

ТОКОФЕРОЛЫ И ТОКОТРИЕНОЛЫ: СВОЙСТВА, ФУНКЦИИ, ПРИРОДНЫЕ ИСТОЧНИКИ. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Л.П. Нилова¹, Т.В. Пилипенко¹, И.Ю. Потороко²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Одним из главных антиоксидантов, поступающих с пищей в организм человека, являются токоферолы (ТФ) и токотриенолы (Т₃), более известные как витамин Е. Восемь витамеров витамина Е (α -, β -, γ - и δ -ТФ и α -, β -, γ - и δ -Т₃) обладают разной антиоксидантной и биологической активностью и по-разному распределяются в продуктах питания. В статье представлен обзор научных исследований об основных природных источниках ТФ и Т₃, поступающих с пищей в организм человека, и их антиоксидантных свойствах, опубликованных за последние годы. Основными источниками природных ТФ и Т₃ являются зерновые культуры, орехи, растительные масла. Среди зерновых культур ТФ преобладают в пшенице, овсе, кукурузе, с максимальным их количеством в зерне проса, а Т₃ – в ячмене и рисе. Зерно черного риса содержит максимальное количество витамеров. Семена киноа содержат шесть витамеров с преобладанием γ -ТФ. В орехах преимущественно содержатся ТФ, причем α -ТФ в миндале > фундуке > макадамии > арахисе и γ -ТФ – в орехе пекан > фисташках > бразильском > грецком > кешью. Т₃ найдены в фисташках, макадамии, кедровом орехах. Основные пищевые растительные масла содержат α -, γ - и δ -ТФ, а β -ТФ и Т₃ практически или полностью отсутствуют. Источниками Т₃ являются пальмовое масло, масло из рисовых отрубей и иногда масло зародышей пшеницы. Масло семян чиа содержит только ТФ с преобладанием γ -ТФ. Содержание ТФ и Т₃ в плодах и овощах не превышает 70 мг/кг с преобладанием α -ТФ, среди которых максимальное количество содержится в плодах облепихи и хеномелеса (японская айва), а также в авокадо, красном перце, брокколи и шпинате.

Ключевые слова: токоферолы, токотриенолы, антиоксидантные свойства, растительное сырье, пищевые продукты.

Введение

Токоферолы (ТФ) и токотриенолы (Т₃), представляющие группу веществ фенольной природы, называемых токолами или токохорманолами, более известны как витамин Е. Они обладают способностью проявлять значительное количество различных биологической функций в клетках растений, животных и человека. Благодаря биологической и антиоксидантной активности, ТФ и Т₃ используют в профилактике и лечении сердечно-сосудистых, нейродегенеративных, онкологических заболеваний, атеросклероза, гиперлипидемии, остеопороза [1, 2]. Этим можно объяснить растущий интерес со стороны нутрициологии к природным источникам ТФ и Т₃, а также их содержанию в пищевых продуктах. В настоящее время значительно трансформировался рынок растительного сырья, с каждым годом появляется новые сведения о природных источниках ТФ и Т₃, что определяет

развитие сегмента обогащенных продуктов питания функциональной направленности. Кроме того, международные коллаборации в научных исследованиях позволяют активно совершенствовать методы пробоподготовки и анализа, что формирует более полную доказательную базу их пользы для здоровья [3, 4, 5].

Целью данного исследования стал аналитический обзор данных, характеризующий значение и свойства фенольных соединения, в частности токоферолов и токотриенолов, базирующийся на доступной современной информации.

В качестве основных информационных модулей, наиболее значимых для формирования пищевых систем нового формата, были определены антиоксидантные свойства и природные источники токоферолов и токотриенолов.

Химическая природа и функции токолов

Токоферолы и токотриенолы называют токохорманолами или токолами, потому что

они химически очень похожи. Молекулярная структура токолов состоит из хроманолового кольца, соединенного с длинной углеродной боковой цепью. Вариации в количестве и положении метильных групп на кольце приводят к образованию различных форм, называемых α -, β -, γ - и δ -ТФ и Т₃, для которых используют термин – витаминер (см. рисунок). Отличия между ТФ и Т₃ связаны со степенью насыщенности боковой углеродной цепи (фитилового хвоста). У ТФ он полностью насыщенный, а у Т₃ с тремя ненасыщенными двойными связями [6, 7].

Восемь витаминер витамина Е (α -, β -, γ - и δ -ТФ и α -, β -, γ - и δ -Т₃), представленных на рисунке, обладают разной антиоксидантной и биологической активностью и по-разному распределяются в продуктах питания. Биологическая активность природных изомеров витамина Е (α -ТФ принятый эквивалент) уменьшается в следующей последовательности: α -ТФ – 1 > β -ТФ – 0,5 > α -Т₃ – 0,3 > γ -ТФ – 0,1 > β -Т₃ – 0,05 > δ -ТФ – 0,03 > γ -Т₃ – 0,01 > δ -Т₃ – не обнаружена [2].

Антиоксидантные свойства токоферолов и токотриенолов

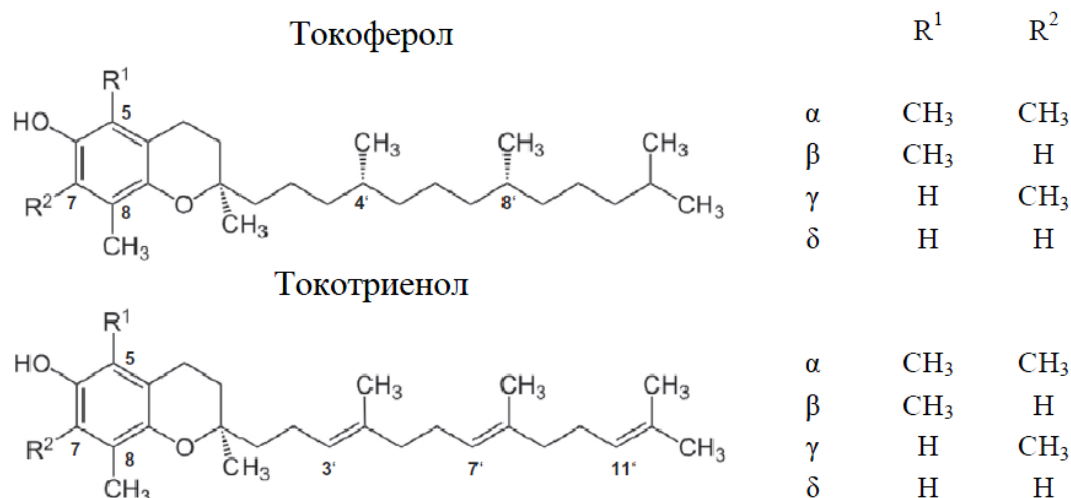
Антиоксидантные свойства ТФ и Т₃ основаны на высокой эффективности и способности перехватывать неспаренный электрон у пероксильных радикалов липидов путем переноса атома водорода гидроксильной группы (одноэлектронный перенос) на радикал, таким образом, восстанавливая липиды. Тем самым они предотвращают окисление ненасыщен-

ных жирных кислот и предохраняют от окисления биологические мембраны [8].

Считается, что среди токолов Т₃ обладают более мощными антиоксидантными свойствами, чем α -ТФ, поскольку ненасыщенная боковая цепь токотриенолов позволяет более эффективно проникать в ткани, которые имеют насыщенные липидные слои, такие как мозг и печень [4].

При концентрации витамина Е в тканях организма человека на уровне 10–50 мкМ он проявляет антиоксидантные свойства, но при повышении концентрации выше физиологической – проявляет прооксидантные свойства, ускоряя перекисное окисление липидов. Такой дуальный эффект связан с природой токоферильного радикала. При взаимодействии с пероксидами α -ТФ превращается в α -токоферил-радикалы, которые за счет раскрытия пиранового цикла и внутримолекулярной перегруппировки трансформируются в углерод-центрированные интермедиаты, окисляющие биосубстраты.

Следует отметить, что наиболее изучены антиоксидантные свойства ТФ. Доказано, что его изомеры (метильные производные) обладают не только разной биологической активностью, но и антирадикальной (АРА) и антиоксидантной (АОА) активностью. Наибольшей биологической активностью обладает природный рацемат D- α -ТФ. В отличие от него биологическая активность синтетического аналога D, L- α -ТФ (рацематная смесь) составляет всего лишь 40 %. Более низкая биологи-



Химическая структура витаминер витамина Е [6]

ческая активность характерна для β -ТФ 20–30 %, γ -ТФ – 10 % и δ -ТФ – 1 % от биологической активности α -ТФ [9]. Аналогичная закономерность характерна и для АРА (константа K_7), которая убывает в ряду: α -ТФ > ($2,6 \cdot 10^6$ л/моль·с) > β -ТФ ($1,8 \cdot 10^6$ л/моль·с) > γ -ТФ – $1,3 \cdot 10^6$ л/моль·с. При этом АОА наоборот возрастает: α -ТФ – 0,3; β -ТФ – 0,45; γ -ТФ – 0,6 [10, 11].

Прикладные аспекты полученных сведений наглядно продемонстрировали исследования на растительных маслах. Так, в оливковом масле при температуре 39 °С изомеры ТФ по разному стабилизируют витамин А, что подтверждает такой же порядок убывания АОА в ряду, %: α -ТФ (100) < β -ТФ (130) < γ -ТФ (180) < δ -ТФ (270) [12]. В кукурузном масле АОА α -ТФ имела дозозависимый эффект, при увеличении его концентрации до 700 мг/кг проявлялся прооксидантный эффект. При этом δ -ТФ, γ -Т₃ и δ -Т₃ не проявляли прооксидантного эффекта [7].

В работах Kim H.J. такое направление изменения АОА токолов объясняется различной реакционной способностью образующихся токофероксильных радикалов [9]. Следует учитывать, что в зависимости от положения образующегося α -токофероксильного радикала в результате превращений может образоваться α -токоферолхинон гидропероксид – токсичный для человека. При боковом положении радикала образуются оксидрадикалы, способствующие продолжению цепи реакций.

АОА Т₃ выше, чем ТФ, при этом, так же как у изомеров ТФ, АОА возрастает от α - к δ -Т₃, что связано со снижением метилирования хроманолового кольца, позволяющее легче встраиваться в биологические мембраны клеток растений, животных и человека. АОА δ -Т₃ в 5,5 раз выше, а γ -Т₃ – в 3 раза, чем α -ТФ [7, 10, 11]. При низких концентрациях витамина Е образующиеся токоферильные радикалы успевают восстанавливаться до исходного токоферола за счет взаимодействия с аскорбиновой кислотой или другим сильным восстановителем, которые достаточно часто присутствуют в системе пищевого продукта. При высоких концентрациях витамина Е образующиеся радикалы не успевают восстанавливаться и образуют комплексы с продуктами перекисной природы, ускоряя распад последних по свободно радикальному механизму. В результате могут образовываться токсичные для человека продукты. Так, токоферилхинон

повреждает белки. Поэтому ограничена суточная норма потребления витамина Е с верхним допустимым уровнем потребления 300 мг ток. экв./сутки.

Природные источники токоферолов и токотриенолов

В настоящее время доказано, что источниками токолов является любое растительное сырье, имеющее в своем составе липиды. Установлено, что общее количество токолов зачастую связано с количеством липидов, однако содержание отдельных витаминеров по-разному распределяется в растительном сырье и часто взаимосвязано с АОА и степенью ненасыщенности жирных кислот липидной фракции [12, 13, 14, 20].

В этой связи развитие информационной базы, характеризующей состав, свойства отдельных видов сырья по их антиоксидантным свойствам является весьма значимым для формирования сегмента продуктов питания нового формата. Нижеизложенный материал, характеризующий природные источники токолов, охватывает некоторые виды растительных сырьевых ресурсов, наиболее часто используемое как основное, так и вспомогательное продовольственное сырье.

Зерновые культуры и семена

Зерновые культуры, являясь основным продовольственным сырьем, играют весьма важную роль как источники токолов. Самые высокие уровни токолов были обнаружены в пшенице и ячмене (табл. 1), причем в яровой пшенице их больше в среднем на 20 %, чем в озимой пшенице [13]. В целом в пшенице преобладают ТФ в виде витаминеров α -ТФ > β -ТФ. Т₃ представлены α - и β -формами с преобладанием последнего.

В ячмене преобладают Т₃, которые представлены в следующей последовательности: α -Т₃ > γ -Т₃ > δ -Т₃, их общее содержание больше в 1,5-2 раза, чем ТФ. ТФ представлены теми же формами витаминеров, как и Т₃, но с максимальным количеством α -ТФ в пределах 9,52-10,55 мг/кг [13, 15]. Технологические процессы, в частности шелушение зерна ячменя может привести почти к полной потере токолов преимущественно ТФ, в то же время Т₃ частично остаются.

Основными источниками Т₃ можно считать зерно овса, проса и риса и по количеству превышает содержание ТФ, однако витаминеры распределены по-разному. В овсе найдены только 3 витаминера: α -ТФ, α -Т₃ и β -Т₃ с преоб-

Таблица 1

Содержание ТФ и Т₃ в зерне и семенах, мг/кг [13–17]

Вид зерна и се- мян	Токоферолы				Токотриенолы			
	α-ТФ	β-ТФ	γ-ТФ	δ-ТФ	α-Т ₃	β-Т ₃	γ-Т ₃	δ-Т ₃
Яровая пшеница	4,02– 19,70	2,12– 5,77	н/о	н/о	1,23– 3,58	4,72– 16,16	н/о	н/о
Озимая пшеница	6,93– 12,95	2,13– 4,76	н/о	н/о	0,94– 2,59	2,11– 13,46	н/о	н/о
Овес	4,92	н/п	н/о	н/о	12,81	1,62	н/п	н/п
Ячмень	9,52– 10,55	–	0,63– 3,35	0,17– 0,29	13,09– 17,76	–	1,84– 10,73	0,36– 0,62
Ячмень шелу- шенный	н/п	н/п	н/п	н/п – 0,005	3,06	н/п – 1,07	н/п – 0,92	н/п
Кукуруза	2,94– 9,79	н/п– 0,05	0,83 – 15,63	0,46	3,15	н/о	7,66	н/п
Просо	4,53	н/о	69,09	1,68	2,36	н/о	4,94	3,82
Рис белый,	н/п	н/п	н/п	н/п	н/п	н/о	6,00	0,28
Рис басмати	н/п	н/о	н/п	н/п	н/п	н/о	2,58	н/о
Рис красный	1,15	н/п	2,51	н/п	н/п	н/п	8,47	0,27
Рис коричневый	4,43	н/п	5,28	н/п	н/п	н/о	25,01	0,86
Рис черный	7,01	1,25	6,32	0,78	1,65	н/п	21,75	1,97
Белое киноа	8,97	0,41	25,89	1,23	0,40	0,78	–	–
Красное киноа	8,03	0,65	43,51	1,82	0,51	0,82	–	–
Черное киноа	8,44	0,86	46,90	2,14	0,62	0,86	–	–
Подсолнечник	102	12,0	н/о	н/о	1,00	н/о	1,00	4,00

Примечание: н/о – не обнаружены; н/п – ниже предела определения

ладанием α-Т₃ [15]. В зерне проса самое высокое содержание γ-ТФ (69,09 мг/кг), значительно превышающее его содержание в других зерновых культурах. Количественное распределение других витаминов практически одинаковое, варьирует в диапазоне от 1,68 до 4,94 мг/кг.

В зерне риса количественный и качественный состав токолов зависит от вида культуры. Так, зерно белого риса содержит преимущественно Т₃ в виде γ- и δ-форм, в зерне риса Басмати количество Т₃ в 2,4 раза меньше и представлены только γ-Т₃. Установлено, что зерно красного, коричневого и черного риса содержит как Т₃, так и ТФ. В красном и коричневом рисе найдены α- и γ-формы ТФ, но преобладают γ-Т₃. В черном рисе в составе токолов отсутствует β-Т₃, а преобладает γ-Т₃, как и в любом зерне риса независимо от вида.

В кукурузе состав витаминов один из самых обширных среди представленных зерно-

вых культур. Из ТФ преобладают α- и γ-формы, а среди витаминов Т₃ – γ-форма. Не обнаружены или находятся ниже предела обнаружения β-форма ТФ и Т₃ и δ-Т₃.

В исследованиях Panfili с соавторами [18] представлены данные о более высоком содержании ТФ и Т₃ в зерновых культурах, с аналогичной динамикой преобладания тех или иных форм токолов: β-Т₃ является основным витамином, содержащимся в пшенице (от 33 до 43 мг/кг СВ), γ-ТФ преобладает в кукурузе (45 мг/кг СВ), а α-Т₃ преобладает в овсе и ячмене (56 и 40 мг/кг СВ, соответственно).

Так, в сладкой кукурузе в процессе развития ядра происходит максимальное накопление через 30 дней после опыления. Наибольшее увеличение характерно для γ-Т₃ и α-ТФ в 14,9 и 22 раза. Из всех изомеров максимальным было содержание γ-Т₃, которое составило 41,6 % от содержания витамина Е. Соотношение ТФ/Т₃ составило 0,89 [16]. В зерне риса

максимальное накопление T_3 происходит на ранних стадиях созревания через 14 дней после цветения, а затем не изменяется [19].

В семенах киноа, содержащих 6,5–7,2 % липидов, состав токолов зависит от вида и окрашенности семян [17]. Общее содержание токолов варьировало от 37,49 до 59,82 мг/кг и в основном состояло из γ - T_3 . T_3 были найдены в незначительных количествах в виде α - и β -форм.

Обобщая представленный материал, вполне правомерно утверждать, что распространение ТФ и T_3 в растительном сырье зависит от многих факторов: генотипа, способа и климатических условий выращивания. Безусловно, возможно регулирование содержания токолов в зерновом сырье и семенах отдельных культур с помощью сроков созревания.

Орехи

Высокое содержание липидов в орехах позволяет рассматривать их как источники токолов (табл. 2).

Данные исследований доказывают, что в орехах преобладают ТФ со значительным преимуществом α - или γ -форм, причем в зависимости от вида. T_3 найдены в следовых количествах в виде α - и γ -форм. Исключение может составить бразильский орех, в некоторых сортах которого было найдено 391 мг/кг γ - T_3 . α -ТФ преобладают в миндале, фундуке, макадамии и арахисе, а γ -ТФ – в кешью, фисташках, грецком и бразильском орехах и оре-

хе пекан. Лидером по содержанию токолов в целом считается миндаль за счет большого количества α -ТФ – 1125–1139 мг/кг. Колебания γ -ТФ в орехах более значительны в зависимости от сорта, места произрастания, сроков хранения [19, 21, 23]. И если орех пекан можно считать лидером этой формы ТФ, но колебания в его содержании составляют от 139 до 869 мг/кг.

Обладая доказанным потенциалом по содержанию токолов и их витаминер, орехи могут в сочетании с другими сырьевыми компонентами эффективно дополнять пищевые системы, сохраняя их антиоксидантную и биологически активную стабильность.

Фрукты и овощи

Фрукты и овощи за счет незначительного количества липидов в своем составе, за исключением отдельных видов (облепиха, авокадо и др.), содержат токолы с преобладанием преимущественно ТФ. Они накапливаются в большей степени в молодых тканях, подвергающихся активному делению клеток, для предотвращения окисления липидов растений [24] (табл. 3).

Общее количество токолов в плодах и овощах не очень велико и составляет от 4,5 мг/кг в сельдерее до 221,8 мг/кг в облепихе. Во всех представленных видах плодов и овощей преобладал α -ТФ, но больше всего его было в плодах облепихи и хеномелеса (японская айва), а также в авокадо, красном перце, брокколи и шпинате.

Таблица 2

Содержание ТФ и T_3 в орехах, мг/кг [19, 21–24]

Вид орехов	Токоферолы				Токотриенолы	
	α -ТФ	β -ТФ	γ -ТФ	δ -ТФ	α - T_3	γ - T_3
Грецкий	90–51,8	< 3,33–2	173–453	44,8–59,9	< 5,00–2,0	< 3,33–4,0
Фундук	177–838	3,0–9,56	31,3–31,7	1,0–3,2	< 5,00	< 3,33
Миндаль	185–1139	< 3,33–4,74	12,2–30,6	< 1,67	< 5,00	< 3,33
Кешью	< 5,00	< 3,33	75,3–116,0	6,32–6,60	< 5,00	< 3,33–3,72
Фисташки	< 5,00–42,2	< 3,33	579–590	10,0–11,1	< 5,00	33,3–36,3
Бразильский	149–175	< 3,33	381–472	1,66–2,93	< 5,00; 391	< 3,33
Макадамия	406–464	< 3,33	< 3,33; 187	< 1,67–23,0	< 5,00	< 3,33; 14,0
Пекан	4,0–97,3	< 3,33–2,7	139–868	8,9–39,9	< 5,00	< 3,33
Кедровый	< 5,00; 26,7	< 3,33	< 3,33; 67,5	< 1,67	< 5,00; 78,9	< 3,33
Арахис	267–281	< 3,33	99,8–124,0	5,83–6,72	< 5,00	< 3,33

Таблица 3

Содержание ТФ и Т₃ в некоторых плодах и овощах мг/кг [12, 25–28]

Вид плодов и овощей	Токоферолы				Токотриенолы			
	α-ТФ	β-ТФ	γ-ТФ	δ-ТФ	α-Т ₃	β-Т ₃	γ-Т ₃	δ-Т ₃
Облепиха	28–176	1,3–17	2,2–15	0,2–3,4	0,2–4,6	0,7–2,3	0,3–3,5	–
Яблоки	0,9–2,1	н/п–0,1	н/п–0,4	н/п–0,1	–	–	–	–
Ежевика	14,3	0,4	14,2	8,5	–	–	–	–
Клюква	12,3	н/п	0,4	–	–	–	3,3	–
Инжир	3,4	н/п	3,8	н/п	0,3	–	–	–
Нектарин	7,0	н/п	0,2	0,1	–	–	–	–
Киви	13,1	–	0,3	–	–	–	1,1	–
Хеномелес	5,45– 28,92	0,02– 3,61	0,02– 0,66	0,06– 1,85	0,36– 5,23	0,22– 5,18	0,90– 23,61	0,22– 8,28
Авокадо	8,15– 23,71	0,14– 1,40	1,3–6,9	0,3	0,3–0,4	–	0,27– 0,43	н/п– 0,47
Красный перец	27,2– 37,8	1,0–1,9	0,3–1,7	0,2–0,4	н/о	н/о	н/о	н/о
Брокколи	33,3– 37,5	0,2–1,0	2,9–4,0	н/п	н/о	н/о	н/о	н/о
Морковь	5,3–10,3	0,2–0,6	н/о	н/о	1,9	н/о	н/о	н/о
Шпинат	39,7	н/о	1,3	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Томаты	5,3–10	н/п–0,4	0,7–3,8	н/п–0,3	н/о	н/о	н/о	н/о
Сельдерей	4,4	0,1	н/п	н/о	н/п	н/о	н/о	н/о

Токотриенолы содержались не только в хеномелесе и облепихе (α-, β- и γ-формы), но и авокадо (α-, γ- и δ-формы), а в клюкве и киви только γ-Т₃. Количество Т₃ не превышало 5 % в плодах облепихи или полностью отсутствовало за исключением плодов хеномелеса, в которых суммарное количество Т₃ превысило ТФ на 20,4 %. Плоды хеномелеса содержали все 8 витаминеров витамина Е с преобладанием γ-Т₃. Вместе с тем количество γ-Т₃ и всех витаминеров в этих плодах сильно варьируется в зависимости от вида и сорта.

Так, по данным Turkiewicz I.P. и соавторов, которые исследовали 19 сортов опытных плодов ханамелиса трех видов, выращенных в Польше, содержание ТФ варьировалось в диапазоне 5,51–37,58 мг/кг, а Т₃ – в диапазоне 2,06–42,30 мг/кг [28].

Учитывая значимость плодов и овощей, определяющих физиологическую ценность пищи, весьма важно, на наш взгляд, использовать представленные данные для расширения понимания их витаминной ценности, а

также вклад при использовании в качестве обогащающих пищевых ингредиентов.

Растительные масла

Растительные масла повсеместно используются в питании во всем мире, однако наиболее потребляемые в России подсолнечное, рапсовое, соевое растительные масла содержат только ТФ, а Т₃ в незначительных количествах (оливковое, кукурузное) (табл. 4).

В большинстве исследований приводятся данные, указывающие на отсутствие Т₃ в оливковых маслах [6, 7]. Однако в исследовании Vouzmaiane A.И и его соавторов приведены данные, подтверждающие, что в оливковом масле «Virgin», полученном из пяти сортов оливок вида *Picholine marocaine*, в трех из них был обнаружен α-Т₃, количество которого варьировалось 1,97–2,92 мг/кг [30].

В составе большинства растительных масел превалирует γ-ТФ, но в подсолнечном масле, масле из зародышей пшеницы и оливковом – α-ТФ. Содержание δ-ТФ в значительных количествах обнаружено только в соевом масле, хотя количественно он уступает γ-ТФ.

Содержание ТФ и Т₃ в пищевых растительных маслах, мг/кг [6, 7, 14, 29–32]

Вид растительного масла	Токоферолы				Токотриенолы			
	α-ТФ	β-ТФ	γ-ТФ	δ-ТФ	α-Т ₃	β-Т ₃	γ-Т ₃	δ-Т ₃
Подсолнечное	542,1–870,5	н/о	21,5–67,4	2,7–22,0	н/п–1,1	н/о	н/п	н/о
Кукурузное	130,9–235,8	н/п	425,4–759,9	43,5–64,8	н/о	н/о	40,8–59,7	н/о
Соевое	69,6–172,6	н/о	495,2–799,1	212,8–305,6	н/о	н/о	н/о	н/о
Рапсовое	132,7–248,2	н/о	303,5–460,7	26,8–39,9	н/о	н/о	н/о	н/о
Льняное	5,4–12,0	н/п	520,0–573,0	75,0–95,0	н/о	н/о	н/о	н/о
Хлопковое	449,3–634,0	н/о	284,5–518,0	24,0–29,5	28,2–84,5	н/о	н/о	н/о
Оливковое	38,4–100,4	1,6–2,1	4,1–5,2	н/о	1,97–2,92	н/о	н/о	н/о

ТФ преобладают и в маслах, реже используемых непосредственно в питании – ореховых, льняном, тыквенном, масле камелии и семян чиа (табл. 5). В масле из семян цитрусовых плодов (апельсина, лимона, танжерина) также преобладает α-ТФ [33].

Масло зародышей пшеницы фактически является единственным из представленных в табл. 5, содержащее значимое количество β-ТФ, хотя в 3–5 раз меньше, чем α-ТФ. Пальмовое масло и масло из рисовых отрубей содержат как ТФ, так и Т₃. Содержание Т₃ различных фракций в 1,5 раза больше в пальмовом масле по сравнению с рисовым. По данным [24] в составе Т₃ пальмового масла преобладают γ- и δ-фракции, количество которых составляет более 50 %. Доля α- и β-Т₃ не превышает 25 % витамина Е.

Вместе с тем существуют и другие данные, согласно которым в масле из рисовых отрубей α-Т₃ превалирует или находится на одном уровне с γ-Т₃, а δ-Т₃ обнаружен в следовых количествах [24]. Возможно, влияние оказывают не только природные факторы, но и степень очистки масла [34]. Так, в результате рафинации пальмового масла увеличивается как в целом количество токолов на 22,9 %, так и суммы Т₃ на 21,2 % (табл. 6). Содержание γ-Т₃, хотя и является максимальным среди то-

колов, но δ-Т₃ составляет лишь 10,3 %. В рафинированном пальмовом масле их количество увеличивается на 6 и 16 %, соответственно для γ- и δ-форм Т₃.

В масле из семян аннато 99 % приходится на Т₃ с преобладанием δ-формы [24, 34, 35]. Его получают путем экстракции с выходом около 3 % и используют для обогащения Т₃ растительных масел.

Повсеместное использование растительных масел в составе пищевых систем направлено на обеспечение их антиоксидантных свойств и снижение рисков окисления липидов. Представленные выше информационные данные имеют практическую значимость, так как позволяют за счет использования соответствующих видов растительных масел или их купажирования с высокой вероятностью сформировать заданные свойства пищевых систем.

Заключение

Одним из направлений науки о питании является изучение состава и свойств природных антиоксидантов, возможности их использования в диетических и лечебно-профилактических целях. Семейство ТФ и Т₃, представляющее собой витамин Е, является одним из важных антиоксидантов, способным предотвращать перекисное окисление липи-

Таблица 5
Содержание ТФ и Т₃ в малораспространенных видах пищевых растительных маслах, мг/кг
[6, 7, 14, 29–32]

Вид растительного масла	Токоферолы				Токотриенолы			
	α-ТФ	β-ТФ	γ-ТФ	δ-ТФ	α-Т ₃	β-Т ₃	γ-Т ₃	δ-Т ₃
Рисовых отрубей	5,9–583,0	1,9–47,0	2,6–212,0	0,3–84,9	275,8–627,0	н/п–26,0	17,4–790,5	1,4–59,0
Арахисовое	133,2–366,4	н/о	113,3–314,5	22,8–38,3	н/о	н/о	н/о	н/о
Кунжутное	н/п–40,0	н/о	214,0–417,0	н/о	н/о	н/о	н/п–3,4	н/п–30,0
Грецкого ореха	74,2–80,0	н/о	290,0–300,8	50,0–83,0	н/о	н/о	н/о	н/о
Лесного ореха	358,4	н/о	102,0	10,8	н/о	н/о	29,8	6,1
Зародышей пшеницы	1510–1920	312–650	н/п–523,0	н/о–5,5	25,0–36,0	н/п–82,0	н/п–18,5	н/п–2,4
Пальмовое	60,5–420,0	н/о–4,2	н/п–0,2	н/о–0,2	57,0–336,0	н/о–8,2	113,0–360,0	33,3–80,0
Тыквенное	73,0	н/о	2945	н/о	–	–	–	–
Масло камелии	59,6–123,4	н/о	6,2–20,3	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о
Масло семян чиа, мг/100г	143,76	78,13	698,32	41,18	–	0,11	0,09	–

Таблица 6
Содержание ТФ и Т₃ в пальмовом масле разной степени очистки и его фракциях, мг/кг [34]

Продукт	α-ТФ	α-Т ₃	γ-Т ₃	δ-Т ₃	Всего
Нерафинированное масло	188	197	274	75	734
Рафинированное масло	240	282	293	87	902
Пальмовый олеин	234	238	294	88	854
Пальмовый стеарин	196	205	248	74	723

дов в клетках растений, животных и человека. В последние годы с развитием аналитических методов исследований появляется все больше данных о содержании в растительных источниках и пищевых продуктах не только ТФ, но и Т₃. Это создает новые возможности в разработке функциональных продуктов питания, формировании диет, позволяет расширить представление о роли ТФ и Т₃ в питании.

Литература

1. Jiang, Q. Natural forms of vitamin E: metabolism, antioxidant, and anti-inflammatory activities and their role in disease prevention and therapy / Q. Jiang // *Free Radical Biology and*

Medicine. – 2014. – № 72. – P.76–90. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2014.03.035.

2. Xia, W. Potential of tocotrienols in the prevention and therapy of Alzheimer's disease / W. Xia, H. Mo // *Journal of Nutritional Biochemistry*. – 2016. – № 31. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jnutbio.2015.10.011.

3. Kanchi, M.M. Tocotrienols: the unsaturated sidekick shifting new paradigms in vitamin E therapeutics / M.M. Kanchi, M.K. Shanmugam, G. Rane, G. Sethi, A.P. Kumar // *Drug Discovery Today*. – 2017. – V. 22. – № 12. – P. 1765–1781. DOI: 10.1016/j.drudis.2017.08.001.

4. Bartosinska, E. GC–MS and LC–MS approaches for determination of tocopherols and tocotrienols in biological and food matrices /

- E. Bartosinska, M. Buszewska-Forajta, D. Siluk // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. – 2016. – № 127. – P. 156–169. DOI: 10.1016/j.jpba.2016.02.051.
5. Saini, R.K. Tocopherols and tocotrienols in plants and their products: A review on methods of extraction, chromatographic separation, and detection / R.K. Saini, Yo.S. Keum // *Food Research International*. – 2016. – № 82. – P. 59–70. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.01.025.
6. De Camargo, A.C. Tocopherols and tocotrienols: Sources, analytical methods, and effects in food and biological systems / A.C. de Camargo, M. Franchin, F. Shahidi // *Encyclopedia of Food Chemistry*. – 2018. – P. 561–570. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22358-5.
7. Коденцова, В.М. Витаминные и антиоксидантные свойства токоферолов / В.М. Коденцова, В.В. Бессонов, В.А. Саркисян, Д.В. Рущик, О.В. Багрянцева, А.А. Кочеткова // *Вопросы диетологии*. – 2018. – Т.8. – № 3. – С. 23–32. DOI: 10.20953/2224-5448-2018-3-23-32.
8. Путилина, Ф.Е. Свободнорадикальное окисление / Ф.Е. Путилина, О.В. Галкина, Н.Д. Ещенко, Г.П. Дижее, И.Е. Красовская – СПб: изд-во Санкт-Петербургского университета. – 2008. – 161 с.
9. Kim H. J. Oxidation mechanism of riboflavin destruction and antioxidant mechanism of tocotrienols: dissertation of Doctor of Philosophy / Hyun Jung Kim – Ohio State University, Columbus. 2007. – 159 p.
10. Шиков А.Н., Растительные масла и масляные экстракты: технология, стандартизация, свойства / А.Н. Шиков, В.Г. Макаров, В.Е. Рыженков. – М.: Издательский дом «Русский врач». 2004. – 264 с.
11. Muller, L. In vitro antioxidant activity of tocopherols and tocotrienols and comparison of vitamin E concentration and lipophilic antioxidant capacity in human plasma. / L. Muller, K. Theile, V. Bohm, // *Mol Nutr Food Res*. – 2010. – № 54(5). – P. 731–742. DOI: 10.1002/mnfr.200900399.
12. Knecht, K. Tocopherol and tocotrienol analysis in raw and cooked vegetables: A validated method with emphasis on sample preparation / K. Knecht, K. Sandfuchs, S.E. Kulling, D. Bunzel // *Food Chemistry*. – 2015. – № 169. – P. 20–27. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.07.099.
13. Lachman, Ja. Tocotrienols and tocopherols in colored-grain wheat, tritordeum and barley / Ja. Lachman, A. Hejtmánková, M. Orsáka, M. Popov, P. Martinek // *Food Chemistry*. – 2018. – № 240. – P.725–735. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.123.
14. Karmowski J., Hintze V., Kschonsek J., Killenberg M., Bohm V. Antioxidant activities of tocopherols/tocotrienols and lipophilic antioxidant capacity of wheat, vegetable oils, milk and milk cream by using photochemiluminescence // *Food Chemistry*. – 2015. – № 175. –P. 593–600. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.12.010.
15. Shammugasamy B., Ramakrishnan Y., Ghazali H.M., Muhammad Kh. Combination of saponification and dispersive liquid-liquidmicroextraction for the determination of tocopherols and tocotrienols in cereals by reversed-phase high-performanceliquid chromatography // *Journal of Chromatography A*. – 2013. – № 1300. – P. 31– 37. DOI: 10.1016/j.chroma.2013.03.036.
16. Xie, L. Evaluation of Biosynthesis, Accumulation and Antioxidant Activity of Vitamin E in Sweet Corn (*Zea mays* L.) during Kernel Development / L. Xie, Yo. Yu, J. Mao, H. Liu, J.G. Hu, T. Li, X. Guo, R.H. Liu // *Int. J. Mol. Sci.* – 2017. – № 18. – P. 2780–2780. DOI: 10.3390/ijms18122780.
17. Tang, Ya. Characterisation of fatty acid, carotenoid, tocopherol/tocotrienol compositions and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. Genotypes / Tang Ya., Li X., Chen P.X., Zhang B., Hernandez M., Zhang H., Marcone M.F., R. Liu, R. Tsao // *Food Chemistry*. – 2015. – № 174. – P. 502–508. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.040.
18. Panfili, G. Normal phase high-performance liquid chromatography method for the determination of tocopherols and tocotrienols in cereals / G. Panfili, A. Fratianni, M. Irano // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2003. – № 51 (14). – P. 3940–3944. DOI: 10.1021/jf030009v.
19. Frank, Ja. Do tocotrienols have potential as neuroprotective dietary factors? / Ja. Frank, X.W.D. Chin, Ch. Schrader, G.P. Eckert, G. Rimbach // *Ageing Research Reviews*. – 2012. – № 11. – P. 163–180. DOI: 10.1016/j.arr.2011.06.006.
20. Matsuzuka, K. Investigation of tocotrienol biosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.) / K. Matsuzuka, E. Kimura, K. Nakagawa, K. Murata, T. Kimura, T. Miyazawa // *Food Chemistry*. – 2013. – № 140. – P. 91–98. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.02.058.
21. Pérez-Fernández, V. Non-aqueous reversed-phase liquid-chromatography of tocophe-

- rols and tocotrienols and their mass spectrometric quantification in pecan nuts / V. Pérez-Fernández, M. Spagnoli, A. Rocco, Z. Aturki, F. Sciubba, F.R. De Salvador, P. Engel, R. Curini, A. Gentili // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2017. – № 64. – P. 171–180. DOI: 10.1016/j.jfca.2017.09.002.
22. Hejtmankova, A. Contents of tocopherols in different types of dry shell fruits / A. Hejtmankova, J. Taborsky, V. Kudelova, K. Kratochvilova // *Agronomy Research*. – 2018. – № 16(S2). – P. 1373–1382. DOI: 10.15159/AR.18.148.
23. Sookwong, Ph. Tocotrienol Distribution in Foods: Estimation of Daily Tocotrienol Intake of Japanese Population / Ph. Sookwong, K. Nakagawa, Ya. Yamaguchi, T. Miyazawa, Sh. Kato, F. Kimura, T. Miyazawa // *J. Agric. Food Chem.* – 2010. – № 58 (6). – P. 3350–3355. DOI: 10.1021/jf903663k.
24. Miyazawa, T. Health benefits of vitamin E in grains, cereals and green vegetables / K. Nakagawa, Ph. Sookwong // *Trends in Food Science & Technology*. – 2011. – № 22. – P. 651–654. DOI: 10.1016/j.tifs.2011.07.004.
25. Chun, J. Tocopherol and tocotrienol contents of raw and processed fruits and vegetables in the United States diet / J. Chun, Ju. Lee, L. Ye, J. Exler, R.R. Eitenmiller // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2006. – № 19. – P. 196–204. DOI: 10.1016/j.jfca.2005.08.001.
26. Vincent, C. Identification of a New Variety of Avocados (*Persea americana* Mill. CV. Bacon) with High Vitamin E and Impact of Cold Storage on Tocochromanols Composition / C. Vincent, T. Mesa, S. Munne-Bosch // *Antioxidants*. – 2020. – № 9. – P. 403–416. DOI: 10.3390/antiox9050403.
27. Ciesarova, Z. Why is sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) so exceptional? A review / Z. Ciesarova, M. Murkovic, K. Cejpek, F. Kreps, B. Tobolkova, R. Koplík, E. Belajova, K. Kukurova, L. Daško, Z. Panovska, D. Revenco, Z. Burčová // *Food Research International*. – 2020. – № 133. – P. 109170. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109170.
28. Turkiewicz, I.P. Carotenoids, chlorophylls, vitamin E and amino acid profile in fruits of nineteen *Chaenomeles* cultivars / I.P. Turkiewicz, A. Wojdyło, K. Tkacz, P. Nowicka // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2020. – № 93. – P. 103608. DOI: 10.1016/j.jfca.2020.103608.
29. Wen, Yu. Assessing the Impact of Oil Types and Grades on Tocopherol and Tocotrienol Contents in Vegetable Oils with Chemometric Methods / Yu. Wen, L. Xu, Ch. Xue, X. Jiang, Z. Wei // *Molecules*. – 2020. – № 25. – P. 5076–5095. DOI: 10.3390/molecules25215076.
30. Bouymajane, A. Characterization of Phenolic Compounds, Vitamin E and Fatty Acids from Monovarietal Virgin Olive Oils of “Picholine marocaine” Cultivar / A. Bouymajane, Ya. O. Majdoub, F. Cacciola, M. Russo, F. Salafia, A. Trozzi, F. R. Filali, P. Dugo, L. Mondello // *Molecules*. – 2020. – № 25. – P. 5428–5442. DOI: 10.3390/molecules25225428.
31. Ahsan, H. A review of characterization of tocotrienols from plant oils and foods / H. Ahsan, A. Ahad, W.A. Siddiqui // *J. Chem. Biol.* – 2015. – № 8 (2). – P. 45–59. DOI: 10.1007/s12154-014-0127-8.
32. Ghafoor, K. An evaluation of bioactive compounds, fatty acid composition and oil quality of chia (*Salvia hispanica* L.) seed roasted at different temperatures / K. Ghafoor, I.A.M. Ahmed, M.M. Özcan, F.Y. Al-Juhaimi, E.E. Babiker, I.U. Azmi // *Food Chemistry*. – 2020. – № 333. – P. 127531. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127531.
33. Malacrida, C.R. Phytochemicals and Antioxidant Activity of Citrus Seed Oils / C.R. Malacrida, M. Kimura, N. Jorge // *Food Sci. Technol. Res.* – 2012. – № 18 (3). – P. 399–404. DOI: 10.3136/fstr.18.399.
34. Kua, Yi.L. A validated, rapid, simple and economical high-performance liquid-chromatography method to quantify palm tocopherol and tocotrienols / Yi.L. Kua, S. Gan, A. Morris, H. Kiat // *Journal of Food Composition and Analysis*. – 2016. – № 53. – P. 22–29.
35. Zobot, G.L. Process integration for producing tocotrienols-rich oil and bixin-rich extract from annatto seeds: A techno-economic approach / G.L. Zobot, M.N. Moraes, M.A.A. Meireles // *Food and Bioprocess Technology*. – 2018. – № 109. – P. 122–138. DOI: 10.1016/j.fbp.2018.03.007.

Нилова Людмила Павловна, кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы сервиса и торговли, Института промышленного менеджмента, экономики и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург), nilova_l_p@mail.ru

Пилипенко Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, профессор, профессор высшей школы биотехнологии и пищевых технологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург), pilipenko_t_w@mail.ru

Потороко Ирина Юрьевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), potorokoi@susu.ru

Поступила в редакцию 20 августа 2020 г.

DOI: 10.14529/food210108

TOCOPHEROLS AND TOKOTRIENOLS: PROPERTIES, FUNCTIONS, NATURAL SOURCES. ANALYTICAL REVIEW

L.P. Nilova¹, T.V. Pilipenko¹, I.Yu. Potoroko²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

One of the main antioxidants that enter the human body with food are tocopherols (Toc) and tocotrienols (T₃), better known as vitamin E. Eight vitamers of vitamin E (α -, β -, γ - and δ -Toc and α -, β -, γ - and δ -T₃) have different antioxidant and biological activity and are distributed in different ways in food. The article provides an overview of scientific studies on the main natural sources of Toc and T₃, which enter the human body with food, and their antioxidant properties, published in recent years. The main sources of natural Toc and T₃ are cereals, nuts, vegetable oils. Among grain crops, Toc predominate in wheat, oats, corn, with their maximum amount in millet grain, and T₃ in barley and rice. A grain of black rice contains the maximum amount of vitamers. Quinoa seeds contain six vitamers with a predominance of γ -Toc. Nuts predominantly contain Toc, with α -Toc in almonds > hazelnuts > macadamia > peanuts and γ -TF in pecans > pistachios > Brazilian > walnuts > cashews. T₃ are found in pistachios, macadamia, pine nuts. The main edible vegetable oils contain α -, γ - and δ -Toc, while β -Toc and T₃ are practically or completely absent. Sources of T₃ include palm oil, rice bran oil, and sometimes wheat germ oil. Chia seed oil contains only Toc with a predominance of γ -Toc. The content of Toc and T₃ in fruits and vegetables does not exceed 70 mg / kg with a predominance of α -Toc, among which the maximum amount is found in the fruits of sea buckthorn and chaenomeles (Japanese quince), as well as in avocado, red pepper, broccoli and spinach.

Keywords: tocopherols, tocotrienols, antioxidant properties, plant raw materials, food products.

References

1. Jiang Q. Natural forms of vitamin E: metabolism, antioxidant, and anti-inflammatory activities and their role in disease prevention and therapy. *Free Radical Biology and Medicine*, 2014, no. 72, pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2014.03.035.
2. Xia W., Mo H. Potential of tocotrienols in the prevention and therapy of Alzheimer's disease. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2016, no. 31, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.jnutbio.2015.10.011.
3. Kanchi M.M., Shanmugam M.K., Rane G., Sethi G., Kumar A.P. Tocotrienols: the unsaturated sidekick shifting new paradigms in vitamin E therapeutics. *Drug Discovery Today*, 2017, vol. 22, no. 12, pp. 1765–1781. DOI: 10.1016/j.drudis.2017.08.001.

4. Bartosinska E. Buszewska-Forajta M., Siluk D. GC–MS and LC–MS approaches for determination of tocopherols and tocotrienols in biological and food matrices. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2016, no. 127, pp. 156–169. DOI: 10.1016/j.jpba.2016.02.051.
5. Saini R.K., Keum Yo.S. Tocopherols and tocotrienols in plants and their products: A review on methods of extraction, chromatographic separation, and detection. *Food Research International*, 2016, no. 82, pp. 59–70. DOI: 10.1016/j.foodres.2016.01.025.
6. De Camargo A.C., Franchin M., Shahidi F. Tocopherols and tocotrienols: Sources, analytical methods, and effects in food and biological systems. *Encyclopedia of Food Chemistry*, 2018. pp. 561–570. DOI: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22358-5.
7. Kodentsova V.M., Bessonov V.V., Sarkisyan V.A., Risnik D.V., Bagryantseva O.V., Kochetkova A.A. [The vitamin and antioxidant properties of tocopherols]. *Vopr. dietol.* [Nutrition], 2018, vol. 8, no. 3, pp. 23-32. DOI: 10.20953/2224-5448-2018-3-23-32. (in Russ.)
8. Putilina F.E., Galkina O.V., Eshchenko N.D., Dizhe G.P., Krasovskaya I.E. *Svobodnoradikal'noe okislenie* [Free radical oxidation]. St. Petersburg: St. Petersburg University Press, 2008, 161 p.
9. Kim H.J. *Oxidation mechanism of riboflavin destruction and antioxidant mechanism of tocotrienols*: dissertation of Doctor of Philosophy. Ohio State University, Columbus. 2007, 159 p.
10. Shikov A.N., Makarov V.G., Ryzhenkov V.E. *Rastitel'nye masla i maslyanye ekstrakty: tekhnologiya, standartizatsiya, svoystva* [Vegetable oils and oil extracts: technology, standardization, properties]. Moscow, 2004. 264 p.
11. Muller L., Theile K., Bohm V. In vitro antioxidant activity of tocopherols and tocotrienols and comparison of vitamin E concentration and lipophilic antioxidant capacity in human plasma. *Mol Nutr Food Res*, 2010, no. 54(5), pp. 731–742. DOI: 10.1002/mnfr.200900399.
12. Knecht K., Sandfuchs K., Kulling S.E., Bunzel D. Tocopherol and tocotrienol analysis in raw and cooked vegetables: A validated method with emphasis on sample preparation. *Food Chemistry*, 2015, no. 169, pp. 20–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.099>.
13. Lachman Ja., Hejtmánková A., Orsáka M., Popov M., Martinek P. Tocotrienols and tocopherols in colored-grain wheat, tritordeum and barley. *Food Chemistry*, 2018, no. 240. pp. 725–735. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.123>.
14. Karmowski J., Hintze V., Kschonsek J., Killenberg M., Bohm V. Antioxidant activities of tocopherols/tocotrienols and lipophilic antioxidant capacity of wheat, vegetable oils, milk and milk cream by using photochemiluminescence. *Food Chemistry*, 2015, no. 175, pp. 593–600. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.12.010.
15. Shammugasamy B., Ramakrishnan Y., Ghazali H.M., Muhammad Kh. Combination of saponification and dispersive liquid-liquid microextraction for the determination of tocopherols and tocotrienols in cereals by reversed-phase high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2013, no. 1300, pp. 31–37. DOI: 10.1016/j.chroma.2013.03.036.
16. Xie L., Yu Yo., Mao J., Liu H., Hu J.G., Li T., Guo X., Liu R.H. Evaluation of Biosynthesis, Accumulation and Antioxidant Activity of Vitamin E in Sweet Corn (*Zea mays* L.) during Kernel Development. *Int. J. Mol. Sci.*, 2017, no. 18, pp. 2780–2780. DOI: 10.3390/ijms18122780.
17. Tang Ya., Li X., Chen P.X., Zhang B., Hernandez M., Zhang H., Marcone M.F., Liu R., Tsao R. Characterisation of fatty acid, carotenoid, tocopherol/tocotrienol compositions and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. *Genotypes. Food Chemistry*, 2015, no. 174, pp. 502–508. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.040.
18. Panfili G., Fratianni A., Irano M. Normal phase high-performance liquid chromatography method for the determination of tocopherols and tocotrienols in cereals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, no. 51 (14), pp. 3940–3944. DOI: 10.1021/jf030009v.
19. Frank Ja., Chin X.W.D., Schrader Ch., Eckert G.P., Rimbach G. Do tocotrienols have potential as neuroprotective dietary factors? *Ageing Research Reviews*, 2012, no. 11, pp. 163–180. DOI: 10.1016/j.arr.2011.06.006.
20. Matsuzuka K., Kimura E., Nakagawa K., Murata K., Kimura T., Miyazawa T. Investigation of tocotrienol biosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.). *Food Chemistry*, 2013, no. 140, pp. 91–98. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.02.058.

21. Hejtmankova A., Taborsky J., Kudelova V., Kratochvilova K. Contents of tocopherols in different types of dry shell fruits. *Agronomy Research*, 2018, no. 16(S2), pp. 1373–1382. DOI: 10.15159/AR.18.148.
22. Pérez-Fernández V., Spagnoli M., Rocco A., Aturki Z., Sciubba F., De Salvador F.R., Engel P., Curini R., Gentili A. Non-aqueous reversed-phase liquid-chromatography of tocopherols and tocotrienols and their mass spectrometric quantification in pecan nuts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, no. 64, pp. 171–180. DOI: 10.1016/j.jfca.2017.09.002.
23. Sookwong Ph., Nakagawa K., Yamaguchi Ya., Miyazawa T., Kato Sh., Kimura F., Miyazawa T. Tocotrienol Distribution in Foods: Estimation of Daily Tocotrienol Intake of Japanese Population. *J. Agric. Food Chem.*, 2010, no. 58 (6), pp. 3350–3355. DOI: 10.1021/jf903663k.
24. Miyazawa T., Sookwong Ph. Health benefits of vitamin E in grains, cereals and green vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 2011, no. 22, pp. 651–654. DOI: 10.1016/j.tifs.2011.07.004.
25. Chun J., Lee Ju., Ye L., Exler J., Eitenmiller R.R. Tocopherol and tocotrienol contents of raw and processed fruits and vegetables in the United States diet. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, no. 19, pp. 196–204. DOI: 10.1016/j.jfca.2005.08.001.
26. Vincent C., Mesa T., Munne-Bosch S. Identification of a New Variety of Avocados (*Persea americana* Mill. CV. Bacon) with High Vitamin E and Impact of Cold Storage on Tocochromanols Composition. *Antioxidants*, 2020, no. 9, pp. 403–416. DOI: 10.3390/antiox9050403.
27. Ciesarova, Z. Why is sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) so exceptional? A review / Z. Ciesarova, M. Murkovic, K. Cejpek, F. Kreps, B. Tobolkova, R. Koplík, E. Belajova, K. Kukurova, L. Daško, Z. Panovska, D. Revenco, Z. Burčová. *Food Research International*, 2020, no. 133, 109170. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109170.
28. Turkiewicz I.P., Wojdyło A., Tkacz K., Nowicka P. Carotenoids, chlorophylls, vitamin E and amino acid profile in fruits of nineteen *Chaenomeles* cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, no. 93, 103608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103608>.
29. Wen Yu., Xu L., Xue Ch., Jiang X., Wei Z. Assessing the Impact of Oil Types and Grades on Tocopherol and Tocotrienol Contents in Vegetable Oils with Chemometric Methods. *Molecules*, 2020, no. 25, pp. 5076–5095. DOI: 10.3390/molecules25215076.
30. Bouymajane A., Majdou Ya.O., Cacciola F., Russo M., Salafia F., Trozzi A., Filali F.R., Dugo P., Mondello L. Characterization of Phenolic Compounds, Vitamin E and Fatty Acids from Monovarietal Virgin Olive Oils of “Picholine marocaine” Cultivar. *Molecules*, 2020, no. 25, pp. 5428–5442. DOI: 10.3390/molecules25225428.
31. Ahsan H., Ahad A., Siddiqui W.A. A review of characterization of tocotrienols from plant oils and foods. *J. Chem. Biol.*, 2015, no. 8 (2), pp. 45–59. DOI: 10.1007/s12154-014-0127-8.
32. Ghafoor K., Ahmed I.A.M., Özcan M.M., Al-Juhaimi F.Y., Babiker E.E., Azmi I.U. An evaluation of bioactive compounds, fatty acid composition and oil quality of chia (*Salvia hispanica* L.) seed roasted at different temperatures. *Food Chemistry*, 2020, no. 333, 127531. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127531.
33. Malacrida C.R., Kimura M., Jorge N. Phytochemicals and Antioxidant Activity of Citrus Seed Oils. *Food Sci. Technol. Res.*, 2012, no. 18 (3), pp. 399–404. DOI: 10.3136/fstr.18.399.
34. Kua Yi.L., Gan S., Morris A., Kiat H. A validated, rapid, simple and economical high-performance liquid-chromatography method to quantify palm tocopherol and tocotrienols. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2016, no. 53, pp. 22–29.
35. Zabot G.L., Moraes M.N., Meireles M.A.A. Process integration for producing tocotrienol-rich oil and bixin-rich extract from annatto seeds: A techno-economic approach. *Food and Bioproducts Processing*, 2018, no. 109, pp. 122–138. DOI: 10.1016/j.fbp.2018.03.007.

Lyudmila P. Nilova, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Higher school of service and trade, Institute of Industrial Management, economics and trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, nilova_l_p@mail.ru

Tatyana V. Pilipenko, candidate of technical sciences, Professor, Professor Graduate School biotechnology and food technologies, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg. pilipenko_t_w@mail.ru

Irina Yu. Potoroko, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, irina_potoroko@mail.ru

Received August 20, 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Нилова, Л.П. Токоферолы и токотриенолы: свойства, функции, природные источники. Аналитический обзор / Л.П. Нилова, Т.В. Пилипенко, И.Ю. Потороко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». – 2021. – Т. 9, № 1. – С. 68–81. DOI: 10.14529/food210108

FOR CITATION

Nilova L.P., Pilipenko T.V., Potoroko I.Yu. Tocopherols and Tokotrienols: Properties, Functions, Natural Sources. Analytical Review. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 68–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/food210108
