуктов, включая йогурты, творожные десерты и кисломолочные напитки.

Заключение

Пребиотические волокна, в том числе арабиногалактан, играют ключевую роль в регуляции физиологических процессов организма, опосредованно – через метаболиты кишечной микробиоты, такие как короткоцепочечные жирные кислоты, и напрямую – посредством взаимодействия с компонентами иммунной системы и клеточными рецепторами. Они способны модулировать состав микробиоты, усиливать синтез КЖК, оказывать антиоксидантное, метаболическое и иммуностропное воздействие, улучшать барьерные функции кишечника и влиять на работу центральной нервной системы через ось «микробиота – кишечник – мозг».

Арабиногалактан, как представитель растворимых пищевых волокон, выделяется высокой степенью ферментируемости симбиотной микрофлорой человека, биосинтезом преимущественно бутирата и ацетата, а также возможностью прямого иммунного воздействия через М-клетки и лимфоидную ткань кишечника. Его биодоступность, низкая токсичность и способность улучшать органолептические и структурные характеристики пищевых продуктов делают его перспективным компонентом в составе функционального и профилактического питания.

Российские исследования подтверждают международные данные, демонстрируя пребиотическую, антиоксидантную и иммуномодулирующую активность лиственничного арабиногалактана в различных модельных и прикладных системах. В частности, доказано, что он способствует росту бифидо- и лактобактерий, стабилизирует антиоксидантную защиту организма в условиях стрессовых нагрузок, оказывает положительное влияние на липидный и углеводный обмен. Также продемонстрирована его эффективность в составе кисломолочных продуктов и при использовании в геронтологическом и диетическом питании.

Таким образом, арабиногалактан лиственницы сибирской представляет собой многофункциональный биологически активный компонент с широким спектром физиологических эффектов, соответствующий современным требованиям, предъявляемым к нутрицевтикам и функциональным ингредиентам. Он может быть использован для дальнейшего применения в клинической практике, нутрициологической профилактике, пищевой

и фармацевтической промышленности, в том числе как структурная основа для синбиотических формул и инновационных средств доставки биоактивных веществ.

Список литературы / References

- Kim CH. Immune regulation by microbiome metabolites. *Immunology* 2018 Jun; 154 (2): 220–229. DOI: 10.1111/imm.12930
- Davani-Davari D, Negahdaripour M, Karimzadeh I, Seifan M, Mohkam M, Masoumi SJ, Berenjian A, Ghasemi Y. Prebiotics: Definition, Types, Sources, Mechanisms, and Clinical Applications. *Foods*. 2019 Mar 9; 8 (3): 92. DOI: 10.3390/foods8030092
- Hu FB, Rimm EB, Stampfer MJ, Ascherio A, Spiegelman D, Willett WC. Prospective study of major dietary patterns and risk of coronary heart disease in men. *Am J Clin Nutr*. 2000 Oct; 72 (4): 912–21. DOI: 10.1093/ajcn/72.4.912. PMID: 11010931
- Van Dam RM, Rimm EB, Willett WC, Stampfer MJ, Hu FB. Dietary patterns and risk for type 2 diabetes mellitus in U.S. men. *Ann Intern Med*. 2002 Feb 5; 136 (3): 201–9. DOI: 10.7326/0003-4819-136-3-200202050-00008
- Strate LL, Keeley BR, Cao Y, Wu K, Giovannucci EL, Chan AT. Western Dietary Pattern Increases, and Prudent Dietary Pattern Decreases, Risk of Incident Diverticulitis in a Prospective Cohort Study. *Gastroenterology*. 2017 Apr; 152 (5): 1023–1030.e2. DOI: 10.1053/j.gastro.2016.12.038
- Christ A, Lauterbach M, Latz E. Western Diet and the Immune System: An Inflammatory Connection. *Immunity* 2019; 51: 794–811. DOI: 10.1016/j.immuni.2019.09.020
- Larrosa S, Luque V, Grote V, Closa-Monasterolo R, Ferré N, Koletzko B, Verdúci E, Gruszfeld D, Xhonneux A, Escribano J. Fibre Intake Is Associated with Cardiovascular Health in European Children. *Nutrients*. 2021; 13 (1): 12. DOI: 10.3390/nu13010012
- Dinan TG, Cryan JF. The Microbiome-Gut-Brain Axis in Health and Disease. *Gastroenterol. Clin. N. Am.* 2017; 46: 77–89. DOI: 10.1016/j.gtc.2016.09.007
- Lovegrove A, Edwards CH, De Noni I, Patel H, El SN, Grassby T, Zielke C, Ullmuis M, Nilsson L, Butterworth PJ, Ellis PR, Shewry PR. Role of polysaccharides in food, digestion, and health. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2017 Jan 22; 57 (2): 237–253. DOI: 10.1080/10408398.2014.939263
- O'Grady J, O'Connor EM, Shanahan F. Review article: dietary fibre in the era of microbiome science. *Aliment Pharmacol Ther*. 2019 Mar; 49 (5): 506–515. DOI: 10.1111/apt.15129
- McRorie JW Jr, McKeown NM. Understanding the Physics of Functional Fibers in the Gastrointestinal Tract: An Evidence-Based Approach to Resolving Enduring Misconceptions about Insoluble and Soluble Fiber. *J Acad Nutr Diet*. 2017 Feb; 117 (2): 251–264. DOI: 10.1016/j.jand.2016.09.021
- Gill SK, Rossi M, Bajka B, Whelan K. Dietary fibre in gastrointestinal health and disease. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2021 Feb; 18 (2): 101–116. DOI: 10.1038/s41575-020-00375-4
- Koh A, De Vadder F, Kovatcheva-Datchary P, Bäckhed F. From Dietary Fiber to Host Physiology: Short-Chain Fatty Acids as Key Bacterial Metabolites. *Cell*. 2016 Jun 2; 165 (6): 1332–1345. DOI: 10.1016/j.cell.2016.05.041
- Tandon D, Haque MM, Gote M, Jain M, Bhaduri A, Dubey AK, Mande SS. A prospective randomized, double-blind, placebo-controlled, dose-response relationship study to investigate efficacy of fructo-oligosaccharides (FOS) on human gut microflora. *Sci Rep*. 2019 Apr 2; 9 (1): 5473. DOI: 10.1038/s41598-019-41837-3
- Yang XD, Wang LK, Wu HY, Jiao L. Effects of prebiotic galacto-oligosaccharide on postoperative cognitive dysfunction and neuroinflammation through targeting of the gut-brain axis. *BMC Anesthesiol*. 2018; 18 (7): 177. DOI: 10.1186/s12871-018-0642-1
- Song X, Zhong L, Liu N, Liu F, Li B, Hao Y, Xue Y, Li J, Feng Y, Ma Y, Hu Y, Zhu B. Inulin Can Alleviate Metabolism Disorders in ob/ob Mice by Partially Restoring Leptin-related Pathways Mediated by Gut Microbiota. *Genomics Proteomics Bioinformatics*. 2019 Feb; 17 (1): 64–75. DOI: 10.1016/j.gpb.2019.03.001
- Holscher HD, Bauer LL, Gouinani V, Pelkman CL, Fahey GC Jr, Swanson KS. Agave Inulin Supplementation Affects the Fecal Microbiota of Healthy Adults Participating in a Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled, Crossover Trial. *J Nutr*. 2015 Sep; 145 (9): 1225–32. DOI: 10.3945/jn.115.217331
- Shen RL, Dang XY, Dong JL, Hu XZ. Effects of oat β -glucan and barley β -glucan on fecal characteristics, intestinal microflora, and intestinal bacterial metabolites in rats. *J Agric Food Chem*. 2012 Nov 14; 60 (45): 11301–8. DOI: 10.1021/jf302824h
- Mao G, Li S, Orfila C, Shen X, Zhou S, Linhardt RJ, Ye X, Chen S. Depolymerized RG-I-enriched pectin from citrus segment membranes modulates gut microbiota, increases SCFA production, and promotes the growth of *Bifidobacterium* spp., *Lactobacillus* spp., and *Faecalibaculum* spp. *Food Funct*. 2019 Dec 11; 10 (12): 7828–7843. DOI: 10.1039/c9fo01534e
- Beukema M, Akkerman R, Jermendi É, Koster T, Laskewitz A, Kong C, Schols HA, Faas MM, de Vos P. Pectins that Structurally Differ in the Distribution of Methyl-Esters Attenuate *Citrobacter rodentium*-Induced Colitis. *Mol Nutr Food Res*. 2021 Oct; 65 (19): e2100346. DOI: 10.1002/mnfr.202100346
- Calame W, Weseler AR, Viebke C, Flynn C, Siemensma AD. Gum arabic establishes prebiotic functionality in healthy human volunteers in a dose-dependent manner. *Br J Nutr*. 2008 Dec; 100 (6): 1269–75. DOI: 10.1017/S0007114508981447
- Rawi MH, Abdullah A, Ismail A, Sarbini SR. Manipulation of Gut Microbiota Using Acacia Gum Polysaccharide. *ACS Omega*. 2021 Jul 2; 6 (28): 17782–17797. DOI: 10.1021/acsomega.1c00302
- Guan Z-W, Yu E-Z, Feng Q. Soluble Dietary Fiber, One of the Most Important Nutrients for the Gut Microbiota. *Molecules*. 2021; 26 (22): 6802. DOI: 10.3390/molecules26226802
- Singh RP. Glycan utilisation system in Bacteroides and Bifidobacteria and their roles in gut stability and health. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2019 Sep; 103 (18): 7287–7315. DOI: 10.1007/s00253-019-10012-z
- Flint HJ, Scott KP, Duncan SH, Louis P, Forano E. Microbial degradation of complex carbohydrates in the gut. *Gut Microbes*. 2012 Jul-Aug; 3 (4): 289–306. DOI: 10.4161/gmic.19897
- Dallie B, Van Oudenhove L, Vervliet B, Verbeke K. The role of short-chain fatty acids in microbiota-gut-brain communication. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*. 2019 Aug; 16 (8): 461–478.
- Van der Hee B, Wells JM. Microbial Regulation of Host Physiology by Short-chain Fatty Acids. *Trends Microbiol*. 2021 Aug; 29 (8): 700–712. DOI: 10.1016/j.tim.2021.02.001
- Hu J, Lin S, Zheng B, Cheung PCK. Short-chain fatty acids in control of energy metabolism. *Crit Rev Food Sci Nutr*. 2018 May 24; 58 (8): 1243–1249. DOI: 10.1080/10408398.2016.1245650
- Kim CH. Control of lymphocyte functions by gut microbiota-derived short-chain fatty acids. *Cell Mol Immunol*. 2021 May; 18 (5): 1161–1171. DOI: 10.1038/s41423-020-00625-0
- Zhang D, Jian YP, Zhang YN, Li Y, Gu LT, Sun HH, Liu MD, Zhou HL, Wang YS, Xu ZX. Short-chain fatty acids in diseases. *Cell Commun Signal*. 2023 Aug 18; 21 (1): 212. DOI: 10.1186/s12964-023-01219-9

31. Derrien M, Vaughan EE, Plugge CM, de Vos WM. *Akkermansia muciniphila* gen. nov., sp. nov., a human intestinal mucin-degrading bacterium. *Int J Syst Evol Microbiol*. 2004 Sep; 54 (Pt 5): 1469–1476. DOI: 10.1099/ijs.0.02873-0
32. Louis P, Hold GL, Flint HJ. The gut microbiota, bacterial metabolites and colorectal cancer. *Nat Rev Microbiol*. 2014 Oct; 12 (10): 661–72. DOI: 10.1038/nrmicro3344
33. Louis P, Young P, Holtrop G, Flint HJ. Diversity of human colonic butyrate-producing bacteria revealed by analysis of the butyryl-CoA: acetate CoA-transferase gene. *Environ Microbiol*. 2010 Feb; 12 (2): 304–14. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2009.02066.x
34. Morrison D.J., Preston T. Formation of short chain fatty acids by the gut microbiota and their impact on human metabolism. *Gut Microbes*. 2016; 7 (3): 189–200. DOI: 10.1080/19490976.2015.1134082
35. Ze X., Duncan S.H., Louis P., Flint H.J. *Ruminococcus bromii* is a keystone species for the degradation of resistant starch in the human colon. *ISME J*. 2012; 6 (8): 1535–1543. DOI: 10.1038/ismej.2012.4
36. So D., Whelan K., Rossi M., Morrison M., Holtmann G., Kelly J.T., Shanahan E.R., Staudacher H.M., Campbell K.L. Dietary fiber intervention on gut microbiota composition in healthy adults: a systematic review and meta-analysis. *Am. J. Clin. Nutr*. 2018; 107 (6): 965–983. DOI: 10.1093/ajcn/nqy041
37. Kim C.H., Park J., Kim M. Gut microbiota-derived short-chain fatty acids, T cells, and inflammation. *Immune Netw*. 2014; 14 (6): 277–288. DOI: 10.4110/in.2014.14.6.277
38. Kim M., Kim C.H. Regulation of humoral immunity by gut microbial products. *Gut Microbes*. 2017; 8 (4): 392–399. DOI: 10.1080/19490976.2017.1299311
39. Kasubuchi M., Hasegawa S., Hiramatsu T., Ichimura A., Kimura I. Dietary gut microbial metabolites, short-chain fatty acids, and host metabolic regulation. *Nutrients*. 2015; 7 (4): 2839–2849. DOI: 10.3390/nu7042839
40. Miller T.L., Wolin M.J. Pathways of acetate, propionate, and butyrate formation by the human fecal microbial flora. *Appl. Environ. Microbiol*. 1996; 62 (5): 1589–1592. DOI: 10.1128/aem.62.5.1589-1592.1996
41. Kimura I., Ichimura A., Ohue-Kitano R., Igarashi M. Free fatty acid receptors in health and disease. *Physiol. Rev*. 2020; 100 (1): 171–210. DOI: 10.1152/physrev.00041.2018
42. Offermanns S. Hydroxy-carboxylic acid receptor actions in metabolism. *Trends Endocrin. Metab*. 2017; 28 (3): 227–236. DOI: 10.1016/j.tem.2016.11.007
43. He J., Zhang P., Shen L., Niu L., Tan Y., Chen L., Zhao Y., Bai L., Hao X., Li X., Zhang S., Zhu L. Short-chain fatty acids and their association with signalling pathways in inflammation, glucose and lipid metabolism. *Int. J. Mol. Sci*. 2020; 21 (17): Article ID 6356. DOI: 10.3390/ijms21176356
44. Milligan G., Stoddart L.A., Smith N.J. Agonism and allostery: the pharmacology of the free fatty acid receptors FAA2 and FAA3. *Br. J. Pharmacol*. 2009; 158 (1): 146–153. DOI: 10.1111/j.1476-5381.2009.00421.x
45. Saeidi S., Petera B., Pierre G., Fenoradosa T.A., Djomdi D., Michaud P., Delattre C. Plants arabinogalactans: From structures to physico-chemical and biological properties. *Biotechnol. Adv.* 2021; 53: Article ID 107771. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2021.107771
46. Seifert G.J., Roberts K. The biology of arabinogalactan proteins. *Annu. Rev. Plant Biol*. 2007; 58: 137–161. DOI: 10.1146/annurev.arplant.58.032806.103801
47. D'Adamo P. Larch arabinogalactan. *J. Naturopath. Med*. 1996; 6: 33–37.
48. Dion C., Chappuis E., Ripoll C. Does larch arabinogalactan enhance immune function? A review of mechanistic and clinical trials. *Nutr. Metab. (Lond.)*. 2016; 13: 28. DOI: 10.1186/s12986-016-0086-x
49. Voragen A.G.J., Coenen G.J., Verhoef R.P., Schols H.A. Pectin, a versatile polysaccharide present in plant cell walls. *Struct. Chem*. 2009; 20: 263–275. DOI: 10.1007/s11224-009-9442-z
50. Carpita N., McCann M. The cell wall. In: Buchanan B.B., Gruissem W., Jones R.L. (Eds.), *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. New Jersey: Wiley Blackwell. 2015. P. 52–108.
51. Clarke A.E., Anderson R.L., Stone B.A. Form and function of arabinogalactans and arabinogalactan-proteins. *Phytochemistry*. 1979; 18 (4): 521–540. DOI: 10.1016/S0031-9422 (00) 84255-7
52. Sinha A.K., Kumar V., Makkar H.P.S., De Boeck G., Becker K. Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition – A review. *Food Chem*. 2011; 127 (4): 1409–1426. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.02.042
53. Shewalter A.M. Structure and function of plant cell wall proteins. *Plant Cell*. 1993; 5 (1): 9–23. DOI: 10.1105/tpc.5.1.9
54. Ellis M., Egelund J., Schultz C.J., Bacic A. Arabinogalactan-proteins: key regulators at the cell surface? *Plant Physiol*. 2010; 153 (2): 403–419. DOI: 10.1104/pp.110.156000
55. Grube B., Stier H., Riede L., Gruenwald J. Tolerability of a proprietary larch arabinogalactan extract: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial in healthy subjects. *Food Nutr. Sci*. 2012; 3 (11): 1533–1538. DOI: 10.4236/fns.2012.311200
56. Goellner E.M., Utermohlen J., Kramer R., Classen B. Structure of arabinogalactan from *Larix laricina* and its reactivity with antibodies directed against type-II-arabinogalactans. *Carbohydr. Polym*. 2011; 86 (1): P. 1739–1744. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.07.006
57. Tsvileva O., Pozdnyakov A., Ivanova A. Polymer nanocomposites of selenium biofabricated using fungi. *Molecules*. 2021; 26 (12): Article ID 3657. DOI: 10.3390/molecules26123657
58. Nazareth M., Kennedy C., Bhatia V. Studies on larch arabinogalactan. *I. J. Pharm. Sci*. 1961; 50 (7): 560–563.
59. Semerikov V.L., Lascoux M. Genetic relationship among Eurasian and American *Larix* species based on allozymes. *Heredity (Edinb)*. 1999; 83 (Pt 1): 62–70. DOI: 10.1038/sj.hdy.6885310
60. Vince A.J., McNeil N.L., Wager J.D., Wong O.M. The effect of lactulose, pectin, arabinogalactan and cellulose on the production of organic acids and metabolism of ammonia by intestinal bacteria in a faecal incubation system. *Br. J. Nutr*. 1990; 63 (1): P. 17–26. DOI: 10.1079/bjn19900088
61. Prynne C.J., Southgate D.A.T. The effects of a supplement of dietary fiber on faecal excretion by human subjects. *Br. J. Nutr*. 1979; 41 (3): 495–503. DOI: 10.1079/BJN19790064
62. Macfarlane S., Macfarlane G.T. Regulation of short-chain fatty acid production. *Proc. Nutr. Soc*. 2003; 62 (1): 67–72. DOI: 10.1079/PNS2002207
63. Kim L.S., Burkholder P.M., Waters R.F. Effects of low-dose larch arabinogalactan from *Larix occidentalis*: a randomized, double-blind, placebo-controlled pilot study. *Complement. Health Pract. Rev*. 2002; 7 (3): 221–229. DOI: 10.1177/1533210200700305
64. Yamashita A., Ohtsuka H., Maeda H. Intestinal absorption and urinary excretion of antilump peptide mannans KS-2 after oral administration in rats. *Immunopharmacology*. 1983; 5 (3): 209–220.
65. Terpend K., Possemiers S., Daguet D., Marzorati M. Arabinogalactan and fructo-oligosaccharides have a different fermentation profile in the Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem (SHIME®). *Environ. Microbiol. Rep*. 2013; 5 (4): 595–603. DOI: 10.1111/1758-2229.12056
66. Aguirre M., Bussolo de Souza C., Venema K. The gut microbiota from lean and obese subjects contribute differently to the fermentation of arabinogalactan and inulin. *PLoS One*. 2016; 11 (7): e0159236. DOI: 10.1371/journal.pone.0159236
67. Harris S., Powers S., Monteagudo-Mera A., Kosik O., Lovegrove A., Shewry P., Charalampopoulos D. Determination of the prebiotic activity of wheat arabinogalactan peptide (AGP) using batch culture fermentation. *Eur. J. Nutr*. 2020; 59 (1): 297–307. DOI: 10.1007/s00394-019-01908-7
68. Daguet D., Pinheiro I., Verhelst A., Possemiers S., Marzorati M. Arabinogalactan and fructooligosaccharides improve the gut barrier function in distinct areas of the colon in the Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem. *J. Funct. Foods*. 2016; 20: 369–379. DOI: 10.1016/j.jff.2015.11.005
69. Li S., Hu J., Yao H., Geng F., Nie S. Interaction between four galactans with different structural characteristics and gut microbiota. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*. 2023; 63 (19): 3653–3663. DOI: 10.1080/10408398.2021.1992605
70. Бабкин В.А., Медведева Е.Н., Самбуева З.Г., Хобракова В.Б., Неверова Н.А., Суюнчева Б.О., Татсий А.А. Медико-биологические свойства функциональных пищевых продуктов с арабиногалактаном лиственницы. *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2012; 2 (3): 85–89.
71. Babin V.A., Medvedeva E.N., Sambueva Z.G., Khobrakova V.B., Neverova N.A., Suyuncheva B.O., Tatsiy A.A. Medical and biological properties of functional food products with larch arabinogalactan. *News of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2012; 2 (3): 85–89. (In Russ.).
72. Conesa C., Bellés A., Grasa L., Sánchez L. The role of lactoferrin in intestinal health. *Pharmaceutics*. 2023; 15 (6): Article ID 1569. DOI: 10.3390/pharmaceutics15061569
73. Cao X., Ren Y., Lu Q., Wang K., Wu Y., Wang Y., Zhang Y., Cui X.S., Yang Z., Chen Z. Lactoferrin: a glycoprotein that plays an active role in human health. *Front. Nutr*. 2023; 9: Article ID 1018336. DOI: 10.3389/fnut.2022.1018336
74. Туник Т.В., Немченко У.М., Ганенко Т.В. [и др.] Синтез и спектральная характеристика новых биоразлагаемых производных арабиногалактана для диагностики и терапии. *Известия Российской академии наук. Серия Физическая*. 2019; 83 (3): 408–414.
75. Tunk T.V., Nemchenko U.M., Ganenko T.V. [et al.] Synthesis and spectral characterization of new biodegradable arabinogalactan derivatives for diagnostics and therapy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*. 2019; 83 (3): 408–414. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0367676519030268
76. Алексеев С.Н. Антиоксидантные свойства арабиногалактана в условиях холодового стресса: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Барнаул, 2006. 23 с.
77. Alekseenko S.N. Antioxidant properties of arabinogalactan under cold stress conditions: author's abstract. dis. ... candidate of biological sciences. Barnaul, 2006. 23 p. (In Russ.).
78. Коновалова А.Ю., Буторина Н.В. Арабиногалактан лиственницы сибирской, его уникальные свойства и применение. *Вестник ИРГАУ*. 2019; 3 (83): 127–132.
79. Konovalova A. Yu., Butorina N.V. Arabinogalactan of Siberian larch, its unique properties and application. *Bulletin of IRSAU*. 2019; 3 (83): 127–132. (In Russ.).
80. Решетник Е.И., Уточкина Е.А., Пакушина А.П. Исследование возможности обогащения кисломолочных продуктов пищевой добавкой («Лавитол-арабиногалактан»). *Техника и технология пищевых производств*. 2010; 2 (17).
81. Reshetnik E.I., Utchokina E.A., Pakusina A.P. Study of the possibility of enriching fermented milk products with the food additive («Lavitol-arabinogalactan»). *Equipment and technology of food production*. 2010; 2 (17). (In Russ.).

Статья поступила / Received 20.06.2025

Получена после рецензирования / Revised 27.06.2025

Принята в печать / Accepted 01.07.2025

Сведения об авторе

Бурляева Екатерина Александровна, к.м.н., зав. консультативно-диагностическим центром («Здоровое и спортивное питание»), доцент кафедры гигиены питания и токсикологии³, зав. лабораторией экстремальной нутрициологии и прикладных пищевых технологий³. ORCID: 0000-0001-9290-0185

¹ ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания и биотехнологии», Москва, Россия

² ФGAУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Россия

³ ФГБУН Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Москва, Россия

Для переписки: Бурляева Екатерина Александровна. E-mail: vrach1708@gmail.com

About author

Burlyayeva Ekaterina A., PhD Med, head of Consultative and Diagnostic Center "Healthy and Sports Nutrition"¹, associate professor at Dept of Nutrition Hygiene and Toxicology², head of the Laboratory of Extreme Nutrition and Applied Food Technologies³. ORCID: 0000-0001-9290-0185

¹ Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

³ State Scientific Center of the Russian Federation Institute of Medical and Biological Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

For correspondence: Burlyayeva Ekaterina A. E-mail: vrach1708@gmail.com

Для цитирования: Бурляева Е.А. Пребиотик арабиногалактан: физиологические эффекты, механизмы действия и потенциала клинического применения. *Медицинский алфавит*. 2025; (19): 86–93. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-19-86-93>

For citation: Burlyayeva E.A. Arabinogalactan as a prebiotic: physiological effects, mechanisms of action, and clinical application potential. *Medical alphabet*. 2025; (19): 86–93. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-19-86-93>