

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПОЛИФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ КАК КОМПОНЕНТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПИТАНИЯ

В.А. Костюк

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь
e-mail: kostyuk@bsu.by*

Введение

В соответствии с концепцией функционального питания, основные положения которой были сформулированы более 30 лет назад, важную роль в поддержании здоровья человека играют так называемые функциональные продукты. Функциональные пищевые продукты (ГОСТ Р 52349—2005) это продукты питания, содержащие функциональные пищевые ингредиенты, которые приносят пользу здоровью человека, повышают его сопротивляемость заболеваниям, способны улучшить многие физиологические процессы в организме человека, позволяя ему долгое время сохранять активный образ жизни [1-7]. Функциональные пищевые продукты в большинстве случаев не могут излечивать, но помогают предупредить болезни и замедлить старение организма. Особенно важное значение функциональное питание приобретает в условиях современной экологической обстановки, для которой характерно загрязнение окружающей среды отходами производства и продуктами сгорания топлива, широкое использование химических средств в сельском хозяйстве. Всё большее негативное влияние на организм человека приобретает химизация быта и сферы услуг. К сожалению, современные способы производства продуктов и технология их кулинарной обработки приводит к обеднению их важнейшими функциональными ингредиентами, в первую очередь антиоксидантами. Как результат, в организме современного человека возникает дисбаланс между уровнем оксидантов и антиоксидантов, приводящий к развитию окислительного стресса - начального этапа патогенеза самых различных заболеваний [8]. В определенной степени обозначенную проблему можно решить путем получения продуктов питания, обогащенных функциональными пищевыми ингредиентами. Среди последних большой научный и практический интерес вызывают вторичные метаболиты растений полифенольной природы. Вопросам классификации, химической структуры, физиологической активности и биодоступности этих соединений посвящена данная статья.

Химическая структура и классификация

Все растительные полифенольные соединения (РПС) можно разделить на гидролизуемые танины (эферы галловой кислоты с глюкозой и другими сахарами) и фенилпропаноиды. Фенилпропаноиды – самая большая группа природных полифенолов с разнообразными функциями, среди которых защита растений от поражения различными патогенами, включая насекомых, бактерии, грибы и вирусы; защита от ультрафиолетового излучения; клеточная сигнализация [9]. К фенилпропаноидам относятся несколько структурно различающихся групп: гликозилированные фенилпропаноиды (гликозиды фенилпропаноидов), флавоноиды, изофлавоноиды, кумарины, стильбеноиды, куркуминоиды и лигнаны (Рис.1).

Одним из наиболее известных стильбеноидов является ресвератрол, обладающий широким спектром фармакологической активности. В значительных количествах он содержится в кожуре и семенах многих растений, включая шелковицу и виноград [10]. Термин куркуминоиды относится к веществам, извлеченным из корня куркумы (*Curcuma longa*). В экстракте куркумы 75–95% составляет куркумин. Куркуму используют в качестве приправы, она основной компонент общеизвестной специи - карри. Кроме того, куркуму издавна использовали в народной медицине как средство от воспалений различной природы и других болезней [11].

Наиболее многочисленной группой полифенолов являются флавоноиды. Это семейство растительных пигментов включает более четырех тысяч соединений [12]. В основе

структуры флавоноидов лежит флавоновое ядро (2-фенилхроман), включающее три кольца - А, В и С. Флавоноиды разделяют на несколько классов в зависимости от степени окисления и природы заместителей центрального пиранового кольца С. [8]. Самые многочисленные флавоноиды - флавоны, флавонолы, флаван-3-олы (катехины), и антоцианидины [13]. В природе флавоноиды, как правило, встречаются в виде гликозидов [12], в которых полифенольная часть (агликон) связана β -гликозидной связью с различными моно- и олигосахаридами [8]. Огромное количество индивидуальных соединений образуется благодаря метилированию, гликозилированию или этерификации гидроксильных групп, а так же в ходе димеризации и полимеризации.

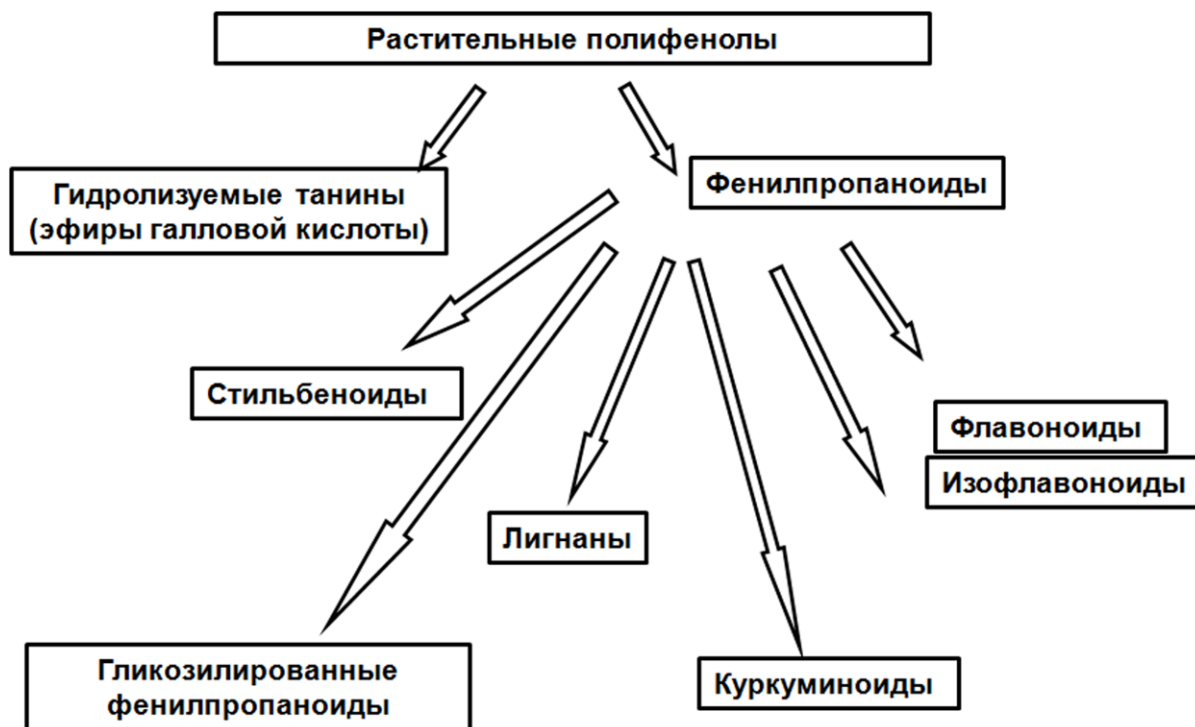


Рисунок 1 – Основные группы природных полифенольных соединений

В отличие от других классов флавоноидов катехины обычно встречаются в свободной форме (мономерные флаван-3-олы), а не в гликозилированной [14]. Как мономерные, так и олигомерные катехины могут образовывать 3-О-галлаты в результате присоединения через гидроксильную группу в 3 положении эфира галловой кислоты (галлирование) [15]. Например, эпигаллокатехин 3-О-галлат является превалирующим катехином в чае [16].

Конденсированные танины или проантоцианидины являются самым обширным семейством среди растительных полифенолов. Они образуются в результате полимеризации мономеров катехина. В зависимости от структуры повторяющихся мономеров проантоцианидины делят на процианидины и продельфинидины [17]. Структурные элементы процианидинов: (-)-эпикатехин и (+)-катехин. Как правило, они соединены через связь С4–С8 ($\beta 4 \rightarrow 8$), хотя иногда встречается вариант С4–С6 ($\beta 4 \rightarrow 6$). Мономерами продельфинидинов служат галлокатехин или эпигаллокатехин. В растениях большинство проантоцианидинов представляет собой смесь олигомеров (степень полимеризации 5–10) и более полимеризованных образований (степень полимеризации >10) обеих групп [17].

Биологическая активность

Со времен первых исследований биологической активности растительных полифенолов, опубликованных в середине 30-х годов прошлого столетия [18], опубликовано огромное количество научных работ от фундаментальных исследований до клинических испытаний, свидетельствующих о важной роли этих веществ в поддержании нормального здоровья человека. Было установлено, что растительные полифенолы обладают широким

диапазоном биологического действия, включая противоаллергенное, противовирусное, противовоспалительное, антитромбическое и сосудосуживающее [8,19]. Эпидемиологические исследования растительных полифенолов позволяют говорить о них как о необходимых непитательных компонентах пищи. Связь между потреблением флавоноидов и уменьшением смертности от сердечно-сосудистой патологии была впервые показана в Цутфен-обследовании (Zutphen Elderly Study) пожилых людей [20] и была подтверждена дальнейшими исследованиями [21]. Некоторые данные последних лет свидетельствуют, что куркумин и ресвератрол являются мощными ингибиторами канцерогенеза *in vivo* и обладают антипролиферативным действием на опухолевые клетки *in vitro* [22].

Одна из важных особенностей растительных полифенолов - чрезвычайно широкий спектр клеточных и внеклеточных мишеней, на которые они способны воздействовать. Данный феномен обусловлен не только большим разнообразием структурных различий растительных полифенолов, но также и тем, что многие полифенолы могут влиять на различные ферментные системы и могут быть вовлечены в различные пути биосигнализации и внутриклеточной передачи сигнала (сигнальная трансдукция).

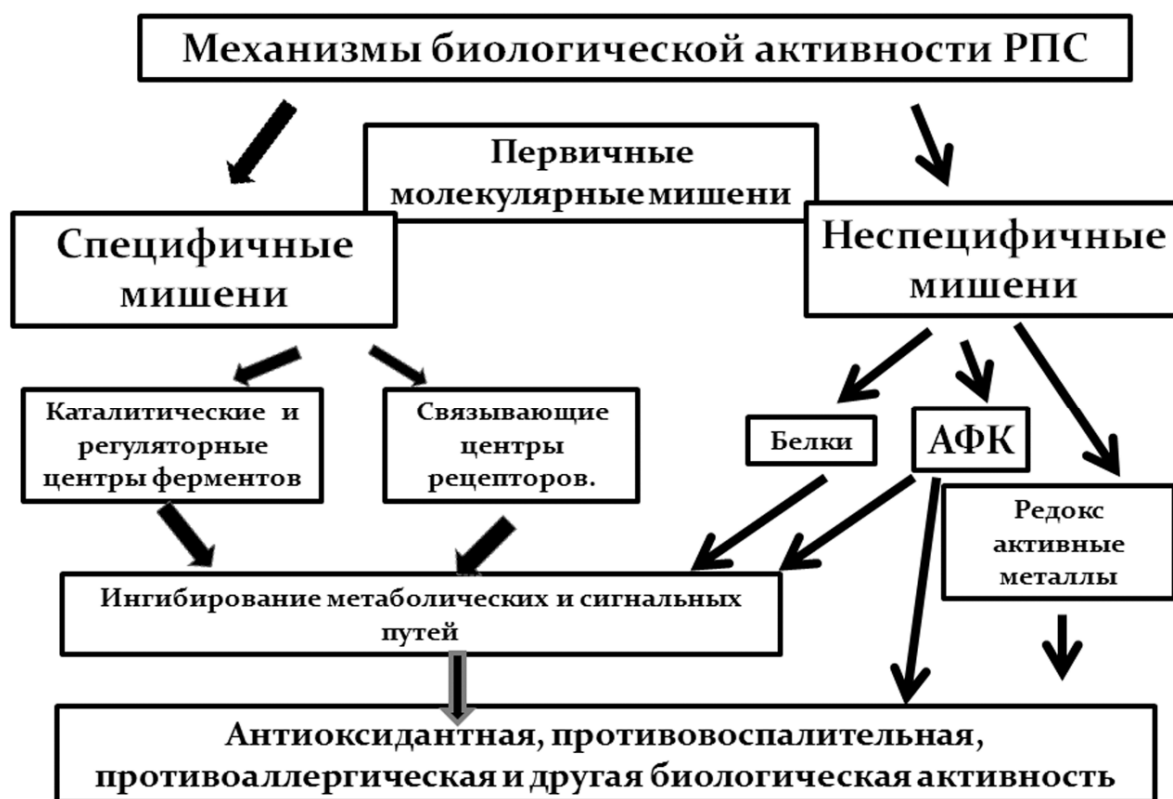


Рисунок 2 – Возможные механизмы биологической активности растительных полифенольных соединений

Все первичные молекулярные мишени полифенолов в человеческом теле могут быть классифицированы как специфические или неспецифические (Рисунок 2). Обычно специфические мишени растительных полифенолов - это активные центры ферментов или сайты связывания рецепторов. Благодаря высокому сродству к специфическим мишеням растительные полифенолы способны препятствовать связыванию с ними эндогенных лигандов, ингибируя, таким образом, соответствующий путь метаболизма или трансдукции сигнала. Например, многие флавоноиды могут конкурентно блокировать АТФ-связывающий участок на каталитической единице протеинкиназ [19]. Некоторые флавоноиды структурно напоминают эстрадиол и, поэтому, могут специфически связаться с β рецептором эстрогена

(ER β) [23]. И хотя было показано, что сродство флавоноидов к экстрагенному рецептору в 1000-10000 раз меньше, чем у 17- β -эстрадиола [24], концентрация данных флавоноидов в тканях может быть достаточной для активации путей сигнальной трансдукции через эти ядерные рецепторы.

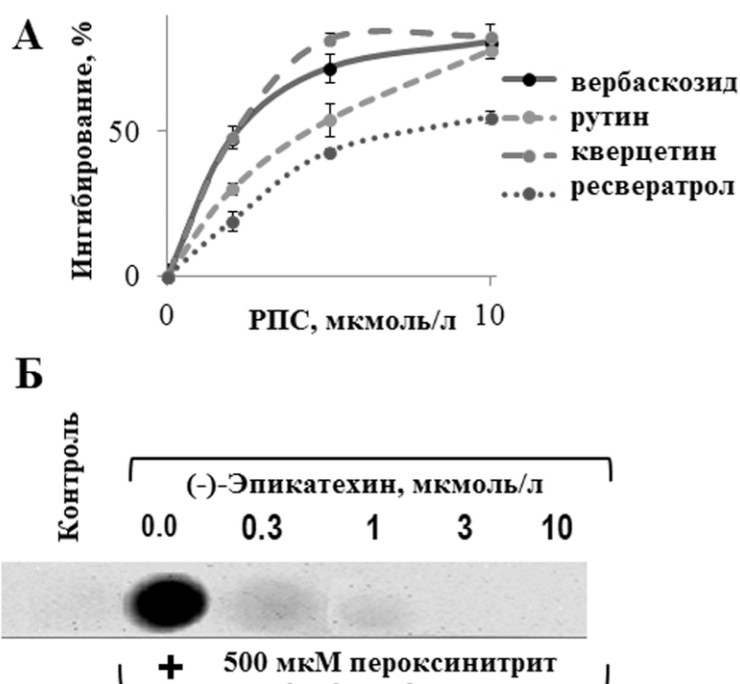
Множество биологических эффектов растительных полифенолов реализуется посредством неспецифического взаимодействия с разнообразными мишенями: от белков до малых молекул и ионов. Однако, основное внимание уделяют результатам взаимодействия растительных полифенолов с активными формами кислорода и азота. Одной из наиболее важных мишеней РПС является анион-радикал кислорода [25]. Супероксид, как еще часто называют анион-радикал кислорода, играет важную роль как в физиологических, так и патологических процессах в клетке. В значительной степени это обусловлено тем, что анион-радикал кислорода вовлекается в ряд свободно-радикальных реакций, ведущих к образованию сильных оксидантов - гидроксильного радикала и пероксинитрита. Кроме того, супероксид и образующийся в результате его дисмутации пероксид водорода функционируют как сигнальные молекулы, в различных путях сигнальной трансдукции, включая провоспалительные сигнальные каскады. Установлено, что РПС являются эффективными перехватчиками супероксида, константа скорости второго порядка находится в диапазоне от 1 до $20 \times 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Табл. 1).

Таблица 1 – Константы скорости реакции (k) РПС с $\text{O}_2^{\cdot-}$, полученные методом конкурентной кинетики

РПС	$k, 10^4 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Эпигаллокатехин галлат	20.0
Эпикатехин галлат	14.0
Эпикатехин	12.0
Вербаскозид	5.3
Кверцетин	5.0
Таксифолин	5.0
Рутин	2.7
Лютеолил	2.3
Камферол	1.8
Морин	1.0

Анализ зависимости активность-структура позволяет заключить, что ключевое значение в антирадикальной активности флавоноидов в отношении супероксида играет катехольная группа в кольце В и наличие гидроксила в положении С3. Отсутствие карбонильной группы и дополнительное гидроксильное кольцо В также усиливает антирадикальную активность РПС.

Не менее важным является взаимодействие РПС с пероксинитритом. Прооксидантное действие пероксинитрита обусловлено его способностью разлагаться с образованием чрезвычайно активных радикалов - гидроксильного и $\cdot\text{NO}_2$. Гидроксильный радикал является инициатором свободно-радикального цепного окисления, а радикал $\cdot\text{NO}_2$ сильнейший нитрирующий агент, способный модифицировать различные молекулы, в том числе апобелки липопroteидов низкой плотности (ЛНП), что приводит к их атерогенной модификации. Растительные полифенолы легко окисляются пероксинитритом, благодаря чему в многокомпонентных системах они функционируют как антиоксиданты, ингибирующие окисление и нитрование пероксинитритом различных субстратов. Так, например, РПС эффективно ингибируют окисление пероксинитритом как свободного триптофана (Рис.3А), так и нитрование пероксинитритом остатков тирозина в составе белкового фрагмента ЛНП (Рис.3Б).



А- зависимость степени ингибирования окисления свободного триптофана (25 мкмоль/л) пероксинитритом (50 мкмоль/л) от концентрации РПС;

Б- результаты дот-блоттинга ЛНП, подвергнутых воздействию пероксинитрита без и в присутствии эпикатехина (анализ с использованием антител к нитротирозину).

Рисунок 3 – Антиоксидантное действие РПС в отношении некоторых пероксинитрит-зависимых процессов

В настоящее время общепринято, что ЛНП, модифицированные в результате окислительных реакций, играют ключевую роль в иницировании и развитии атеросклеротических изменений. Проникая через стенку эндотелия в крупных сосудах и накапливаясь в интиме сосудистой стенки, они способствуют возникновению очага воспаления. Способность РПС предотвращать пероксинитрит-зависимую окислительную модификацию ЛНП может быть одним из молекулярных механизмов профилактического действия в отношении сердечно-сосудистых заболеваний.

В организме существуют и другие потенциальные механизмы атерогенной модификации ЛНП. В частности, ЛНП могут окисляться пероксидом водорода в присутствии фермента миелопероксидаза (МПО) и физиологических концентраций нитрит ионов. Показано, что РПС в микромолярном диапазоне концентраций ингибируют окисление ЛНП, удлиняя продолжительность лаг-периода и снижая скорость окисления липидного фрагмента [26]. Как следует из приведенных в таблице 2 данных, наиболее эффективным антиоксидантом в данном случае является кверцетин. Кроме флавоноидов достаточно эффективно ингибировал окисление ЛНП вербаскозид. А вот ресвератрол не оказывал ингибирующего действия на этот процесс.

Кроме ингибирования окислительной модификации ЛНП, растительные полифенольные соединения могут влиять на воспалительные процессы, протекающие в сосудистой стенке на ранних этапах атерогенеза. Поэтому интегральный эффект конкретного соединения будет зависеть от его антиоксидантных свойств в отношении окислительной модификации ЛНП и способности предотвращать последствия воздействия модифицированных ЛНП на клетки эндотелия, а именно, нарушение окислительно-восстановительного баланса и продукцию медиаторов воспаления [27].

Таблица 2 – Эффективность антиоксидантного действия РПС при окислении ЛНП пероксидом водорода в присутствии МПО и нитрит ионов

РПС	Концентрации РПС (мкмоль/л), ингибирующие окисление ЛНП на 50 %
Кверцетин	2,2
Рутин	3,0
Таксифолин	3,8
Эпикатехин	4,4
Лютеолин	4,5
Морин	11,1
Вербаскозид	20,0
Кемпферол	>20
Ресвератрол	Не ингибировал

Биодоступность

Характеристика биодоступности веществ, обладающих биологической активностью, например, противовоспалительным или хемопреентивным (противоопухолевом) действием *in vitro*, несомненно, очень важна для предсказания их постабсорбционных эффектов *in vivo*. Биодоступность алиментарных полифенольных соединений зависит от множества факторов, таких как суточное потребление, всасывание, биотрансформация и выделение.

Точная и достоверная оценка полного суточного потребления полифенолов в пищу весьма проблематична. Это связано, главным образом, с тем фактом, что в пище и напитках содержится много различных типов полифенолов, и их концентрация в пище растительного происхождения зависит от генетических и экологических факторов. Другие факторы, такие как степень зрелости, хранение, пищевая обработка, в первую очередь варка и жарка, могут в существенной степени изменить содержание полифенолов в пище и напитках [28-32]. Тем не менее, проведено множество исследований по алиментарному потреблению полифенолов. Эти исследования базировались главным образом на составе растительной пищи, потребляемой в настоящее время в определенной географической области. Исходя из опубликованных данных, доля полифенолов в рационе сильно варьирует в разных странах. Например, было установлено, что в Нидерландах и Дании суточное потребление флавонолов и связанных флавоноидов составляло 23-27 мг [28], в Германии 54 мг [33], тогда как в США суточная диета содержала 500 - 1000 мг смешанных флавоноидов [34]. Недавно в Италии для оценки потребления полифенолов был проведен анкетный опрос. Были получены следующие среднесуточные показатели: 25,5 мг изофлавоны, 20,1 мг антоцианидины, 59,5 мг флаван-3-олы, 34,7 мг флаваноны, 0,5 мг флавоны, 22,4 мг флавонолы и 137,2 мг флавоноиды в целом [35].

Абсорбция и всасывание

Данные о количестве абсорбированных в кишечнике природных полифенолов сильно различаются в разных источниках и варьируют в диапазоне от менее процента [36] до 50 [37] и даже 70 процентов [38] от поглощенной дозы. Тонкий кишечник, по-видимому, является первым и основным местом всасывания флавоноидов и других полифенолов. Однако, если агликоны флавоноидов и изофлавонов всасываются легко [36, 39, 40,], то гликозиды флавонолов, флавонов и изофлавонов должны быть предварительно гидролизваны до соответствующих агликонов. Поскольку у млекопитающих в клетках тонкого кишечника присутствуют в значительном количестве только глюкозид-гидролизующие ферменты [41], здесь могут гидролизываться и всасываться флавоноид глюкозиды, а эффективность кишечного всасывания других гликозидов, в частности, рутинозидов гесперидина и рутина довольно низкая и они проходят через желудочно-кишечный трактат до толстой кишки. В толстом кишечнике эти полифенолы гидролизуются бактериальными ферментами, и

высвобожденные флавоноиды (агликоны) частично абсорбируются, однако большая часть рутинозидов флавоноидов и других поглощенных флавоноидов разлагается микрофлорой до более простых фенольных соединений. Эта деградация обычно связана с расщеплением гетероциклического кольца, содержащего кислород, дегидроксилированием и декарбоксилированием [38, 42].

С рассмотренной выше схемой поступления полифенольных соединений из желудочно-кишечного тракта в кровь не согласуются данные, свидетельствующие, что, кишечное поглощение для глюкозидов кверцетина лука более чем в два раза превосходит уровень поглощения агликона [37]. О возможности всасывании гликозидов без их предварительного расщепления свидетельствует выявление кверцетин-3-рутинозида в крови [43], нарингина (4',5,7-тригидроксифлавоон-7-рамноглюкозид) в моче [44], цианидин-3-гликозидов в крови и моче [45, 46]. Одним из возможных объяснений этих результатов может быть наличие механизма, при котором трансмембранный транспорт гликозидов флавоноидов происходит с помощью специальных переносчиков. Например, было показано, что гликозиды кверцетина могут транспортироваться кишечным переносчиком глюкозы SGLT1 [47, 48]. Катехин галлаты также всасываются в тонком кишечнике. Эпигаллокатехин галлат и эпикатехин галлат обнаружены в человеческой крови после употребления зеленого чая и темного шоколада [49-52].

Состав пищи и напитков оказывают существенное влияние на бионакопление. Белки могут связать полифенолы, снижая тем самым их адсорбцию всасывающей поверхностью кишечника [53]; напротив, присутствие жиров может увеличить поглощение полифенолов. Показано, что катехины зеленого чая, олигомерные проантоцианидины виноградных косточек и силибилин расторопши пятнистой лучше поглощаются, если поступают в организм не в свободном виде, а в составе фосфолипидных комплексов [53]. Алкоголь также улучшает поглощение полифенолов, о чем свидетельствует более высокий уровень кишечного поглощения полифенолов из красного вина в сравнении с приемом безалкогольных аналогов [53, 54].

Процианидины вносят существенный вклад в общее содержание фенолов во многих пищевых продуктах и напитках. Яблоки содержат 80-128 мг процианидинов на 100 г сухого вещества, и, таким образом, вклад процианидинов в общую антиокислительную способность яблок, яблочного сока и экстрактов может составлять более 80 % [55]. Содержание процианидинов в шоколаде может достигать 1500 мг на 100 г [56]. Однако в тонком кишечнике, поглощение процианидинов вследствие их высокополимерной структуры очень ограничено или же не происходит вовсе [57], а, попадая в толстый кишечник, большая их часть расщепляется бактериальной микрофлорой кишечника до низкомолекулярных фенольных кислот, которые относительно легко абсорбируются [58].

Заключение

Таким образом, РПС являются одной из важнейших групп функциональных пищевых ингредиентов, необходимых для улучшения структуры питания, профилактики распространенных заболеваний цивилизации (атеросклероз, онкологические заболевания, остеопороз, сахарный диабет и др.) и улучшения физического здоровья человека. Наряду с применением РПС в качестве ингредиентов традиционных питательных продуктов, они могут поступать в организм как действующее функциональное начало различных биологически активных добавок (БАДов). Однако следует иметь в виду, что БАДы назначаются курсами и принимаются в течение определенного времени, тогда как РПС в составе функциональных продуктов питания могут приниматься неопределенно долго, способствуя поддержанию состояния физического и психического благополучия человека.

Список литературы

1. Craig, W.J. Phytochemicals: guardians of our health / W.J. Craig // J Am Diet Assoc. – 1997. – Vol. 97(suppl). – S.199–204.

2. Beecher, G.R. Phytonutrients' role in metabolism: effects on resistance to degenerative processes / G.R. Beecher // *Nutr Rev.* – 1999. – Vol. 57. – S. 1–6.
3. Lichtenstein, A.H. Soy protein, isoflavones and cardiovascular disease risk / A.H. Lichtenstein // *J Nutr.* – 1998. – Vol. 128. – P. 1589–1592.
4. Potter, J.P. Food, nutrition and the prevention of cancer: a global perspective / J.P. Potter - Washington, DC: World Cancer Research Fund, 1997. – 230 p.
5. Steinmetz, K.A. Vegetables, fruit and cancer prevention: a review / K.A. Steinmetz, J.D. Potter // *J Am Diet Assoc.* – 1996. – Vol. 96. – P. 1027–1039.
6. Rhodes, M.J.C. Physiologically-active compounds in plant foods: an overview / M.J.C. Rhodes // *Proc Nutr Soc.* – 1996. – Vol. 55. – P. 371–384.
7. Pearson, T.A. Nutritional interventions in cardiovascular disease: new challenges and opportunities / T.A. Pearson, D. Osorio, K. Brown // *Curr Atheroscler Rep.* – 2000. – Vol. 2. – P. 515–520.
8. Костюк, В.А. Биорадикалы и биоантиоксиданты / В.А. Костюк, А.И. Потапович – Мн.: БГУ, 2004. – 179 с.
9. Hahlbrock, K. Physiology and Molecular Biology of Phenylpropanoid Metabolism / K. Hahlbrock, D. Scheel // *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol.* – 1989. – Vol. 40. – P. 347–369.
10. Cancer chemopreventive activity of resveratrol, a natural product derived from grapes / M. Jang [et al.] // *Science.* – 1997. – Vol. 275. – P. 218–220.
11. Ammon, H.P.T. Pharmacology of *Curcuma longa* / H.P.T Ammon, M.A. Wahl // *Planta Med.* – 1991. – Vol. 57. – P. 1–7.
12. Richardson, P.M. Structure, biosynthesis, evolution, and physiological and ecological roles of plant flavonoids and related compounds important in chemoprevention / P.M. Richardson // *Cancer Chemoprevention (L. Wattenberg [et al.] ed) - Boca Raton, FL: CRC Press., 1992. – P. 353–360.*
13. Harborne, J.B. The Flavonoids: recent advances / J.B. Harborne // *Plant pigments (Goodwin T.W. ed). - Academic Press. London, – 1988. – P. 299 – 343.*
14. Robards, K. Analytical Chemistry of Fruit Bioflavonoids / K. Robards, M. Antolovich // *Analyst.* – 1997. – Vol. 122. – P. 11–34.
15. Macheix, J.-J. Fruit phenolics / J.-J. Macheix, A. Fleuriet, J. Billot - Imprint, Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1990. – 392 с.
16. Skibola, C.F. Potential health impacts of excessive flavonoid intake / C.F. Skibola, M.T. Smith // *Free Radic Biol Med.* – 2000. – Vol. 29. – P. 375–383.
17. What do Green Tea, Grapes Seeds, and Docks have in Common? / Meagher L.P. [et al.] // *Chemistry in New Zealand – 2005, Septembre. – P. 6–9.*
18. Benthath, A. Vitamin nature of flavones / A. Benthath, S. Rusznyak, A. Szent-Gyorgyi // *Nature.* – 1936. – Vol. 138. – P. 798.
19. Middleton, E.Jr. The Effects of Plant Flavonoids on Mammalian Cells: Implications for Inflammation, Heart Disease, and Cancer / E.Jr. Middleton, C. Kandaswami, T.C. Theoharides // *Pharmacol Rev.* – 2000. – Vol. 52. – P. 673–751.
20. Dietary antioxidant flavonoids and risk of coronary heart disease: The Zutphen Elderly Study / M.G.L. Hertog [et al.] // *Lancet.* – 1993. – Vol. 342. – P. 1007–1011.
21. Dietary flavonoids, antioxidant vitamins, and incidence of stroke. The Zutphen Study / S.O. Keli [et al.] // *Arch Intern Med.* – 1996. – Vol. 156. – P. 637–642.
22. Antiproliferative effect of curcumin (diferuloylmethane) against human breast tumor cell lines / K. Mehta [et al.] // *Anticancer Drugs.* – 1997. – Vol. 8. – P. 470–481.
23. Miksicek, R.J. Commonly occurring plant flavonoids have estrogenic activity / R.J. Miksicek // *Mol Pharmacol.* – 1993. – Vol. 44. – P. 37–43.
24. Interaction of estrogenic chemicals and phytoestrogens with estrogen receptor beta / G.G.J.M. Kuiper [et al.] // *Endocrinology.* – 1998. – Vol. 139. – P. 4252–4263.

25. Chelating and Free Radical Scavenging Mechanisms of Inhibitory Action of Rutin and Quercetin in Lipid Peroxidation / I.B. Afanas'ev [et al.] // *Biochem Pharmacol.* - 1989. – Vol. 38, – P. 1763-1769.
26. Myeloperoxidase/nitrite-mediated lipid peroxidation of low-density lipoprotein as modulated by flavonoids / V.A. Kostyuk [et al.] // *FEBS Lett.* – 2003. – Vol. 537. – P. 146–150.
27. Antioxidant and signal modulation properties of plant polyphenols in controlling vascular inflammation. / V.A. Kostyuk [et al.] // *Eur J Pharmacol.* – 2011. – Vol. 658. – P. 248–256.
28. Bravo, L. Polyphenols: Chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance / L. Bravo // *Nutr Rev.* – 1998. – Vol. 56. – P. 317–333.
29. Quantitative analysis of the flavonoid content of commercial tomatoes, onions, lettuce, and celery. / A. Crozier [et al.] // *J Agric Food Chem.* – 1997. – Vol. 45. – P. 590–595.
30. Hirota, S. Tissue and spatial distribution of flavonol and peroxidase in onion bulbs and stability of flavonol glucosides during boiling of the scales / S. Hirota, T. Shimoda, U. Takahama // *J Agric Food Chem.* – 1998. – Vol. 46. – P. 3497–3502.
31. Price, K.R. Effect of storage and domestic processing on the content and composition of flavonol glucosides in onion (*Allium cepa*) / K.R. Price, J.R. Bacon, M.J.C. Rhodes // *J Agric Food Chem.* – 1997. – Vol. 45. – P. 938–942.
32. Composition and content of flavonol glycosides in broccoli florets (*Brassica oleracea*) and their fate during cooking / K. Price [et al.] // *J Sci Food Agric.* – 1998. – Vol. 77. – P. 468–472.
33. Intake of potentially anticarcinogenic flavonoids and their determinants in adults in the Netherlands / M.G.L. Hertog [et al.] // *Nutr Cancer.* – 1993. – Vol. 20. – P. 21–29.
34. Kuhnu, J. The flavonoids. A class of semi-essential food components: their role in human nutrition / J. Kuhnu // *World Rev Nutr Diet.* – 1976. – Vol. 24. – P. 117–191.
35. Flavonoids and the Risk of Renal Cell Carcinoma questionnaire / C. Bosetti [et al.] // *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* – 2007. – Vol. 16. – P. 98–101.
36. Quercetin is recovered in human plasma as conjugated derivatives which retain antioxidant properties / C. Manach [et al.] // *FEBS Letters.* – 1998. – Vol. 426. – P. 331–336.
37. Bioavailability of the dietary antioxidant flavonol quercetin in man / P.C. Hollman [et al.] // *Cancer Letters.* – 1997. – Vol. 114. – P. 139–140.
38. Protocatechuic acid is the major human metabolite of cyanidin-glucosides / P. Vitaglione [et al.] // *J Nutr.* – 2007. – Vol. 137. – P. 2043–2048.
39. Soy isoflavone aglycones are absorbed faster and in higher amounts than their glucosides in humans / T. Izumi [et al.] // *J Nutr.* – 2000. – Vol. 130. – P. 1695–1699.
40. The small intestine can both absorb and glucuronidate luminal flavonoids / J.P.E. Spencer [et al.] // *FEBS Letters.* – 1999. – Vol. 458. – P. 224–230.
41. Deglycosylation of flavonoid and isoflavonoid glycosides by human small intestine and liver beta-glucosidase activity. / A.J. Day [et al.] // *FEBS Lett.* – 1998. – Vol. 436. – P. 71–75.
42. Hollman, P.C.H. Absorption, bioavailability, and metabolism of flavonoids / P.C.H. Hollman // *Pharmaceutical Biol.* – 2004. – Vol. 42. – P. 74–83.
43. Liquid chromatography/electrospray ionization mass spectrometric characterization of flavonol glycosides in tomato extracts and human plasma / P.L. Mauri [et al.] // *Rapid Commun Mass Spectrom.* – 1999. – Vol. 13. – P. 924–931.
44. Ishii, K. Mass spectrometric identification and high-performance liquid chromatographic determination of a flavonoid glycoside naringin in human urine / K. Ishii, T. Furuta, Y. Kasuya // *J Agric Food Chem.* – 2000. – Vol. 48. – P. 56–59.
45. Anthocyanin metabolites in human urine and serum / C.D. Kay [et al.] // *Br J Nutr.* – 2004. – Vol. 91. – P. 933–942.
46. Kay, C.D. Anthocyanins exist in the circulation primarily as metabolites in adult men / C.D. Kay, G.J. Mazza, B.J. Holub // *J Nutr.* – 2005. – Vol. 135. – P. 2582–2588.

47. Wolfram, S. Quercetin-3-Glucoside Is Transported by the Glucose Carrier SGLT1 across the Brush Border Membrane of Rat Small Intestine / S. Wolfram, M. Block, P. Ader // *J Nutr.* – 2002. – Vol. 132. – P. 630–635.
48. Quercetin Glucosides Interact With the Intestinal Glucose Transport Pathway / J.M. Gee [et al.] // *Free Radic Biol Med.* – 1998. – Vol. 25. – P. 19–25.
49. Catechin metabolites after intake of green tea infusions / P.G. Pietta [et al.] // *Biofactors.* – 1998. – Vol. 8. – P. 111–118.
50. Analysis of (–)-epigallocatechin gallate in human serum obtained after ingesting green tea. / T. Unno [et al.] // *Biosci Biotechnol Biochem.* – 1996. – Vol. 60. – P. 2066–2068.
51. Nakagawa, K. Chemiluminiscence-High-Performance Liquid Chromatographic Determination of Tea Catechin, (–)-Epigallocatechin 3-Gallate, at Picomole Levels in Rat and Human Plasma / K. Nakagawa, T. Miyazawa // *Anal Biochem.* – 1997. – Vol. 248. – P. 41–49.
52. Plasma kinetics in man of epicatechin from black chocolate / M. Michelle [et al.] // *Eur J Clin Nutr.* – 1999. – Vol. 53. – P. 22–26.
53. Pietta, P.G. Flavonoids as antioxidants / PG. Pietta // *J Nat Prod.* – 2000. – Vol. 63. – P. 1035–1042.
54. Serafini, M. Effect of ethanol on red wine tannin-protein (BSA) interactions / M. Serafini, G. Maiani, A. Ferro-Luzzi // *J Agric Food Chem.* – 1997. – Vol. 45. – P. 3148–3151.
55. Lotito, S.B. Consumption of flavonoid-rich foods and increased plasma antioxidant capacity in humans: Cause, consequence, or epiphenomenon? / S.B. Lotito, B. Frei // *Free Radic Biol Med.* – 2006. – Vol. 41. – P. 1727–1746.
56. Proanthocyanidin content of selected foods / Nutrient Data Laboratory, Beltsville Human Nutrition Research Center, USDA: USDA Database, 2004. - Available at <http://www.nal.usda.gov/fnic/foodcomp>.
57. Procyanidin dimer B2 [epicatechin-(4β-8)-epicatechin] in human plasma after the consumption of a flavanol-rich cocoa / R.R. Holt [et al.] // *Am J Clin Nutr.* – 2002. – Vol. 76. – P. 798–804.
58. Chocolate intake increases urinary excretion of polyphenol-derived phenolic acids in healthy human subjects. / L.Y. Rios [et al.] // *Am J Clin Nutr.* – 2003. – Vol. 77. – P. 912–918.

PLANT POLYPHENOLS AS A COMPONENT OF FUNCTIONAL FOODS

V.A. Kostyuk

Belarusian State University, Minsk, Belarus

e-mail: kostyuk@bsu.by

Functional foods play an important role in maintaining the human health. Plant polyphenolic compounds (PPC) is one of the most important groups of functional food ingredients needed to improve the structure of the food supply and the prevention of common diseases. Entering the human body with food PPC can have a major impact on numerous metabolic and signaling pathways. In the present review, it was collected and discussed data on classification, chemical structure, biological effects *in vitro* and *in vivo* and mechanisms of antioxidant activity as well as bioavailability of PPC.