

Микронутриенты и кишечный микробиом: двунаправленное взаимодействие

В. М. Коденцова¹, Д. В. Рисник²

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

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», биологический факультет, Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Обзор литературы за последние годы осуществляли по базам данных РИНЦ, Google Scholar, Pubmed, ReserchGate.

Цель обзора – характеристика влияния микронутриентов рациона на микробиом кишечника и оценка роли микробиома в обеспечении организма хозяина микронутриентами.

Результаты. Примерно половина (40–65%) всех видов бактерий-прототрофов, населяющих кишечник, способны синтезировать все витамины группы В и являются донорами для бактерий ауксотрофов. Только четыре витамина (В₆, фолат, В₁₂, ниацин) могут вырабатываться в количествах, составляющих около 25% от физиологической потребности человека, однако отсутствие транспортеров для витамина В₁₂ в толстой кишке делает его недоступным для организма хозяина. Менахиноны (витамин К₂), синтезированные кишечными бактериями, не попадают в системный кровоток, что не исключает их локального действия на эпителий кишечника. Недостаток микронутриентов (витамин А, фолаты, железо, цинк) в питании хозяина нарушает состав и функции кишечной микробиоты, прием витаминов (группы В, С, D, E) улучшает состав микробиома. Избыточное потребление некоторых витаминов приводит к попаданию их в толстый кишечник, где они оказывают благотворное влияние на количество и разнообразие бактерий. Микро- и макроэлементы необходимы для обеспечения жизнеспособности представителей микробиоты кишечника, которая также необходима для поддержания оптимального элементного гомеостаза хозяина. Прием пребиотиков (растворимых пищевых волокон) улучшает биодоступность железа, кальция и других минеральных веществ.

Вывод. Микроорганизмы, населяющие желудочно-кишечный тракт человека, двунаправленно взаимодействуют с микронутриентами, входящими в состав рациона, что влияет, с одной стороны, на видовое разнообразие и функции микроорганизмов, а с другой – микробиом влияет на всасывание и биодоступность микронутриентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микробиом кишечника, витамины, макроэлементы, микроэлементы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исследование выполнено в рамках темы № FGMF-2022-0002.

Micronutrients and the gut microbiome: a bidirectional interaction

V. M. Kodentsova¹, D. V. Risnik²

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

² Moscow State University M. V. Lomonosov, Moscow, Russia

SUMMARY

A review of the literature in recent years was carried out using the RSCI, Google Scholar, Pubmed, and ResearchGate databases.

The purpose of the review was characterization of the influence of dietary micronutrients on the intestinal microbiome and assessment of the role of the microbiome in providing the host with micronutrients.

Results. Approximately half (40–65%) of all types of prototrophic bacteria inhabiting the intestine are capable of synthesizing all B vitamins and are donors for auxotrophic bacteria. Only four vitamins (B₆, folate, B₁₂, niacin) can be produced in quantities that represent about 25% of a person's physiological requirement, but the lack of transporters for the absorption of vitamin B₁₂ in the colon makes it unavailable to the host. Vitamin K (menaquinones) synthesized by intestinal bacteria does not enter the systemic circulation, which does not exclude their local effect on the intestinal epithelium. A lack of micronutrients (vitamin A, iron, zinc, folate) in the host's diet disrupts the composition and function of the intestinal microbiota; taking vitamins (groups B, C, D, E) improves the composition of the microbiome. Excessive consumption of some vitamins causes them to enter the large intestine, where they have a beneficial effect on the number and diversity of bacteria. Micro- and macroelements are necessary to ensure the viability of representatives of the intestinal microbiota, which is also necessary to maintain optimal elemental homeostasis. Taking prebiotics (soluble dietary fiber) improves the bioavailability of iron, calcium and other minerals.

Conclusion. Microorganisms inhabiting the human gastrointestinal tract bidirectionally interact with micronutrients included in the diet, which affects, on the one hand, the species diversity and functions of microorganisms, and on the other hand, the microbiome affects the absorption and bioavailability of micronutrients.

KEYWORDS: intestinal microbiome, vitamins, macroelements, microelements

CONFLICT OF INTERESTS. The authors declare no conflict of interest.

The study was carried out within the framework of topic No. FGMF-2022-0002.

Микробиота кишечника является неотъемлемым компонентом человеческого организма, и ее вклад в физиологию человека таков, что она условно считается самостоятельным органом. Микробиота кишечника млекопитающих представляет собой сложное сообщество бактерий, грибов, архей и вирусов, которые служат хозяину, обеспечивая многочисленные полезные функции, в том числе продукцию жизненно важных пищевых веществ, таких как ами-

нокислоты, короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК) и витамины. Кишечный микробиом содержит несколько бактериальных филотипов; самыми представленными являются *Bacteroides* и *Firmicutes*, которые составляют около 90% от всех видов микроорганизмов. Питание оказывает существенное влияние на структуру микробного сообщества и функции микробиома кишечника человека. У человека известно несколько родов бактерий, способных синтезировать

витамины группы В. Клостридии способны осуществлять синтез фолиевой кислоты, кобаламина, ниацина и тиамина, бифидобактерии – фолиевой кислоты, *Bacteroides* – рибофлавина, ниацина, пантотената и пиридоксина [1].

Цель обзора – характеристика влияния микронутриентов рациона на микробиом кишечника и оценка роли микробиома в обеспечении организма хозяина микронутриентами.

Объектами исследования являлись актуальные данные научных статей о взаимодействии кишечного микробиома и микронутриентов.

Методология. Базы данных и временные рамки. Обзор существующей по проблеме литературы преимущественно за последние 10 лет осуществляли по базам данных Pubmed, РИНЦ, Google Scholar и ReserchGate по парам ключевых слов: «Gut microbiome» («кишечный микробиом») и «vitamin» («витамин») или «microelement» («микроэлемент»). Поиск источников был ограничен периодом с 2015 по 2024 г., за редким исключением для более ранних статей, имеющих принципиальное значение. Во всех найденных статьях была изучена библиография с целью выявления дополнительных, не обнаруженных публикаций. Анализировали опубликованные в научных журналах оригинальные исследовательские и обзорные статьи на русском и английском языках.

Критерии включения и исключения источников. Критериями включения были статьи, в которых имеются данные о влиянии микронутриентов, поступающих с пищей, на микробиом кишечника и влиянии витаминов, синтезированных микробами, на обеспеченность организма хозяина, а также о роли микробиома в обеспечении организма хозяина минеральными веществами. Не рассматривали тезисы, опубликованные в сборниках материалов конференций, а также данные, касающиеся микробиома кожи, легких и других органов.

Синтез витаминов группы В кишечной микробиотой и его вклад в обеспеченность организма хозяина

Некоторые роды бактерий *Bifidobacterium*, *Bacteroides* и *Enterococcus*, обычно населяющие желудочно-кишечный тракт человека, способны к биосинтезу витамина К и витаминов группы В [2]. При оценке генома 256 бактерий кишечника человека было предсказано, что 40–65 % видов обладают путями биосинтеза всех восьми витаминов группы В (биотин, кобаламин, фолиевая кислота, ниацин, пантотенат, пиридоксин, рибофлавин и тиамин), поддерживая коэволюцию микробиома хозяина [3–5]. Путь синтеза *de novo* кобаламина имеется в геномах 42 % микроорганизмов толстой кишки, биотина – у 40 %, фолатов – у 43 %, рибофлавина – у 56 % [6]. Анализ *in silico* доступных эталонных геномов показал, что в среднем 20–30 % видов в микробных сообществах кишечника (по относительной численности) не имеют механизма для синтеза некоторых незаменимых витаминов группы В. Большинство предсказаний на основе исследования генома было подтверждено в опубликованных экспериментальных данных. Совместное культивирование пяти ауксотрофных по тиамину или фолату штаммов с различными прототрофными бактериями в отсутствие и в присутствии различных концентраций витаминов подтвердило, что действительно

между бактериями имеет место перекрестное питание [7]. Кишечные бактерии человека активно обмениваются витаминами группы В друг с другом, тем самым обеспечивая выживание микроорганизмов, которые не синтезируют любой из этих существенных кофакторов.

Витамины группы В, предшественники незаменимых метаболических кофакторов, вырабатываются *de novo* некоторыми кишечными бактериями (прототрофами), но для полного обеспечения потребностей организма человека и других видов бактерий-ауксотрофов витамины должны поступать и экзогенно [8]. Большая доля ауксотрофов витаминов группы В в микробиоте кишечника человека предполагает их сильную зависимость от экзогенного поступления этих микронутриентов из рациона и/или посредством синтрофного перераспределения между прототрофными и ауксотрофными видами.

Принципиальное различие между витаминами, получаемыми из пищи и вырабатываемыми кишечными бактериями, заключается в участке их всасывания. Большинство пищевых витаминов абсорбируются в тонком кишечнике, тогда как витамины, продуцируемые кишечными микробами, всасываются преимущественно в толстом кишечнике [9, 10]. При избыточном потреблении с пищей витамины группы В, не всосавшиеся в тонком кишечнике, поступают в дистальные отделы кишечника.

Хотя в слизистой оболочке толстой кишки человека обнаружены высокоаффинные транспортеры тиамин 1 и 2, способные переносить тиамин, данных о действительной важности поступления тиамин, синтезированного кишечной микробиотой, в дистальном отделе кишечника нет. Это подтверждается тем, что кормление мышей витамин В₁-дефицитной диетой вызывает дефицит витамина В₁ уже через неделю, что свидетельствует о том, что микробиота кишечника млекопитающих может синтезировать лишь минимальные количества тиамин. Исходя из внутриклеточной концентрации витаминов, массы бактерий и состава микробиоты кишечника человека, теоретически был рассчитан вклад синтезированных микроорганизмами витаминов в обеспечение суточной потребности человека в витаминах группы В (табл. 1) [3, 6].

Таблица 1

Предполагаемая максимальная доля (в % от рекомендуемого суточного поступления – РНП) витаминов группы В, которая может быть обеспечена синтезом кишечной микробиотой [3]

Витамин	% РНП	Витамин	% РНП
В ₆	86	В ₁	2,3
Фолат	37	В ₂	2,8
В ₁₂	31	Биотин	4,5
Ниацин	27	Пантотенат	0,008

Таким образом, было спрогнозировано, что только четыре из восьми витаминов группы В могут вырабатываться в количествах, покрывающих не менее 25 % от РНП человека. Авторы подчеркивают, что рассчитанные величины являются умозрительными и могут не вполне отражать истинное количество витаминов группы В, производимых кишечной микробиотой человека [11].

Однако для того, чтобы витамины были полностью доступны организму, биосинтез *de novo* витаминов обязательно должен происходить в желудочно-кишечном тракте

выше участка их всасывания. Отсутствие транспортеров для всасывания витамина B_{12} в толстой кишке делает его недоступным для хозяина [12]. В то же время пищевой витамин B_{12} , не всосавшийся в подвздошной кишке, может достигать толстой кишки, где кишечные бактерии утилизируют неабсорбированный витамин B_{12} [13]. С этой точки зрения, поскольку витамин B_{12} может всасываться только на уровне подвздошной кишки, микроорганизмы, продуцирующие кобаламин в толстом кишечнике, вряд ли способствуют его фактической биодоступности для человека [2].

Вклад биотина бактериального происхождения в обеспечение организма этим витамином точно не установлен. Однако, учитывая, что колоноциты толстого кишечника обладают эффективным механизмом усвоения биотина, опосредованным переносчиками, и что в толстом кишечнике содержимое остается относительно дольше, чем в тонком кишечнике, разумно предположить, что этот источник витамина представляет определенную пищевую ценность для организма хозяина, особенно для колоноцитов, расположенных на этом участке [11].

Не вызывает сомнения, что витамины группы В, вырабатываемые микробиотой кишечника, по всей видимости, играют специфическую роль для поддержания состава и/или функций кишечного микробиома [6]. Кишечные микробы человека синтезируют витамины группы В и обеспечивают ими соседние бактерии посредством симбиотических отношений.

Наличие большой доли ауксотрофов витаминов группы В в микробиоте кишечника человека предполагает их сильную зависимость от экзогенного поступления этих микронутриентов из рациона и/или посредством синтрофного распределения между прототрофными и ауксотрофными видами [14]. Некоторые прототрофные виды выступают эффективными донорами витаминов группы В для удовлетворения потребности значительной части кишечных ауксотрофов, являясь факторами совместного роста кишечных бактерий. Другими словами, кишечные бактерии, способные синтезировать витамины группы В, являются продуцентами, а бактерии, которые не могут производить витамины группы В, но нуждаются в них для поддержания своих нормальных физиологических функций, относятся к потребителям витаминов группы В. В дистальном отделе толстой кишки витамины группы В, не всосавшиеся из пищи, а также получаемые из микробиоты, вносят определенный небольшой вклад в обеспечение потребности хозяина, и хозяин может в некоторой степени извлечь выгоду из биосинтеза витаминов группы В микробиотой. Таким образом, разные представители кишечной микробиоты могут быть как поставщиком витаминов, которые всасываются в толстом кишечнике человека, так и конкурентом для хозяина. Роль кишечной микробиоты определяется балансом между производителями и потребителями витаминов группы В. Дефицит витаминов группы В или, наоборот, их дополнительный прием могут влиять на рост конкретных бактерий, что приводит к изменениям в составе и функции кишечной микробиоты [15]. По мнению некоторых авторов, витамины группы В при поступлении в избыточных количествах или посредством систем доставки, нацеленных на толстую кишку, могут напрямую модулировать микробиом толстой кишки [5].

Витамины группы В поступают с пищей прежде всего для удовлетворения суточных потребностей хозяина, а также в какой-то мере для питания микробиоты кишечника. Витаминов, синтезируемых бактериями кишечника, недостаточно для удовлетворения потребностей хозяина и кишечной микробиоты. В условиях неоптимального питания возникает конкуренция между кишечными микроорганизмами и хозяином, а также микроорганизмов между собой, что создает риск нехватки витаминов в кишечнике [16].

Реальный вклад витаминов, синтезируемых в кишечнике, на уровень циркулирующих в плазме крови витаминов организма хозяина еще предстоит установить экспериментально как у здоровых лиц, так и при различных патологических состояниях, поскольку, например, при ожирении наблюдается изменение количества и разнообразия микроорганизмов кишечника [6].

Синтез витамина К кишечной микробиотой

Витамины К представляют собой семейство жирорастворимых витаминов, которые имеют общую структуру в виде нафтохинонового кольца, но отличаются длиной и насыщенностью присоединенной к нему липофильной боковой цепи. Филлохинон (витамин K_1) синтезируется растениями, является преобладающей формой витамина К в рационе питания человека. Менахинон-4 (МК₄, где *n* обозначает количество изопrenoидных звеньев в боковой цепи) отличается от филлохинона тем, что имеет ненасыщенную боковую цепь, эндогенно синтезируется млекопитающими путем превращения филлохинона или менадиона и содержится в некоторых продуктах животного происхождения. Формы менахинона с более длинными боковыми цепями, длина которых варьирует от 5 (МК₅) до 13 (МК₁₃), синтезируются бактериями. Менахиноны бактериального происхождения содержатся в некоторых ферментированных пищевых продуктах (сброженные соевые бобы, квашеная капуста), молочных продуктах и мясе [17]. Все известные витамины К обладают общей биологической активностью как кофакторы фермента γ -глутаматкарбоксилазы, ответственного за активацию (карбоксилирование) множества витамин К-зависимых белков.

Менахиноны вырабатываются кишечными бактериями *Firmicutes*, *Actinobacteria* и *Bacteroidetes* [18]. Для определения вклада микробиома кишечника в обеспечение витаминами организма хозяина в качестве модели служат безмикробные грызуны [10]. При исключении из корма таких животных витаминов было установлено, что продукция витаминов микробами, по крайней мере частично, способствует витаминному гомеостазу хозяина. У безмикробных крыс развивается дефицит витамина К, приводящий к гибели животных. Вызвать у крыс алиментарный дефицит витамина К (путем исключения этого витамина из корма) можно только при условии предотвращения копрофагии [19].

Для оказания прямого биологического действия витамины должны всосаться в кишечнике. В недавнем рандомизированном исследовании с участием 80 мужчин и женщин в постменопаузе, потреблявших в течение 8 нед. рацион, содержащий на 1000 ккал 16 г пищевых волокон за счет цельнозерновых продуктов или 8 г добавленных пищевых волокон, были параллельно измерены концентрации менахинонов в кале и сыворотке крови, а также исследован

состав микробиоты кала [20]. Аналитически определенное содержание витамина K₁, МК9, МК12 и МК13 в рационе с высоким содержанием клетчатки оказалось выше, чем в рационе с ее более низким содержанием. Было показано, что медиана общей суточной экскреции менахинов с калом составляет 850 нмоль/сут (диапазон: 64–5358 нмоль/сут). Менахины в циркулирующей крови обнаружены не были, и не наблюдалось ассоциаций между менахинонами в кале и маркерами воспаления. Был сделан вывод о том, что менахины, синтезированные кишечными бактериями, не попадают в системный кровоток, что, однако, не исключает их локального действия на эпителий кишечника.

Связь между пищевым витамином К и кишечным микробиомом двусторонняя. Витамин К может модулировать состав микробиома кишечника. Пищевой витамин К (филлохинон, МК4 и/или МК9) могут реконструироваться кишечным микробиомом в другие менахины, которые в дальнейшем участвуют в физиологических путях [21].

Влияние эссенциальных микронутриентов на популяционный состав облигатных кишечных комменсалов

Поскольку микронутриенты необходимы микроорганизмам для своего роста и функционирования, их потребление организмом-хозяином может влиять на состав и функциональную структуру микробиома кишечника (табл. 2). Низкое микробное разнообразие является одной из особенностей плохо функционирующей микробиоты, которая не способна полностью обслуживать своего хозяина. Изменения состава кишечной микробиоты могут влиять на метаболические пути, которые изменяют иммунную функцию, и наоборот, иммунная система играет ключевую роль в поддержании микробиоты кишечника, которая влияет на биосинтез витаминов [9].

Потребление диеты, полностью лишенной единственного микронутриента (витамина А, или железа, или цинка, или фолиевой кислоты) или одновременно лишенной всех четырех микронутриентов, нарушало состав и функцию кишечной микробиоты у гнобиотических мышей, колонизированных человеческими микроорганизмами [22]. Дефицит витамина А оказывал наибольшее влияние.

У пожилых мужчин (n=567) с более высоким уровнем 1,25(ОН)₂D в сыворотке крови было выявлено большее как α-, так и β-разнообразие микробиоты [23]. Статус 25(ОН)D у пациентов с ожирением и метаболическим синдромом был напрямую связан с составом и разнообразием кишечной микробиоты. У обследуемых с оптимальным уровнем 25(ОН)D в сыворотке крови наблюдалось большее разнообразие, чем у участников с дефицитом витамина D [24, 25]. Ежемесячный прием витамина D в дозе 60000 МЕ в течение

5 лет не изменил состав микробиома кишечника у пожилых австралийцев по сравнению с группой, получавшей плацебо [26], однако уровень 25(ОН)D в плазме крови при этом не контролировали. Данные, полученные на небольшой выборке здоровых взрослых с дефицитом витамина D (n=18), показали, что восстановление нормальной обеспеченности витамином D₃ путем приема холекальциферола (60 мкг/сут) в течение 8 нед. не отразилось на микробиоте кала [27].

Пероральные добавки, содержащие витамины группы В, С, D и Е, в значительной степени улучшали состав микробиома, способствуя разрастанию и колонизации слизистой оболочки кишечника такими полезными бактериями, как *Bifidobacterium*, *Lactobacillus* и *Roseburia*.

Низкая биодоступность β-каротина приводит к значительному накоплению его в толстой кишке. С использованием модели ферментации *in vitro* было показано, что добавление β-каротина влияет на состав кишечной микробиоты путем увеличения численности *Bifidobacterium* и *Lactobacillus* и снижения количества вредных бактерий *Dialister* и *Enterobacter* [28].

В таблице 2 представлены данные по влиянию алиментарно поступающих витаминов и минеральных веществ на микробиом.

В экспериментах на мышах было установлено, что дефицит витамина К в рационе изменяет состав кишечного микробного сообщества [31]. У пациентов (12 чел.) с сахарным диабетом 2 типа (СД2) по сравнению со здоровыми лицами (6 чел.) происходило обогащение метаболических путей биосинтеза менахинона (витамин К₂) по сравнению со здоровыми людьми, причем значительный вклад в биосинтез витамина К₂ вносили роды, принадлежащие к филуму *Firmicutes*, *Actinobacteria* и *Bacteroidetes* [18].

Роль кишечной микробиоты в улучшении нарушенного гликемического гомеостаза и чувствительности к инсулину под действием витамина К₂ была доказана в рандомизированном плацебо контролируемом исследовании, проведенном с участием 60 пациентов с СД2, которые в течение 6 мес. получали по 90 мкг менахинона-7 (75% от рекомендованного суточного потребления) в составе 100 мл йогурта, что привело к заметному снижению уровня глюкозы в сыворотке крови натощак, инсулина и гликированного гемоглобина (HbA1c) по сравнению с пациентами группы плацебо, принимавшими йогурт без добавления витамина К₂ [32]. Затем микробиота людей была трансплантирована мышам с ожирением, вызванным их кормлением в течение 4 недель высокожировой диетой (60% жира). В фекалиях, как пациентов, так и мышей. через 4 нед. после трансплантации микробиоты человека произошло повышение концентрации вторичных желчных кислот (литоchoлевой и тауродеоксихолевой) и КЦЖК

Таблица 2
Взаимосвязь между поступающими с пищей микронутриентами и микробиомом [2, 29, 30]

Бактерии, способные синтезировать витамины	Влияние поступающих с пищей микронутриентов	
	Положительное	Отрицательное
<i>Bifidobacterium</i>	Витамины А, С, D, Е, К, группы В, Mg	Fe
<i>Lactobacillus</i>	Витамины С, D, Е, К, группы В, Se	Fe, Zn
<i>Bacteroidetes</i>	Витамины А, В ₁ , В ₃ , С	Витамин Е
<i>Clostridium</i>	Витамин D	Zn
<i>Firmicutes</i>	Витамин Е	-
<i>Actinobacteria</i>	Витамин А	-

(уксусной, масляной и валериановой) при одновременном повышении количества родов, ответственных за биосинтез этих метаболитов [32]. Таким образом, витамин К важен как для хозяина, так и для микробиоты кишечника.

Избыточное потребление некоторых витаминов в дозах, в десятки раз превышающих РНП, приводит к тому, что не всосавшиеся в тонкой кишке витамины попадают в толстый кишечник, где благотворно влияют на микробиом кишечника, увеличивая количество предполагаемых симбионтов (витамин А, β -каротин, B_2 , D, E), увеличивая или поддерживая микробное разнообразие (витамины А, B_2 , B_3 , С, К) и их количество (витамин D), увеличивая выработку КЦЖК (витамин С) или увеличивая количество продуцентов КЦЖК (витамин B_2 , E) [33].

Взаимодействие между микробиотой кишечника и минеральными веществами

Как недостаток, так и избыток в питании микронутриентов (витамин D, магний, цинк) могут модулировать микробиоту кишечника [34]. Не абсорбированный в тонкой кишке цинк достигает толстой кишки и поступает как колоноцитам, так и бактериям-комменсалам, которые, вероятно, улучшают биодоступность цинка для организма хозяина [35]. Взаимодействие между микробиотой кишечника и цинком у человека сводится к тому, что микробиота кишечника способна связывать этот элемент; патогенные микроорганизмы (*сальмонелла*, *шигелла* и *кишечная палочка*) конкурируют с комменсалами и энтероцитами за усвоение цинка; цинк может нарушать баланс развития патогенных и комменсальных штаммов, изменять биохимические процессы бактерий (метаболизм нуклеиновых кислот и передача сигналов), вызывать модификацию биохимических путей организма хозяина как микроорганизмами, так и цинком, приводить к изменению синтеза, секреции и всасывания пептидов, гормонов и цитокинов кишечником хозяина, при этом патогенные микроорганизмы, пробиотики и пребиотики могут влиять на этот баланс разнонаправленным образом в зависимости от рациона питания [35]. Результаты исследований на людях демонстрируют, что дефицит цинка связан со снижением биоразнообразия кишечной микробиоты [36].

Поступивший с пищей селен кишечная микробиота может использовать для экспрессии собственных селенопротеинов, т.к. около 1/4 всех бактерий имеют гены, кодирующие селенопротеины. Уровень селена в рационе влияет на состав и колонизацию микробиоты кишечника, что может нарушать разнообразие микробиоты и оказывать уникальное воздействие на микробный состав. Хотя хозяин и кишечная микробиота приносят пользу друг другу благодаря своим симбиотическим отношениям, в условиях недостаточного потребления микроэлементов они могут стать конкурентами [37].

Повышенное потребление железа может иметь неблагоприятные последствия для организма хозяина. Включение в питание детей в возрасте от 6 до 14 лет ($n=139$) в течение шести месяцев обогащенного железом печенья, содержащего 20 мг электролитического железа, четыре раза в неделю в сравнении контрольной группой, получавшей необогащенное печенье, приводило к увеличению в кале концентрации энтеробактерий (*Salmonella spp.*, *Shigella spp.* и/или *E. coli*) и снижению популяции *Lactobacillus* [38].

Избыток не абсорбированного железа, получаемого перорально, поступает в толстую кишку и становится важным фактором роста почти для всех патогенных бактерий, грибов и простейших [30, 38]. Прием высоких доз железа (> 100 мг/сут) здоровыми женщинами в возрасте 40–65 лет был ассоциирован с изменениями в кишечной микробиоте, а именно снижением определенных полезных штаммов бактерий, связанных со здоровьем желудочно-кишечного тракта, с одновременным увеличением штаммов, связанных с воспалительными реакциями [39].

Потенциальные патогены – *кишечная палочка* (*E. coli*) и *сальмонелла* или *шигелла* – являются одними из наиболее сидерофильных видов, тогда как такие полезные бактерии, как *бифидобактерии* или *лактобациллы*, имеют низкую потребность в железе [38].

Влияние пре- и пробиотиков на усвоение минеральных веществ

Обитающие в кишечнике пробиотики способны модулировать всасывание минеральных веществ и смягчать их дефицит посредством нескольких механизмов [40].

Регулярное включение в рацион растворимых пищевых волокон (пектины, инулин, β -глюканы, арабиноксиланы, олигосахариды, гуаровая камедь) оказывает многогранные положительные эффекты на здоровье человека. За счет увеличения общего времени, необходимого для прохождения по желудочно-кишечному тракту, они увеличивают чувство сытости [41]. Перечисленные растворимые пищевые волокна устойчивы к эндогенным пищеварительным ферментам в тонкой кишке человека, но ферментируются бактериями в толстой кишке с образованием КЦЖК, являясь основным источником энергии для микробиома и способствуя повышению его видового разнообразия, обладают пребиотическим действием, поддерживая популяцию пробиотических микроорганизмов, ингибируя рост патогенных микроорганизмов [29]. В проксимальном и дистальном отделах толстой кишки образуется от 70 до 140 ммоль/л и от 20 до 70 ммоль/л КЦЖК соответственно [42]. Преобладающим является ацетат, за ним следуют пропионат и бутират, образование КЦЖК зависит от молекулярной конфигурации пребиотика (углеводный мономер, гликозидная связь и степень полимеризации), взаимодействия с кишечными бактериями, сахаролитической способности ферментов, синтезируемых пробиотиками [42].

Ферментация пребиотиков приводит к снижению pH в толстой кишке, что повышает биодоступность некоторых минеральных элементов [43–45]. Образующаяся в ходе ферментации пребиотиков p -гидроксифенилмолочная кислота восстанавливает Fe(III) до Fe(II), что повышает абсорбцию Fe(II) через канал двухвалентных металлов DMT1 энтероцитов [46].

Повышение кислотности в толстой кишке предотвращает образование комплексов кальция с отрицательно заряженными метаболитами – фитатами и оксалатами. Высвобождение кальция из хелатов повышает доступность этого элемента для всасывания и последующего включения в процесс минерализации костей [47]. Фитазы бактерий высвобождают кальций, магний, железо и фосфор из комплексов с фитатами, превращая их в биодоступные формы [2]. Наиболее известными микроорганизмами продуцентами фитаз являются *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans* и различные штаммы семейства

Lactobacillus (acidophilus, fermentum, plantarum, casei, brevis и др.) [40]. Ежедневный пероральный прием 32 здоровыми взрослыми в течение 7 дней концентрата донорского грудного молока (по 1,8, 3,6, 9 и 8 г), содержащего более 200 различных олигосахаридов, приводил к дозозависимому увеличению количества бифидобактерий в кале [40].

В слепом плацебо контролируемом исследовании с участием 58 здоровых женщин в возрасте 19–33 лет было обнаружено, что прием в течение 6 нед. *Bifidobacterium Lactis* BS 01 (2×10^9 КОЕ) и *Lactobacillus acidophilus* LA02 (2×10^9 КОЕ) привел к увеличению в волосах концентрации Ca, Mg, Fe и уменьшению концентрации Cu по сравнению с соответствующими показателями у женщин из группы, получавшей плацебо [48]. Среди участниц, принимавших пробиотики, процент лиц с уровнем кальция ниже референсных значений уменьшился с 31 до 6%, магния – с 13 до 6%, а для железа произошел сдвиг в сторону превышения референсных значений с 25 до 63% [48].

Показано, что пребиотическая смесь галактоолигосахаридов и фруктоолигосахаридов увеличивает всасывание кальция в толстой кишке и его ретенцию в костях [49, 50]. Совместное добавление в рацион крыс обоего пола аравийской камеди и витаминов приводило к повышению концентрации кальция, магния, фосфора и цинка в бедренной кости, не оказывая влияния на их экскрецию с мочой [51, 52]. Биодоступность железа увеличивается под действием инулина. На фоне добавления в корм инулина (5%) восполнение в рационе недостающих витаминов после вызванного у крыс дефицита витаминов D и группы B замедляло восстановление нормальной обеспеченности витаминами B₁ и B₆ (по экскреции с мочой), B₂ (по содержанию в мозге), но сопровождалось повышением на 40% концентрации железа в печени по сравнению с животными контрольной группы, получавшими полноценный по содержанию витаминов рацион без инулина [53, 54].

При приеме пребиотиков, в основном фруктанов, происходит улучшение усвоения кальция. В ходе 12-месячного исследования с участием 100 подростков, принимавших по 8 г коротко- и длинноцепочечного инулина в сутки, было показано значительное увеличение всасывания кальция и улучшение минеральной плотности костной ткани, как предполагают, вследствие того, что нерастворимый, не абсорбированный кальций в подкисленной среде толстой кишки переходил в ионную форму [55].

С использованием радиоизотопной метки было показано, что потребление в течение 7 сут дважды в день по 200 мл йогурта, содержащего 10 г галактоолигосахарида, повышало усвоение кальция при одновременном снижении экскреции кальция с мочой по сравнению с показателями контрольной группы, получавшей йогурт без добавления пребиотика [42].

Вегетарианский тип питания ассоциируется с более высоким видовым разнообразием биосинтезирующих витаминов группы B микроорганизмов в кишечнике, смешанный рацион оказывает относительно большее влияние на их распространенность и/или изобилие [12].

Заключение

Штаммы кишечника обладают взаимодополняющими свойствами метаболизма витаминов. Витамины, синтезируемые кишечными бактериями, являются необходимым фактором

роста других соседних бактерий. В микробиоме кишечника может происходить пассивный/активный обмен витаминами между штаммами. Перекрестное питание является важным механизмом, формирующим состав микробного сообщества, в ходе которого прототрофы защищают ауксотрофов от дефицита витаминов и других питательных веществ [56].

По мнению некоторых авторов, микро- и макроэлементы, поступающие с пищей, можно рассматривать в качестве пребиотиков для модуляции микробиоты кишечника, которая, в свою очередь, также может являться полезным инструментом для поддержания оптимального элементного гомеостаза [57].

На основании сравнительных исследований микробиоты плотоядных животных разных видов было высказано предположение, что, поскольку витамины группы B не могут накапливаться в организме, их микробный синтез может быть важен в периоды голодания или недостатка этих витаминов в питании [1].

Микробиота и ее метаболиты являются ключевыми промежуточными факторами, которые регулируют метаболизм глюкозы и чувствительность к инсулину.

В качестве одной из стратегий улучшения витаминного статуса организма при ожирении и метаболических нарушениях предлагается оптимизация микронутриентного состава сбалансированной диеты за счет обогащенных пищевых продуктов и/или перорального приема витаминно-минеральных комплексов, а также с помощью системы, ориентированной непосредственно на толстую кишку, для доставки витаминов непосредственно в кишечную микробную экосистему и, наконец, посредством введения пробиотиков любого отдельного известного штамма, способного синтезировать определенный витамин, или сообщества бактерий, способного синтезировать витамины для обеспечения перекрестного питания микроорганизмов и для продуцирования других метаболитов (в частности, КЦЖК) [6].

Микроорганизмы, населяющие желудочно-кишечный тракт человека, двунаправленно взаимодействуют с микронутриентами, входящими в состав рациона, что влияет, с одной стороны, на видовое разнообразие и функции микроорганизмов, а с другой стороны, микробиом влияет на всасывание и, следовательно, на биодоступность микронутриентов.

Необходимо дальнейшее изучение и выявление взаимосвязи между дозой витаминов группы B (из рациона или продуцируемой микробами) для представителей кишечной микрофлоры и хозяина у людей с недостаточным или избыточным питанием.

Список литературы / References

1. Alrubaye HS, Kohl KD. Abundance and Compositions of B-Vitamin-Producing Microbes in the Mammalian Gut Vary Based on Feeding Strategies. *mSystems*. 2021; e0031321. DOI: 10.1128/mSystems.00313-21
2. Barone M, D'Amico F, Brigidi P, Turroni S. Gut microbiome-micronutrient interaction: The key to controlling the bioavailability of minerals and vitamins? *Biofactors*. 2022; 48(2):307–314. DOI: 10.1002/biof.1835
3. Magnúsdóttir S, Ravcheev D., de Crécy-Lagard V., Thiele I. Systematic genome assessment of B-vitamin biosynthesis suggests co-operation among gut microbes. *Frontiers in genetics*. 2015; 6: 148. DOI: 10.3389/fgene.2015.00148
4. LeBlanc JG, Chain F, Martin R, Bermúdez-Humarán LG, Courau S, Langella P. Beneficial effects on host energy metabolism of short-chain fatty acids and vitamins produced by commensal and probiotic bacteria. *Microb Cell Fact*. 2016; 15(1):79. DOI: 10.1186/s12934-017-0691-z
5. Bedani R, Cucick ACC, Albuquerque MAC, LeBlanc JG, Saad SMI. B-Group Vitamins as Potential Prebiotic Candidates: Their Effects on the Human Gut Microbiome. *J Nutr*. 2024; 154(2):341–353. DOI: 10.1016/j.tjnut.2023.12.038
6. Uebanso T, Shimohata T, Mawatari K, Takahashi A. Functional Roles of B-Vitamins in the Gut and Gut Microbiome. *Mol. Nutr. Food Res*. 2020; 64(18): e2000426. DOI: 10.1002/mnfr.202000426
7. Soto-Martín E.C., Warnke I., Farquharson F.M., Christodoulou M., Horgan G., Derrien, M., Louis, P. Vitamin biosynthesis by human gut butyrate-producing bacteria and cross-feeding in synthetic microbial communities. *mBio*. 2020; 11(4): e00886–20. DOI: 10.1128/mBio.00886-20
8. Radionov D.A., Arzamasov A.A., Khoroshkin M.S., Iablukov S.N., Leyn S.A., Peterson S.N., Osterman A.L. Micronutrient requirements and sharing capabilities of the human gut microbiome. *Frontiers in microbiology*. 2019. 10: 1316. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01316

9. Gholami H., Chmiel J. A., Burton J. P., Maleki Vareki S. The Role of Microbiota-Derived Vitamins in Immune Homeostasis and Enhancing Cancer Immunotherapy. *Cancers (Basel)*. 2023; 15 (4): 1300. DOI: 10.3390/cancers15041300
10. Voland L., Le Roy T., Debédat J., Clément K. Gut microbiota and vitamin status in persons with obesity: A key interplay. *Obes Rev*. 2022; 23 (2): e13377. DOI: 10.1111/obr.13377
11. Said H. M. Intestinal absorption of water-soluble vitamins in health and disease. *Biochem. J.* 2011. 437: 357–372. DOI: 10.1042/BJ20110326
12. Chandel N., Somvanshi P. R., Thakur V. Characterisation of Indian gut microbiome for B-vitamin production and its comparison with Chinese cohort. *Br J Nutr*. 2024; 131(4): 686–697. DOI: 10.1017/S0007114523002179
13. Guetterman H. M., Huey S. L., Knight R., Fox A. M., Mehta S., Finkelstein J. L. Vitamin B-12 and the gastrointestinal microbiome: a systematic review. *Adv Nutr*. 2022; (2): 530–558. DOI: 10.1093/advances/nmab123
14. Sharma V., Rodionov D. A., Leys S. A., Tran D., Iablukov S. N., Ding H., Peterson D. A., Osterman A. L., Peterson S. N. B-Vitamin Sharing Promotes Stability of Gut Microbial Communities. *Front Microbiol*. 2019; 10: 1485. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01485
15. Wan Z., Zheng J., Zhu Z., Sang L., Zhu J., Luo S., Zhao Y., Wang R., Zhang Y., Hao K., Chen L., Du J., Kan J., He H. Intermediate role of gut microbiota in vitamin B nutrition and its influences on human health. *Front. Nutr*. 2022; 9:1031502. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1031502>
16. Hossain KS, Amarasekera S, Mayengbam S. B Vitamins and Their Roles in Gut Health. *Microorganisms*. 2022; 10 (6): 1168. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061168>
17. Walther B., Karl J. P., Booth S. L., Boyaval P. Menquinones, bacteria, and the food supply: the relevance of dairy and fermented food products to vitamin K requirements. *Adv Nutr*. 2013; 4: 463–73. DOI: 10.3945/an.113.003855
18. Dash NR, Al Bataineh MT. Metagenomic Analysis of the Gut Microbiome Reveals Enrichment of Menquinones (Vitamin K2) Pathway in Diabetes Mellitus. *Diabetes Metab. J.* 2021; 45 (1): 77–85. DOI: 10.4093/dmj.2019.0202
19. Сокольников А. А., Коденцова В. М., Сергеев И. Н., Струнин С. В., Климова О. А., Спиричев В. Б. Обмен кальция при недостаточности витаминов D и K. *Вопросы питания*. 1989; (1): 56–60. 19. Sokolnikov A. A., Kodentsova V. M., Sergeev I. N., Strunin S. V., Klimova O. A., Spirichev V. B. Calcium metabolism in case of deficiency of vitamins D and K. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 1989; (1): 56–60. (In Russ.)
20. Karl J. P., Meydani M., Barnett J. B., Vanegas S. M., Barger K. F., Fu X., Goldin B., Kane A., Rasmussen H., Vangay P., Knights D., Jonnalagadda S. S., Salzman E., Roberts S. B., Meydani S. N., Booth S. L. Fecal concentrations of bacterially derived vitamin K forms are associated with gut microbiota composition but not plasma or fecal cytokine concentrations in healthy adults. *Am. J. Clin. Nutr*. 2017; 106 (4): 1052–1061. DOI: 10.3945/ajcn.117.155424
21. Dai L., Mafra D., Shiels P. G., Hackeng T. M., Stenvinkel P., Schurgers L. J. Vitamin K and Hallmarks of Ageing: Focus on Diet and Gut Microbiome. *Nutrients*. 2023; 15 (12): 2727. DOI: 10.3390/nu15122727
22. Hilber M. C., Wu M., Rodionov D. A., Li X., Cheng J., Griffin N. W., Gordon, J. I. The effects of micronutrient deficiencies on bacterial species from the human gut microbiota. *Sci Transl Med*. 2017; 9 (390): ead4069. DOI: 10.1126/scitranslmed.ead4069
23. Thomas R. L., Jiang L., Adams J. S., Xu Z. Z., Shen J., Janssen S., Ackermann G., Vanderschueren D., Pauwels S., Knight R., Orwell E. S., Kado D. M. Vitamin D metabolites and the gut microbiome in older men. *Nat. Commun*. 2020; 11 (1): 5997. DOI: 10.1038/s41467-020-19793-8
24. Boughanem H., Ruiz-Limón P., Pilo J., Lisbona-Montañez J. M., Tinahones F. J., Moreno Indias I., Macías-González M. Linking serum vitamin D levels with gut microbiota after 1-year lifestyle intervention with Mediterranean diet in patients with obesity and metabolic syndrome: a nested cross-sectional and prospective study. *Gut Microbes*. 2023; 15 (2): 2249150. DOI: 10.1080/19490976.2023.2249150
25. Sukik A., Alalwani J., Ganji V. Vitamin D, Gut Microbiota, and Cardiometabolic Diseases-A Possible Three-Way Axis. *Int. J. Mol. Sci.* 2023; 24 (2): 940. DOI: 10.3390/ijms24020940
26. Pham H., Waterhouse M., Rahm J. S., Baxter C., Duarte Romero B., McLeod D. S. A., Ebeling P. R., English D. R., Hartel G., O'Connell R. L., van der Pols J. C., Venn A. J., Webb P. M., Whiteman D. C., Huygens F., Neale R. E. The effect of vitamin D supplementation on the gut microbiome in older Australians – Results from analyses of the D-Health Trial. *Gut Microbes*. 2023; 15 (1): 2221429. DOI: 10.1080/19490976.2023.2221429
27. Shieh A., Lee S. M., Lagishetty V., Gottlieb C., Jacobs J. P., Adams J. S. Pilot Trial of Vitamin D3 and Calcitriol in Healthy Vitamin D Deficient Adults: Does It Change the Fecal Microbiome? *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2021; 106 (12): 3464–3476. DOI: 10.1210/clinem/dgab573
28. Rocha H. R., Coelho M. C., Gomes A. M., Pinfado M. E. Carotenoids Diet: Digestion, Gut Microbiota Modulation, and Inflammatory Diseases. *Nutrients*. 2023; 15 (10): 2265. DOI: 10.3390/nu15102265
29. Frak M., Grenda A., Krawczyk P., Milanowski J., Kalinka E. Interactions between Dietary Micro-nutrients, Composition of the Microbiome and Efficacy of Immunotherapy in Cancer Patients. *Cancers (Basel)*. 2022; 14 (22): 5577. DOI: 10.3390/cancers14225577
30. Malesza J. J., Bartkowiak-Wieczorek J., Winkler-Galicki J., Nowicka A., Dzieciotowska D., Błaszczak M., Gajniak P., Słowińska K., Niepolski L., Walkowiak J., Mądry E. The Dark Side of Iron: The Relationship between Iron, Inflammation and Gut Microbiota in Selected Diseases Associated with Iron Deficiency Anaemia - A Narrative Review. *Nutrients*. 2022 Aug 24; 14 (17): 3478. DOI: 10.3390/nu14173478
31. Ellis J. L., Karl J. P., Oliverio A. M., Fu X., Soares J. W., Wolfe B. E., Hernandez C. J., Mason J. B., Booth S. L. Dietary vitamin K is remodeled by gut microbiota and influences community composition. *Gut Microbes*. 2021; 13 (1): 1–16. DOI: 10.1080/19490976.2021.1887721
32. Zhang Y., Liu L., Wei C., Wang X., Li R., Xu X., Zhang Y., Geng G., Dang K., Ming Z., Tao X., Hu H., Yan X., Zhang J., Hu J., Li Y. Vitamin K2 supplementation improves impaired glycemic homeostasis and insulin sensitivity for type 2 diabetes through gut microbiome and fecal metabolites. *BMC Med*. 2023; 21 (1): 174. DOI: 10.1186/s12916-023-02880-0
33. Pham V. T., Dold S., Rehman A., Bird J. K., Steiner, R. E. Vitamins, the gut microbiome and gastrointestinal health in humans. *Nutrition Research*. 2021; 95: 35–53. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2021.09.001>
34. Ferenc K., Sokol-Dembowska A., Helma K., Motyka E., Jarmakiewicz-Czaja S., Filip R. Modulation of the Gut Microbiota by Nutrition and Its Relationship to Epigenetics. *Int. J. Mol. Sci.* 2024; 25 (2): 1228. DOI: 10.3390/ijms25021228
35. Scarpellini E., Balsiger L. M., Maurizi V., Rinninella E., Gasbarrini A., Giostra N., Santori P., Abenavoli L., Rosetti C. Zinc and gut microbiota in health and gastrointestinal disease under the COVID-19 suggestion. *Biofactors*. 2022; 48 (2): 294–306. DOI: 10.1002/biof.1829
36. Skalny AV, Aschner M, Lei XG, Gritsenko VA, Santamaria A, Alekseenko S, Prakash NT, Chang JS, Sizova EA, Chao JCJ, Asatsh J, Tinkov AA. Gut Microbiota as a Mediator of Essential and Toxic Effects of Zinc in the Intestines and Other Tissues. *Int J. Mol. Sci.* 2021; 22 (23): 13074. DOI: 10.3390/ijms222313074
37. Ferreira R. L. L., Sena-Evangelista K. C. M., de Azevedo E. P., Pinheiro F. I., Cobucci R. N., Pedrosa L. F. C. Selenium in Human Health and Gut Microflora: Bioavailability of Selenium Compounds and Relationship With Diseases. *Front Nutr*. 2021; 8: 685317. DOI: 10.3389/fnut.2021.685317
38. Puga AM, Samaniego-Vaesken ML, Montero-Bravo A, Ruperto M, Portecarroyo T, Varela-Moreiras G. Iron Supplementation at the Crossroads of Nutrition and Gut Microbiota: The State of the Art. *Nutrients*. 2022; 14 (9): 1926. DOI: 10.3390/nu14091926
39. Shearer J., Shah S., MacInnis M. J., Shen-Tu G., Mu C. Dose-Responsive Effects of Iron Supplementation on the Gut Microbiota in Middle-Aged Women. *Nutrients*. 2024; 16 (6): 786. DOI: 10.3390/nu16060786
40. Varvara RA, Vodnar DC. Probiotic-driven advancement: Exploring the intricacies of mineral absorption in the human body. *Food Chem X*. 2023; 21: 101067. DOI: 10.1016/j.fochx.2023.101067
41. Погожева А. В., Коденцова В. М., Шарфетдинов Х. Х. Роль магния и калия в профилактическом и лечебном питании. *Вопросы питания*. 2022. Т. 91, № 5. С. 29–42. DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-29-42>
42. Pogozheva A. V., Kodentsova V. M., Sharafetdinov Kh. Kh. The role of magnesium and potassium in preventive and therapeutic nutrition. *Voprosy pitaniia [Problems of Nutrition]*. 2022; 91 (5): 29–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-5-29-42>
43. Nath A., Molnár M. A., Sighy A., Kőszegi K., Galambos I., Huszár K. P., Koris A., Vatai G. Biological activities of lactose-based prebiotics and symbiosis with probiotics on controlling osteoporosis, blood-lipid and glucose levels. *Medicina (Lithuania)*. 2018; 54 (6): 1–28. DOI: 10.3390/medicina54060098
43. Shortt C., Hasselwander O., Meynier A., Nauta A., Fernández E. N., Putz P., Antoine J. M. Systematic review of the effects of the intestinal microbiota on selected nutrients and non-nutrients. *Eur. J. Nutr*. 2018; 57 (1): 25–49. DOI: 10.1007/s00394-017-1546-4
44. Basavaiah R., Gurudutt P. S. Prebiotic carbohydrates for therapeutics. *Endocr. Metab. Immune Disord. Drug Targets*. 2021; 21: 230–245. DOI: 10.2174/187153032066200929140522
45. Zakrzewska Z., Zawartka A., Schab M., Marzyński A., Skoczeń S., Tomasiak P. J. et al. Prebiotics, Probiotics, and Postbiotics in the Prevention and Treatment of Anemia. *Microorganisms*. 2022; 10: 1330. DOI: 10.3390/microorganisms10071330
46. González A., Gálvez N., Martín J., Reyes F., Pérez-Victoria I., Domínguez-Vera J. M. Identification of the Key Excreted Molecule by Lactobacillus Fermentum Related to Host Iron Absorption. *Food Chem*. 2017; 228: 374–380. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.02.008
47. Whisner C. M., Castillo L. F. Prebiotics, bone and mineral metabolism. *Calcif Tissue Int*. 2018; 102 (4): 443–479. DOI: 10.1007/s00223-017-0339-3
48. Czajczyn D., Kabzinska-Milewska K., Wójcik R. W. *Bifidobacterium lactis* B501 and *Lactobacillus acidophilus* LA02 supplementation may change the mineral balance in healthy young women. *J. Elem. Nutr*. 2021; 26 (4): 849–859. DOI: 10.5601/jelem.2021.26.121
49. Seijo M., Bonanno M. N., Bryk G., Zeni Coronel M. E., Pita Martín de Portela M. L., Zeni S. N. Does vitamin D insufficiency influence prebiotic effect on calcium absorption and bone retention? *Calcif Tissue Int*. 2022; 111 (3): 300–312. DOI: 10.1007/s00223-022-00984-y
50. Zemanova N., Ornela R., Mondockova V., Kovacova V., Mariniakova M. Roles of gut microbiome in bone homeostasis and its relationship with bone-related diseases. *Biology (Basel)*. 2022; 11 (10): 1402. DOI: 10.3390/biology11101402
51. Leggett L. L., Lee W., Martin B. R., Story J. L., Campbell J. K., Weaver C. M. Prebiotics enhance magnesium absorption and inulin-based fibers exert chronic effects on calcium utilization in a post-menopausal rodent model. *J. Food Sci*. 2012; 77 (4): H88–94. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2011.02612.x
52. Bonetti G., Herbst K. L., Donato K., Dhuli K., Kiani A. K., Aquilanti B., et al. Dietary supplements for obesity. *J. Prev. Med. Hyg*. 2022; 63(2 Suppl 3): E160–E168. DOI: 10.15167/2421-4248/jpmh2022.63.23.2757
53. Бекетова Н. А., Коденцова В. М., Леоненко С. Н., Коселева О. В., Вржесинская О. А., Сото С. Х., Сокольников А. А., Шевякова Л. В., Жилинская Н. В. Влияние обогащения рациона крыс инулином на усвоение некоторых витаминов и минеральных веществ. *Микроэлементы в медицине*. 2021; 22 (3): 47–57. DOI: 10.19112/2413-6174-2021-22-3-47-57
54. Бекетова Н. А., Коденцова В. М., Леоненко С. Н., Коселева О. В., Вржесинская О. А., Сото С. Х., Сокольников А. А., Шевякова Л. В., Жилинская Н. В. Влияние обогащения рациона крыс инулином на усвоение некоторых витаминов и минеральных веществ. *Микроэлементы в медицине*. 2021; 22 (3): 47–57. DOI: 10.19112/2413-6174-2021-22-3-47-57
54. Коденцова В. М., Леоненко С. Н., Бекетова Н. А., Коселева О. В., Вржесинская О. А., Сокольников А. А. и др. Инулин как компонент обогащенных пищевых продуктов: влияние на микронутриентный статус организма. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2022; (3): 34–42. DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-03-05>
55. Kodentsova V. M., Leonenko S. N., Beketova N. A., Kosheleva O. V., Vrzhesinskaya O. A., Sokolnikov A. A., Shevyakova L. V., Zhilinskaya N. V. Influence of enrichment of the rat diet with inulin on the assimilation of certain vitamins and minerals. *Mikroelementy v medicine = Microelements in medicine*. 2021; 22 (3): 47–57. DOI: 10.19112/2413-6174-2021-22-3-47-57
56. Culp E. J., Goodman A. L. Cross-feeding in the gut microbiome: Ecology and mechanisms. *Cell. Host. Microbe*. 2023; 31 (4): 485–499. DOI: 10.1016/j.chom.2023.03.016
57. Гробицки Б. В., Делюкина О. В., Совко С. А. Взаимодействие эссенциальных элементов и кишечной микробиоты: обзор литературы. *Микроэлементы в медицине*. 2023; 24 (3): 12–21. DOI: 10.19112/2413-6174-2023-24-3-12-21
58. Grabekis V. V., Delyukina O. V., Savko S. A. Interaction of essential elements and gut microbiota: a literature review. *Mikroelementy v medicine = Microelements in medicine*. (In Russ.). 2023; 24 (3): 12–21. DOI: 10.19112/2413-6174-2023-24-3-12-21

Статья поступила / Received 20.06.24
Получена после рецензирования / Revised 24.06.24
Принята в печать / Accepted 28.06.24

Сведения об авторах

Коденцова Вера Митрофановна, д.б.н., проф., главный научный сотрудник лаборатории витаминов и минеральных веществ¹. E-mail: kodentsova@ion.ru. ORCID: 0000-0002-5288-1132

Рисник Дмитрий Владимирович, к.б.н., ведущий научный сотрудник кафедры биофизики биологического факультета². E-mail: biant3@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3389-8115.

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

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», биологический факультет, Москва, Россия

Автор для переписки: Коденцова Вера Митрофановна. E-mail: kodentsova@ion.ru

Для цитирования: Коденцова В. М., Рисник Д. В. Микронутриенты и кишечный микробиом: двуполупроветное взаимодействие. *Медицинский алфавит*. 2024; (16): 40–46. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-16-40-46>

About authors

Kodentsova Vera M., Dr Bio Sci, professor, chief researcher at the Laboratory of Vitamins and Minerals¹. E-mail: kodentsova@ion.ru. ORCID: 0000-0002-5288-1132

Risnik Dmitry V., PhD Bio Sci, leading researcher at Dept of Biophysics, Faculty of Biology². E-mail: biant3@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3389-8115

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

² Moscow State University M. V. Lomonosov, Moscow, Russia

Corresponding author: Kodentsova Vera M. E-mail: kodentsova@ion.ru

For citation: Kodentsova V. M., Risnik D. V. Micronutrients and the gut microbiome: a bidirectional interaction. *Medical alphabet*. 2024; (16): 40–46. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-16-40-46>

