

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ВЫТВОРЧАСЦІ
PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTION

УДК 665.345.4:665.112

Поступила в редакцию 20.10.2016

Received 20.10.2016

О. И. Шадыро, А. А. Сосновская, И. П. Едимечева*Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем», Минск, Беларусь*

**РАЗРАБОТКА УСТОЧИВЫХ К ОКИСЛЕНИЮ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ
ДОБАВОК К ПИЩЕ НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНОГО МАСЛА**

Изучено влияние добавок ряда витаминов и других биологически активных веществ (БАВ) (α -токоферол, α -токоферола ацетат, холекальциферол, β -каротин, лютеин, зеаксантин, коэнзим Q₁₀, селенометионин) на устойчивость льняного масла к окислению в зависимости от концентрации и состава композиций добавок. С этой целью получены кинетические закономерности накопления в льняном масле первичных и вторичных продуктов окисления, свободных жирных кислот, а также закономерности расходования БАВ при хранении масла с их добавками. Показано, что вещества, используемые для обогащения льняного масла, в зависимости от их строения и концентрации могут проявлять как антиоксидантные, так и прооксидантные свойства. Для обеспечения антиокислительной защиты обогащенного льняного масла изучено совместное влияние добавок БАВ и ряда синтетических и природных ингибиторов окисления на устойчивость льняного масла к окислительным изменениям. Найдены эффективные и безопасные стабилизаторы обогащенного БАВ льняного масла, позволяющие существенно ингибировать процессы окисления и окислительной деструкции, сократить потери БАВ, а значит, увеличить сроки хранения масла. На основании полученных данных разработаны рецептуры и технологии получения новых, устойчивых к окислению биологически активных добавок к пище (БАД) на основе льняного масла и организовано их производство. Это позволит расширить ассортимент доступных широкому кругу потребителей ценных продуктов на основе льняного масла; повысить качество питания за счет увеличения в нем доли полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) омега-3, витаминов и ряда других ценных БАВ и будет способствовать оздоровлению населения Беларуси.

Ключевые слова: масло льняное, окисление липидов, антиоксиданты, витамины, стабилизация, БАД

O. I. Shadyro, A. A. Sosnovskaya, I. P. Edimecheva*Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus*

**DEVELOPMENT OF OXIDATION-RESISTANT BIOLOGICALLY ACTIVE FOOD SUPPLEMENTS BASED
ON FLAXSEED OIL**

The effects of a number of vitamins and other biologically active substances (BAS) (α -tocopherol, α -tocopherol acetate, cholecalciferol, β -carotene, lutein, zeaxanthin, coenzyme Q₁₀ and selenomethionine) on oxidation stability of flaxseed oil depending on concentration and compositions of the supplements were studied. For this purpose kinetic regularities data on accumulation of primary and secondary oxidation products, free fatty acids and BAS consumption during storage of flaxseed oil with additives was obtained. It has been shown that substances used to enrich the flaxseed oil, can show both antioxidant and prooxidant properties depending on their structure and concentration. The combined effect of the BAS and a number of synthetic and natural inhibitors on the oxidation stability of flaxseed oil for providing antioxidant protection of enriched oil was studied. Efficient and safe stabilizers for the BAS-enriched flaxseed oil were obtained, allowing to significantly inhibit the oxidation and oxidative degradation, reduce the BAS loss and therefore increase the oil shelf life. Based on the obtained data, formulations and production technologies of new oxidation-resistant biologically active food supplements (BAFS) based on flaxseed oil were developed, and manufacture of the supplements was arranged. This will allow to expand the assortment of available for a wide range of consumers products based on flaxseed oil; will improve the nutrition quality due to increase of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) omega-3 level, vitamins and other valuable bioactive substances, and will contribute to health improvement of the population in Belarus.

Keywords: flaxseed oil, lipid oxidation, antioxidants, vitamins, stabilization, BAFS

Введение. В настоящее время является общепризнанной исключительная важность полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) омега-3 для поддержания физического и психического здоровья, предупреждения целого ряда заболеваний [1]. В то же время в рационе современного человека катастрофически не хватает жирных кислот омега-3 [2]. В ликвидации их дефицита и улучшении рациона питания значительную роль играет потребление льняного масла, которое является самым богатым растительным источником альфа-линоленовой кислоты (АЛК), относящейся к семейству ПНЖК омега-3. Благодаря высокому содержанию АЛК льняное масло может изменять продукцию эйкозаноидов, прокоагулянтную активность и другие мембраносвязанные реакции и проявлять гиполипидемическое, гипотензивное, антиаллергическое, антиаритмическое, тромболитическое свойства. Многочисленными исследованиями показано, что льняное масло оказывает благотворное влияние в предупреждении и лечении сердечно-сосудистых, онкологических и целого ряда других заболеваний [3, 4]. Как следствие, перспективным поэтому является использование льняного масла в составе лечебных диет, создание новых полезных продуктов на его основе, таких как биологически активные добавки к пище и специализированные продукты питания (СПП), разработка и производство которых – один из возможных способов оптимизации питания населения на современном этапе, который может быть реализован с использованием имеющихся мощностей пищевого и фармацевтического производств. Не являясь лекарством, такие продукты могут быстро и эффективно осуществлять коррекцию обменных процессов при дефиците незаменимых пищевых веществ и быть действенным фактором профилактики заболеваний.

В то же время большое содержание АЛК, в молекуле которой присутствуют три двойные связи, обуславливает высокую склонность льняного масла к окислению, которое приводит к образованию токсичных соединений, изменению вкуса, запаха и цвета масла, снижению питательной ценности за короткое время хранения. С другой стороны, в условиях недостатка в организме антиоксидантов (АО) поступление в него ПНЖК может приводить к индукции пероксидного окисления липидов (ПОЛ), образованию свободных радикалов со сдвигами в сторону повышения атерогенности и канцерогенеза [5, 6]. Для обеспечения положительного эффекта для здоровья человека длительное потребление льняного и других полиненасыщенных масел в лечебно-профилактических целях должно сопровождаться дополнительным приемом АО, эффективно ингибирующих процессы ПОЛ в организме.

Проводимые учеными разных стран исследования по созданию БАДов и СПП на основе льняного масла направлены на решение трех основных задач:

- 1) адекватное обеспечение организма антиоксидантами одновременно с поступлением ПНЖК;
- 2) повышение устойчивости льняного масла к окислительным изменениям и тем самым увеличение допустимого срока его хранения;
- 3) усиление лечебно-профилактического действия льняного масла.

Цель настоящего исследования – разработка новых устойчивых к окислению БАДов на основе льняного масла, эффективных при профилактике и лечении широкого спектра заболеваний.

Материалы и методы исследования. Льняное масло для исследований получали от компании ООО «Клуб «Фарм-Эко» (Республика Беларусь). Масло было получено путем холодного отжима из сухих очищенных семян льна масличного на шнековом прессе (температура масла на выходе из пресса не превышала 40 °С) с последующим отстаиванием в течение суток. В работе использовали β-каротин от Fluka, лютеин, зеаксантин, dl-α-токоферол, dl-α-токоферола ацетат, d-δ-токоферол, холекальциферол, коэнзим Q₁₀, трет-бутилгидрохинон (ТБГХ), *n*-пропил-3,4,5-тригидроксibenзоат (пропилгаллат), 2,6-ди-трет-бутил-4-метил-фенол (БОТ), 6-О-пальмитоил-L-аскорбиновая кислота, 6-О-стеароил-L-аскорбиновая кислота от Sigma-Aldrich, роноксан А и смесь токоферолов (Mixed tocopherols 95) от DSM Nutritional Products Ltd., селенометионин производства Института физико-органической химии НАН Беларуси. Все реагенты, используемые для анализа растительных масел, были аналитической степени чистоты (> 95 %) и использовались без дополнительной очистки. Продажный *n*-анизидин от РЕАХИМ (РФ) перед использованием очищали с использованием метода вакуумной сублимации. Растворители для ВЭЖХ были хроматографической чистоты от Sigma-Aldrich, аналитические

стандарты: смесь эфиров жирных кислот от Supelco, наборы токоферолов фирмы Merck и фитостеролов от Sigma, каротиноиды от Fluka, коэнзимы Q₉ и Q₁₀ от Sigma-Aldrich.

Для оценки скорости окисления льняного масла использовали ускоренный кинетический метод. Контрольные образцы масла массой (100±0,1) г и опытные образцы с добавками БАВ и стабилизаторов хранили в течение 12 мес. и более в темноте при комнатной температуре (20±5) °С и свободном доступе кислорода воздуха. При этом соотношение площади поверхности контакта с воздухом к объему масла сохранялось постоянным в течение нужного времени и составляло 0,16 см⁻¹. Для каждой концентрации добавки готовили серии проб масла. Периодически с интервалом 1–2 месяца из каждой серии проб изымали три флакона для определения количества гидропероксидов и других показателей качества масла.

Оценку окислительной устойчивости льняного масла и эффективности антиоксидантов в масле проводили также и с использованием стандартного метода ускоренного окисления в соответствии с ГОСТ Р 53160–2008 (ISO 6886:2006). Использовали прибор 892 Professional Rancimat, окисление масла проводили при температуре 100 °С и продувке воздуха со скоростью 20 л/ч, масса пробы масла составляла 3 г. Регистрацию индукционного времени выполняли в автоматическом режиме с помощью программы StabNet 1.0. Для каждого образца определяли время индукции не менее 3 раз, полученные результаты усредняли. Эффективность стабилизации (фактор стабилизации) оценивали отношением периодов индукции окисления льняного масла со стабилизирующими добавками и без них.

Пероксидное, кислотное и анизидиновое числа (ПЧ, КЧ, АЧ) в пробах определяли в соответствии со стандартными методами: СТБ ГОСТ Р 51487–2001, ГОСТ 31933–2012, СТБ 1869–2008 (ISO 6885:2006).

Для определения жирнокислотного состава глицеридов льняного масла проводили их переэтерификацию по стандартному методу (ГОСТ 30418–96) с последующим хроматографическим анализом полученных метиловых эфиров на газовом хроматографе Shimadzu GC-17A согласно МВИ.МН 4358-2012¹. Идентификацию жирных кислот (ЖК) проводили по времени выхода с использованием внешних стандартов. Содержание ЖК рассчитывали методом внутренней нормализации.

Содержание индивидуальных токоферолов и фитостеролов в пробах определяли методом ГЖХ². Для определения каротиноидов и коэнзимов Q использовали методы ВЭЖХ³.

Все измерения были выполнены в трехкратной повторности, результаты представлены как среднее арифметическое ± стандартное отклонение (SD). Достоверность результатов оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента. Различия считали достоверными при *P*<0,05.

Результаты и их обсуждение. В данной работе представлены исследования для двух образцов льняного масла, различающихся по жирнокислотному составу и окислительной устойчивости. В таблице приведены данные по составу композиций жирных кислот и биологически активных минорных компонентов исходных образцов масла, а также значениям основных показателей качества масла. Согласно экспериментальным данным, льняное масло содержит большое количество ПНЖК, из которых на долю АЛК (омега-3) приходится 76,0 и 80,7 % от суммы ЖК в образцах №1 и №2 соответственно. Масло содержит также комплекс жирорастворимых минорных компонентов: токоферолов, каротиноидов, коэнзимов Q, фитостеролов, в значительной степени обеспечивающих окислительную стабильность масла. В составе композиции эндогенных антиоксидантов основными являются токоферолы. При этом в изученном льняном масле на долю γ-токоферола, который является основной формой витамина Е в пищевых продуктах, приходится 91,9–94,1 % от общего количества токоферолов. Основным каротиноидом льняного

¹ Едимичева, И. П. Химический состав и окислительная стабильность льняного масла / И. П. Едимичева, А. А. Сосновская, И. О. Шадыро // Пищ. пром-сть: наука и технологии. – 2013. – №4. – С. 99–106.

² Шадыро, О. И. Влияние физической рафинации на содержание токоферолов и фитостероидов в рапсовом масле / О. И. Шадыро, А. А. Сосновская, И. П. Едимичева // Масложир. пром-сть. – 2008. – №6. – С. 20–22.

³ МВИ.МН 4358-2012. Методика выполнения измерений содержания коэнзима Q₁₀ в льняном масле, обогащенном коэнзимом Q₁₀, методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. – Минск, 2012. – 27 с.; Едимичева, И. П. Химический состав и окислительная стабильность льняного масла / И. П. Едимичева, А. А. Сосновская, И. О. Шадыро // Пищ. пром-сть: наука и технологии. – 2013. – №4. – С. 99–106.

масла является лютеин, содержание которого составляет 73,3 и 71,7 % от общего количества каротиноидов в образцах №1 и №2 соответственно, на долю β -каротина приходится только 8,2 и 11,9 %. Основными фитостеролами являются β -ситостерол, кампестерол и циклоартенол. Присутствие в растительных маслах эндогенных минорных компонентов необходимо учитывать при подборе антиоксидантов, обеспечивающих эффективную стабилизацию масел. Низкие величины пероксидного, кислотного и анизидинового чисел, характеризующих степень окислительной порчи растительных масел (содержание гидропероксидов, свободных жирных кислот и суммарное содержание вторичных карбонильных продуктов окисления – главным образом α - и β -ненасыщенных альдегидов соответственно), свидетельствуют о высоком качестве взятых для исследования образцов льняного масла.

Т а б л и ц а 1. Характеристика изученных образцов льняного масла

T a b l e 1. Specification of the studied linseed oil samples

Показатель	Образец №1	Образец №2
Жирные кислоты, % от суммы:		
С 16:0	4,52±0,18	5,90±0,15
С 18:0	3,09±0,18	4,38±0,17
С 18:1 n-9	13,14±0,76	20,15±0,90
С 18:2 n-6	15,27±0,64	16,58±0,70
С 18:3 n-3	63,76±3,02	52,63±2,92
другие	0,24±0,01	0,36±0,02
Сумма ПНЖК	79,03±3,72	69,21±3,67
Токоферолы, мг%:		
γ	49,38±2,21	58,64±2,80
α	1,73±0,11	1,38±0,11
δ	2,62±0,07	2,32±0,05
сумма	53,73±2,38	62,34±2,96
Каротиноиды, мг%:		
β -каротин	0,21±0,02	0,43±0,03
лютеин	1,87±0,10	2,58±0,14
другие	0,47±0,03	0,59±0,04
сумма	2,55±0,15	3,60±0,21
Коэнзим Q ₁₀ , мг%	2,93±0,29	4,21±0,43
Фитостеролы, мг%:		
β -ситостерол	159,54±14,30	208,26±17,29
кампестерол	103,45±9,22	131,84±10,62
циклоартенол	196,43±16,51	217,42±18,46
другие	67,98±6,09	86,19±7,52
сумма	527,40±47,46	643,71±56,40
ПЧ, мг-экв O ₂ /кг	0,75±0,05	1,18±0,09
КЧ, мг КОН/г	0,60±0,04	0,97±0,05
АЧ, у.е.	0,47±0,02	1,10±0,05

С целью разработки новых устойчивых к окислению БАДов на основе льняного масла в качестве добавок для его обогащения нами выбраны соединения, обеспечивающие не только усиление лечебно-профилактического действия льняного масла, но и способные, согласно литературным данным [7–10], проявлять синергизм с природными и синтетическими антиоксидантами в ингибировании окислительных изменений льняного масла и увеличении допустимого срока его хранения. Использованы такие БАВ, как α -токоферол, α -токоферола ацетат, β -каротин, лютеин, зеаксантин, коэнзим Q₁₀, селенометионин, холекальциферол (витамин D3). Токоферолы (витамин E), β -каротин и другие каротиноиды, а также селен являются одними из важных пищевых антиоксидантов, которые способны блокировать повреждающее действие свободных радикалов, атакующих основные компоненты клетки, в частности, белки, ДНК и липиды оказывают в организме человека и животных весьма многогранное действие: обладают радиопротекторными свойствами, стимулируют иммунную систему, эффективны для профилактики многих форм рака [11–13]. Так, гидроксилсодержащие каротиноиды лютеин и образующийся из него в тканях

глаза зеаксантин – основные компоненты экранирующей и антиоксидантной системы защиты глаза от повреждающего воздействия светового потока и особенно его наиболее агрессивной части – ультрафиолетового излучения [14]. Коэнзим Q_{10} (убихинон) – витаминоподобный кофермент, участвует в реакции окислительного фосфорилирования в дыхательной цепи митохондрий клеток. Оказывает клинически значимое антиоксидантное действие, обусловленное главным образом его восстановленной формой ($CoQ_{10}H_2$), обладает антистрессовыми и антиканцерогенными свойствами, усиливает иммунную защиту организма и может способствовать торможению процессов старения [15]. Важнейшая функция, за которую отвечает витамин D, – формирование и обновление костной ткани, ведь без него в организме не усваивается ни кальций, ни фосфор [12]. Но у него есть и множество других задач, среди них – регуляция клеточного деления и управление дифференцировкой клеток, регуляция иммунного ответа и секреция гормонов [16].

Изучено влияние добавок БАВ на окислительную стабильность льняного масла в зависимости от концентрации и состава композиций добавок. С этой целью получены кинетические закономерности накопления в льняном масле первичных и вторичных продуктов окисления, свободных жирных кислот, а также расходования БАВ при хранении масла без добавок и с добавками БАВ в условиях ускоренного окисления – при свободном доступе воздуха и комнатной температуре. Данные, характеризующие процесс окисления в таких условиях, позволяют в какой-то мере моделировать процесс окислительного «старения» льняного масла, протекающий после вскрытия потребительской тары и поступления кислорода воздуха. Концентрации БАВ, использованных для обогащения льняного масла, подбирались с учетом рекомендованных величин суточного потребления БАВ.

Данные по изменению концентрации гидропероксидов и вторичных продуктов окисления от времени хранения для одного из образцов льняного масла (образец № 1) без добавок и с добавками различных концентраций коэнзима Q_{10} приведены на рис. 1.

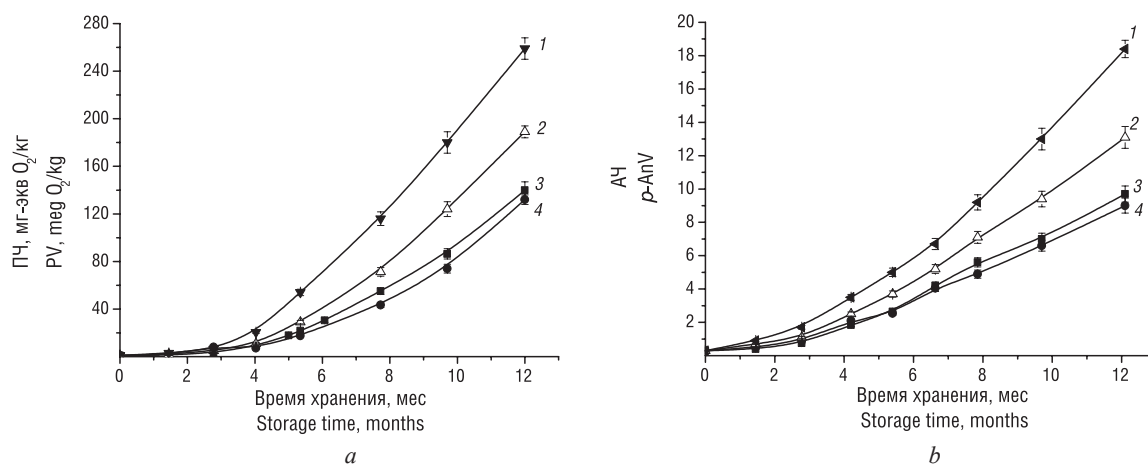


Рис. 1. Накопление гидропероксидов (а) и вторичных продуктов окисления (б) при хранении льняного масла с добавками коэнзима Q_{10} при комнатной температуре и свободном доступе воздуха: 1 – CoQ_{10} , 200 мг%; 2 – CoQ_{10} , 150 мг%; 3 – без добавок; 4 – CoQ_{10} , 100 мг%

Fig. 1. Accumulation of hydroperoxides (a) and secondary oxidation products (b) during storage of flaxseed oil with coenzyme Q_{10} additives at room temperature and free air access: 1 – CoQ_{10} , 200 mg%; 2 – CoQ_{10} , 150 mg%; 3 – no additives; 4 – CoQ_{10} , 100 mg%

Согласно данным рис. 1, окислительная устойчивость льняного масла при добавлении к нему коэнзима Q_{10} зависит от концентрации добавки. С увеличением концентрации коэнзима в масле от 100 до 200 мг% (мг/100 г масла) устойчивость льняного масла к окислению снижается, при этом окислительная устойчивость масла с добавкой коэнзима в концентрации 100 мг% несколько выше, чем масла без добавок (контроль). Для концентраций добавки 150 и 200 мг% накопление гидропероксидов и вторичных продуктов окисления, а также СЖК интенсифицируется по сравнению с маслом без добавок. Величина КЧ после 12 мес. хранения увеличивается для образца масла без добавок от 0,60 до 0,82 мг КОН/г, для масла с добавкой 100 мг% коэнзима Q_{10} –

до 0,88 мг КОН/г, с добавкой 200 мг% коэнзима – до 1,18 мг КОН/г. Прооксидантное действие коэнзима Q_{10} в льняном масле при концентрациях, превышающих 100 мг% ($1,16 \cdot 10^{-3}$ М), может быть связано с возможностью участия коэнзима в процессах ПОЛ льняного масла, в частности, за счет взаимодействия молекул коэнзима с остатками ПНЖК липидов льняного масла с образованием первичных радикалов липидов.

На рис. 2 приведены кинетические кривые накопления гидропероксидов и вторичных продуктов окисления льняного масла (образец №2) с добавками различных концентраций β -каротина.

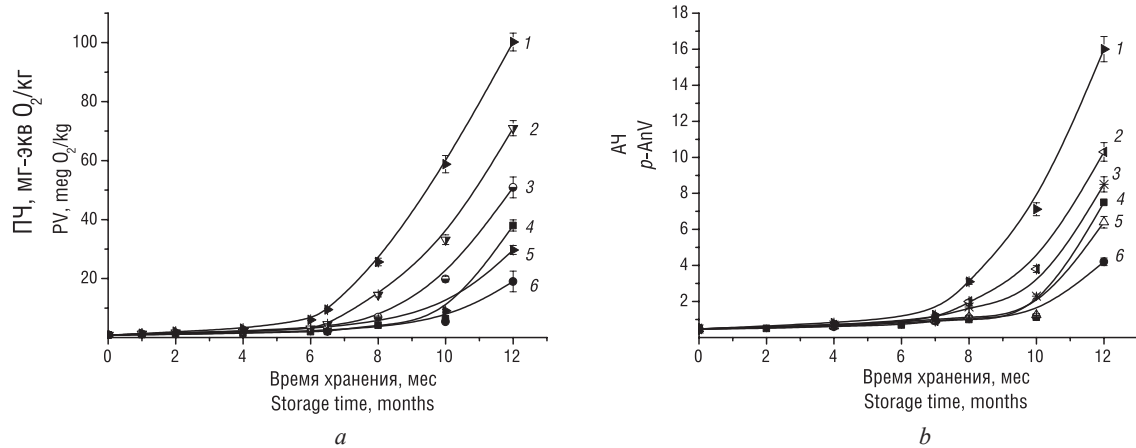


Рис. 2. Изменение пероксидного (а) и анидинового (б) чисел льняного масла с добавками β -каротина в процессе хранения при комнатной температуре и свободном доступе воздуха: 1 – Car, 25,0 мг%; 2 – Car, 20,0 мг%; 3 – Car, 15,0 мг%; 4 – масло без добавок; 5 – Car, 10,0 мг%; 6 – Car, 5,0 мг%

Fig. 2. Changes in peroxide (a) and anisidine (b) values of flaxseed oil with additives of β -carotene when stored at room temperature and free air access: 1 – Car, 25.0 mg%; 2 – Car, 20.0 mg%; 3 – Car, 15.0 mg%; 4 – no additives; 5 – Car, 10.0 mg%; 6 – Car, 5.0 mg%

Согласно экспериментальным данным, добавка к льняному β -каротина в концентрации 5,0 мг% ($9,3 \cdot 10^{-5}$ М) оказывает стабилизирующее действие – процесс накопления продуктов окисления замедляется. При увеличении концентрации добавки до 10,0 мг% окислительная стабильность льняного масла незначительно отличается от контроля. Дальнейшее повышение содержания β -каротина приводит к существенной интенсификации процессов окисления и окислительной деструкции льняного масла.

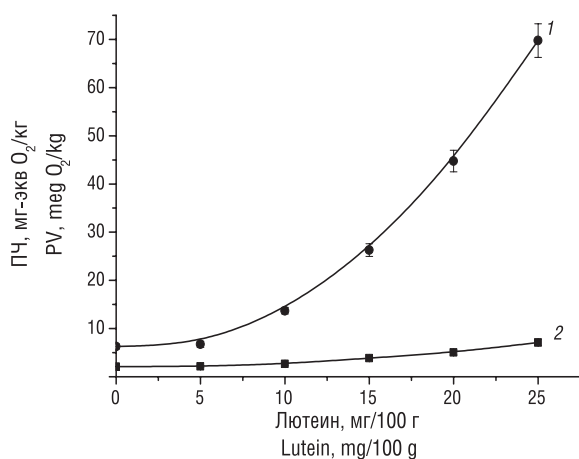


Рис. 3. Зависимость содержания гидропероксидов в льняном масле от концентрации добавок лютеина после 6 мес. (2) и 10 мес. (1) хранения масла при комнатной температуре и свободном доступе воздуха

Fig. 3. Dependence of hydroperoxides level in flaxseed oil from concentration of lutein additives after 6 (2) and 10 (1) months of oil storage at room temperature and free air access

Схожие зависимости получены нами и для льняного масла, обогащенного лютеином в интервале концентраций 5,0–25,0 мг% и зеаксантином в интервале концентраций 1,5–15,5 мг%: при концентрациях выше 5 мг% эти каротиноиды оказывают прооксидантный эффект, т. е. накопление продуктов окисления в их присутствии интенсифицируется, что свидетельствует о снижении окислительной стабильности льняного масла. На рис. 3 приведены зависимости ПЧ от концентрации добавки лютеина при хранении льняного масла в течение 6 и 10 мес.

Прооксидантное действие каротиноидов в льняном и других растительных маслах обусловлено возможностью их участия в процессах ПОЛ. Каротиноиды имеют в своей структуре конъюгированную полиеновую цепь с чередующимися двойными связями. За счет сопряжения электронов π -связей указанные соединения могут легко окисляться и восстанавливаться

с образованием стабильных ион-радикалов. Катион-радикал β -каротина, имеющий более высокий одноэлектронный потенциал восстановления (1060 мВ), чем ПНЖК (600 мВ), может действовать как прооксидант за счет отрыва атома водорода от ПНЖК и генерирования новых радикалов жирных кислот [17]. Кроме того, пероксидные радикалы липидов могут присоединять молекулы β -каротина с образованием каротинпероксидного радикала ($\text{ROO}-\text{Car}\cdot$), особенно при концентрациях кислорода выше 150 мм рт. ст. [18]. Каротинпероксидный радикал вступает в реакцию с кислородом и затем с молекулами липидов с образованием радикалов алкильного типа, которые продолжают процесс пероксидного окисления [19].

Содержание каротиноидов при хранении льняного масла снижается за счет протекающих процессов окисления. Потери каротиноидов возрастают с увеличением исходной концентрации добавки, что видно на рис. 4 на примере β -каротина.

Согласно экспериментальным данным, после 12 мес хранения льняного масла с добавкой β -каротина в концентрации 5,0; 10,0; 15,0 и 25,0 мг/100 г (исходная концентрация добавки) его потери составили 39,1; 43,4; 55,7 и 66,8 % соответственно. Среди продуктов превращений каротиноидов в липидных модельных системах и растительных маслах найдены гидроксиды и эпокси-каротины, каротинсодержащие продукты с высокой молекулярной массой, которые могут образоваться за счет реакций катион-радикала β -каротина со свободными радикалами жирных кислот и/или триплетным кислородом [8].

При введении добавок селенометионина окислительная устойчивость льняного масла также зависит от концентрации добавки. Согласно полученным нами экспериментальным данным, при концентрации селенометионина 0,22 мг% (0,1 мг% Se) устойчивость масла к окислению практически не изменяется по сравнению с контролем, при концентрациях добавки 0,55 и 1,10 мг% (0,25 и 0,50 мг% Se соответственно) накопление первичных и вторичных продуктов окисления в масле при хранении интенсифицируется, причем с увеличением концентрации добавки ее прооксидантный эффект выражен в большей степени. Установлено, что добавки α -токоферола и α -токоферола ацетата при их концентрациях 30–80 мг/100 г, а также витамина D_3 при концентрациях 30–100 мкг/100 г не изменяют окислительную стабильность льняного масла.

Таким образом, проведенные исследования показали, что витамины и другие БАВ, используемые для обогащения льняного масла, в зависимости от природы добавки и ее концентрации в масле могут как ингибировать процессы окисления и окислительной деструкции липидов льняного масла, так и ускорять их.

Как отмечалось выше, льняное масло уже содержит комплекс нативных антиоксидантов и их синергистов. Токоферолы – наиболее распространенные АО в растительных маслах, они конкурируют с ненасыщенными жирами и маслами за пероксидные радикалы липидов, которые взаимодействуют с токоферолами намного быстрее (константы скорости реакций от 10^4 до $10^9 \text{ M}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$), чем с липидами (константы скорости реакций от 10 до $60 \text{ M}^{-1} \cdot \text{c}^{-1}$). Одна молекула токоферола может защитить от 10^3 до 10^8 молекул ПНЖК при низких величинах пероксидных чисел [20]. Среди эндогенных АО льняного масла основным является γ -токоферол, который в растительных маслах в большинстве случаев ведет себя как более сильный антиоксидант по сравнению с α -токоферолом [20, 21]. В изученных образцах масла концентрация нативного γ -токоферола составила $1,19 \cdot 10^{-3} \text{ M}$ и $1,40 \cdot 10^{-3} \text{ M}$. При обогащении льняного масла витаминами и другими БАВ необходимо учитывать межмолекулярные взаимодействия АО в процессе окисления, которые могут

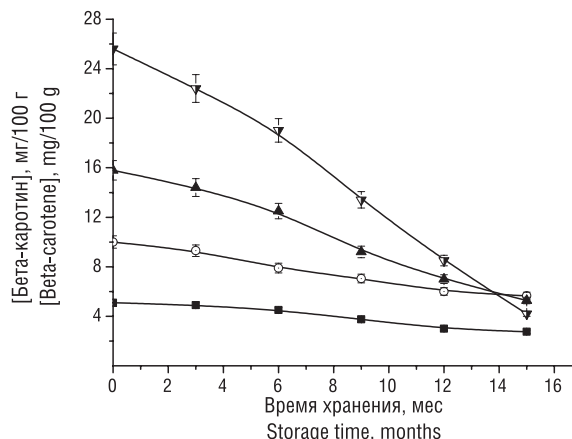


Рис. 4. Изменение концентрации β -каротина в льняном масле в зависимости от исходной концентрации добавки в процессе хранения масла при комнатной температуре и свободном доступе воздуха

Fig. 4. Changing of β -carotene concentration in flaxseed oil depending on the initial concentration of additive during oil storage at room temperature and free air access

привести как к синергизму, так и к антагонизму [10, 22]. Так, коэнзим Q_{10} в восстановленной форме (убихинол) участвует в регенерации токоферола и между ними установлено проявление синергизма [10]. В случае льняного масла, обогащенного коэнзимом Q_{10} , нельзя исключить возможность антагонизма между γ -токоферолом (фенольный АО) и коэнзимом (хинонный АО) [22].

С целью обеспечения эффективной антиокислительной защиты БАДов на основе льняного масла нами изучено совместное влияние добавок БАВ и различных синтетических и природных ингибиторов окисления на окислительную устойчивость льняного масла. Изучены синтетические фенольные антиоксиданты (ТБГХ, БОТ (ионол), пропилгаллат (ПГ)), жирорастворимые эфиры аскорбиновой кислоты, α - и δ -токоферолы, смесь токоферолов (Mixed tocopherols 95), содержащая изомерные токоферолы: α – 12 %, β – 1 %, δ – 22 %, γ – 63 %, а также роноксан А (композиция, включающая 25 % АП, 5 % α -токоферола, 70 % лецитина) и природные стабилизирующие композиции на основе растительного сырья. Согласно экспериментальным данным, антиоксиданты ТБГХ, ПГ, аскорбилпальмитат (АП), аскорбилстеарат (АС) при концентрациях 0,02–0,04 % и роноксан А при концентрациях 0,15–0,20 % показали достаточно высокую эффективность в ингибировании окислительных изменений льняного масла без добавок и с добавками изученных БАВ. Из синтетических фенольных антиоксидантов наиболее эффективным был ТБГХ. Факторы стабилизации, рассчитанные из величин периодов индукции окисления в условиях ускоренного окисления при температуре 100 °С, для ТБГХ составили 4,8–5,4 при концентрации его в льняном масле 0,02 %. Синтетические фенольные АО широко используются в пищевой промышленности. Несмотря на высокую эффективность и приемлемую стоимость, применение их в последнее время в ряде стран ограничено из-за возможных нежелательных последствий для человека [23, 24]. В то же время жирорастворимые эфиры аскорбиновой кислоты АП и АС в организме человека медленно расщепляются на аскорбиновую и пальмитиновую либо стеариновую кислоты, вследствие чего их можно рассматривать как натуральные АО; допустимые уровни их в пищевых жирах и маслах значительно выше, чем для синтетических фенольных АО. Аскорбиновая кислота и ее эфиры способны регенерировать токоферолы, восстанавливая их радикалы до исходных молекул и тем самым пролонгируя их антиоксидантное действие [20, 25]. АП и АС достаточно эффективно повышают окислительную стабильность льняного масла без добавок и с добавками различных БАВ: при концентрациях этих АО в масле 0,02 и 0,04 % факторы стабилизации составили 2,6–2,8 и 3,5–3,7 соответственно. Стабилизирующая композиция на основе АП, α -токоферола и лецитина (роноксан А) в интервале концентраций 0,15–0,20 % по эффективности близка к АП (0,05 %), в то же время при использовании роноксана обеспечивается не только стабилизация льняного масла, но и обогащение его α -токоферолом и лецитином.

Для стабилизации пищевого льняного масла нами разработаны природные стабилизирующие композиции на основе семян фасоли и сои⁴. Эти композиции были также использованы для стабилизации льняного масла с добавками различных БАВ. Так, на рис. 5 приведены данные по изменению концентрации гидропероксидов и вторичных продуктов окисления от времени хранения льняного масла без добавок, с добавками коэнзима Q_{10} и стабилизирующих композиций на основе семян фасоли (СТФ), сои (СТС), а также АП, композиции АП и STF. На рис. 5 видно, что даже в условиях ускоренного окисления (свободный доступ кислорода воздуха) при комнатной температуре АП и его композиции с растительными стабилизаторами эффективно тормозят окислительные процессы в льняном масле, обогащенном коэнзимом Q_{10} . Эфиры аскорбиновой кислоты и их композиции со стабилизаторами на основе семян бобовых позволяют эффективно ингибировать также и процессы окисления и окислительной деструкции льняного масла, обогащенного добавками каротиноидов, селенометионина и других изученных БАВ. При использовании указанных стабилизаторов существенно снижаются потери как эндогенных БАВ льняного масла, таких как токоферолы, каротиноиды, коэнзимы Q, так и добавок БАВ, используемых для обогащения масла. Так, согласно полученным данным, при хранении льняного масла без добавок в условиях свободного доступа кислорода воздуха содержание нативных токоферолов за 6 мес

⁴ Способ стабилизации льняного масла : пат. 10449 Респ. Беларусь / О.И. Шадыро, А.А. Сосновская, И.П. Едимечева, Н.Н. Дудин, К.А. Юрашевич, И.Я. Казакевич. – Оpubл. 30.04.2008; Способ стабилизации льняного масла : пат. 12609 Респ. Беларусь / О.И. Шадыро, А.А. Сосновская, И.П. Едимечева, Н.Н. Дудин, К.А. Юрашевич, В.А. Казак, А.Б. Губаревич. – Оpubл. 30.12.2009.

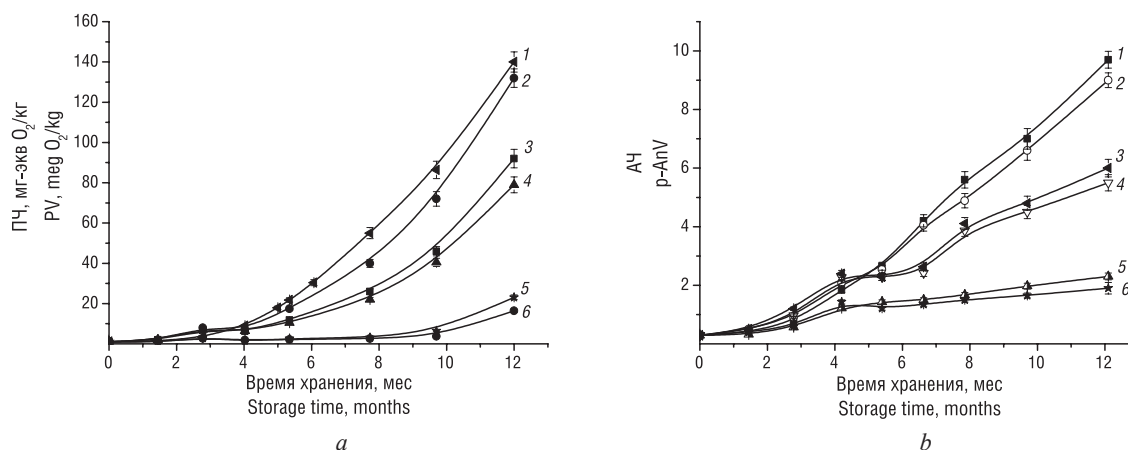


Рис. 5. Накопление гидропероксидов (а) и вторичных продуктов окисления (б) при хранении льняного масла с добавками коэнзима Q_{10} и стабилизаторов при комнатной температуре и свободном доступе воздуха: 1 – без добавок; 2 – CoQ_{10} , 100 мг%; 3 – CoQ_{10} , 100 мг% + СТФ, 1,2 %; 4 – CoQ_{10} , 100 мг% + СТС, 1,2 %; 5 – CoQ_{10} , 100 мг% + АП, 0,02 %; 6 – CoQ_{10} , 100 мг% + СТФ, 1,2 % + АП, 0,02 %

Fig. 5. Accumulation of hydroperoxides (a) and secondary oxidation products (b) during linseed oil storage with coenzyme Q_{10} additives and stabilizers at room temperature and free air access: 1 – no additives; 2 – CoQ_{10} , 100 mg%; 3 – CoQ_{10} , 100 mg% + STF, 1.2 %; 4 – CoQ_{10} , 100 mg% + STS, 1.2 %; 5 – CoQ_{10} , 100 mg% + AP, 0.02 %; 6 – CoQ_{10} , 100 mg% + STF, 1.2 % + AP, 0.02 %

хранения снижается на 18,5 %, за 12 мес – на 52,7 %. Добавка АП в количестве 0,04 % снижает потери токоферолов при хранении масла в течение 12 мес до 8,9 %. При использовании для обогащения льняного масла α -токоферола (0,05 %) суммарная концентрация токоферолов составила 108,4 мг/100 г; потери токоферолов при хранении в течение 12 мес обогащенного льняного масла были 54,5 %, в присутствии добавки 0,04 % АП они снизились до 10,31 %, причем потери α -токоферола были несколько выше потерь γ -токоферола. Потери β -каротина в обогащенном льняном масле (исходная концентрация β -каротина 15,8 мг/100 г) при хранении в течение 12 мес снизились с 55,8 % для нестабилизированного масла до 6,8 % – для стабилизированного ДТБГХ и 7,5 % – стабилизированного АП, до 5,1 % – стабилизированного композицией АП с растительным стабилизатором СТФ. При хранении в течение 12 мес в условиях свободного доступа кислорода воздуха льняного масла, обогащенного коэнзимом Q_{10} (105,6 мг/100 г), содержание коэнзима Q_{10} снижается на 40,5 %, добавка АП (0,04 %) позволяет снизить потери коэнзима Q_{10} за это же время до 6,5 %.

Таким образом, жирорастворимые производные аскорбиновой кислоты и их композиции с природными антиоксидантами и их синергистами позволяют существенно тормозить процессы окисления и окислительной деструкции ПНЖК, сократить потери витаминов, коэнзимов и других БАВ при хранении, а значит увеличить сроки хранения, повысить эффективность БАДов на основе льняного масла. Найдены оптимальные условия стабилизационной обработки для каждой композиции БАВ в льняном масле.

На основании проведенных исследований разработаны рецептуры и технологии получения ряда устойчивых к окислению БАДов на основе льняного масла: «Коэнзим Q_{10} – масло льняное плюс»; «Бета-каротин – масло льняное плюс»; «Селен – витамин Е – масло льняное плюс»; «Лютеин – масло льняное плюс»; «Витамины D_3 и Е – масло льняное плюс». Срок годности БАД с коэнзимом Q_{10} составляет 9 мес, остальных БАДов – 12 мес. На предприятии ООО «Клуб «Фарм-Эко» в 2014–2015 гг. организовано их производство. БАДы рекомендованы для применения взрослым и детям старше 12 лет в целях обогащения организма незаменимыми жирными кислотами, в том числе ПНЖК омега-3, и БАВ (коэнзим Q_{10} , бета-каротин, лютеин, витамин Е, витамин D_3 , органический селен), а также в качестве средств, способствующих поддержанию нормального обмена веществ, функций иммунной, сердечно-сосудистой и костно-мышечной систем, желудочно-кишечного тракта, повышению энергетического и жизненного тонуса организма человека, замедлению процессов старения, профилактике отдаленных последствий радиации, улучшению остроты зрения, состояния кожи и волос.

Употребление БАДов в рекомендуемой дозировке (10 мл, или 2 чайные ложки в сутки) обеспечивает в зависимости от жирнокислотного состава льняного масла 46–59 % от суточной потребности в ПНЖК и 77–100 % от суточной потребности в ПНЖК омега-3. Суточная потребность в БАВ, использованных для обогащения льняного масла, обеспечивается на 31–74 %.

Наличие в БАДах комплекса БАВ, использованных для обогащения льняного масла, и присутствующих в масле нативных природных антиоксидантов масла обуславливает более сильное антиоксидантное действие БАДов и эффективную защиту организма от свободнорадикальных повреждений, в том числе и при лечении последствий радиационного поражения, чем при использовании льняного масла и БАВ в отдельности. При потреблении продуктов на основе обогащенного АО и другими БАВ льняного масла наряду с улучшением абсорбции и повышением биодоступности БАВ льняное масло действует синергично с ними в проявлении целого ряда лечебно-профилактических свойств.

Создание новых отечественных БАДов позволило расширить ассортимент доступных широкому кругу потребителей ценных продуктов на основе льняного масла; повысить качество питания населения Беларуси за счет увеличения в нем доли ПНЖК омега-3 и ряда других ценных БАВ, а значит улучшить результаты лечения и профилактики различных заболеваний.

Заключение. С целью разработки новых устойчивых к окислению БАДов на основе льняного масла изучено влияние добавок ряда витаминов и других БАВ (α -токоферол, α -токоферола ацетат, холекальциферол (витамин D₃), коэнзим Q₁₀, селенометионин, β -каротин, лютеин, зеаксантин,) на склонность льняного масла к окислительным изменениям в зависимости от концентрации и состава композиций добавок. Получены кинетические закономерности накопления в льняном масле первичных и вторичных продуктов окисления, свободных жирных кислот, а также закономерности расходования БАВ при хранении масла без добавок и с добавками БАВ. Показано, что витамины и другие БАВ, используемые для обогащения льняного масла, в зависимости от природы добавки и ее концентрации в масле могут проявлять как антиоксидантные, так и прооксидантные свойства.

Для обеспечения антиокислительной защиты БАДов на основе льняного масла изучено совместное влияние добавок БАВ и ряда синтетических и природных ингибиторов окисления на окислительную устойчивость льняного масла. Установлено, что жирорастворимые производные аскорбиновой кислоты и их композиции с природными антиоксидантами (токоферолами, лецитином, растительными стабилизаторами на основе семян бобовых) являются эффективными и безопасными стабилизаторами обогащенного БАВ льняного масла, позволяющими существенно ингибировать процессы окисления и окислительной деструкции, сократить потери витаминов, коэнзимов и других БАВ при хранении, а значит увеличить сроки хранения, повысить эффективность БАДов на основе льняного масла. Найдены оптимальные условия стабилизационной обработки льняного масла, обогащенного различными композициями БАВ. На основании проведенных исследований разработаны рецептуры и технологии получения ряда устойчивых к окислению БАДов на основе льняного масла.

Список использованных источников

1. Connor, W.E. Importance of n-3 fatty acids in health and disease / W.E. Connor // *Amer. J. of Clinical Nutrition.* – 2000. – Vol. 71, N 1. – P. 171S–175S.
2. Simopoulos, A.P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids / A.P. Simopoulos // *Biomedicine a. Pharmacotherapy.* – 2002. – Vol. 56, N 8. – P. 365–379.
3. Flaxseed in human nutrition / ed.: L.U. Thompson, S.C. Cunnane. – 2th ed. – Champaign : AOCS Press, 2003. – 458 p.
4. α -Linolenic acid and risk of cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis / A. Pan [et al.] // *Amer. J. of Clinical Nutrition.* – 2012. – Vol. 96, N 6. – P. 1262–1273.
5. Halliwell, B. Free radicals in biology and medicine / B. Halliwell, J.M.C. Gutteridge. – Oxford : Oxford Univ. Press, 2007. – 851 p.
6. Schultz, T.W. Trends in structure-toxicity relationships for carbonyl-containing α,β -unsaturated compounds / T.W. Schultz, J.W. Yarbrough // *SAR a. QSAR in Environmental Research.* – 2004. – Vol. 15, N2. – P. 139–146.
7. Wanasundara P.K.J.P.D. Antioxidants: science, technology, and applications / P.K.J.P.D. Wanasundara, F. Shahidi // *Bailey's industrial oil and fat products* / ed. F. Shahidi. – 6th ed. – Hoboken, 2005. – Vol. 1. – P. 431–489.

8. Choe, E. Mechanisms and factors for edible oil oxidation / E. Choe, D. B. Vin // *Comprehensive Rev. in Food Science a. Food Safety*. – 2006. – Vol. 5, N 4. – P. 169–186.
9. Quinn, P. J. Expansion of antioxidant function of vitamin E by coenzyme Q / P. J. Quinn, J. P. Fabisiak, V. E. Kagan // *Biofactors*. – 1999. – Vol. 9, N 2–4. – P. 149–154.
10. Сторожок, Н. М. Исследование совместного антиоксидантного действия β -каротина и витамина А с α -токоферолом / Н. М. Сторожок, И. В. Кутузова // *Хим.-фармацевт. журн.* – 1995. – № 12. – С. 37–41.
11. Role of dietary antioxidants in the prevention of in vivo oxidative DNA damage / M. S. Cooke [et al.] // *Nutrition Research. Rev.* – 2002. – Vol. 15, N 1. – P. 19–41.
12. Витамины – целители : сборник / сост. В. В. Шарпило. – Минск : Paradox, 2003. – 445 с.
13. Brenneisen, P. Selenium, oxidative stress, and health aspects / P. Brenneisen, H. Steinbrenner, H. Sies // *Molecular Aspects of Medicine*. – 2005. – Vol. 26, N 4–5. – P. 256–267.
14. Whitehead, A. J. Macular pigment : a review of current knowledge / A. J. Whitehead, J. A. Mares, R. P. Danis // *Arch. of Ophthalmology*. – 2006. – Vol. 124, N 7. – P. 1038–1045.
15. Ernster, L. Biochemical, physiological and medical aspects of ubiquinone function / L. Ernster, G. Dallner // *Biochimica et Biophysica Acta*. – 1995. – Vol. 1271, N 1. – P. 195–204.
16. Holick, M. F. Vitamin D: importance in the prevention of cancers, type 1 diabetes, heart disease, and osteoporosis / M. F. Holick // *Amer. J. of Clinical Nutrition*. – 2004. – Vol. 79, N 3. – P. 362–371.
17. Lee, J. H. Electron donation mechanisms of β -carotene as a free radical scavenger / J. H. Lee, B. Ozcelik, D. B. Min // *J. of Food Science*. – 2003. – Vol. 68, N 3. – P. 861–865.
18. Burton, G. W. β -carotene: an unusual type of lipid antioxidant / G. W. Burton, K. U. Ingold // *Science*. – 1984. – Vol. 224, N 4649. – P. 569–573.
19. Antioxidant activity of carotenoids: an electron-spin resonance study on β -carotene and lutein interaction with free radicals generated in a chemical system / A. Iannone [et al.] // *J. of Biochem. a. Molecular Toxicology*. – 1998. – Vol. 12, N 5. – P. 299–304.
20. Kamal-Eldin, A. The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols / A. Kamal-Eldin, L. A. Appelqvist // *Lipids*. – 1996. – Vol. 31, N 7. – P. 671–701.
21. Association between tocopherol isoform composition and lipid oxidation in selected multiple edible oils / I. Elisia [et al.] // *Food Research Intern.* – 2013. – Vol. 52, N 2. – P. 508–514.
22. Антирадикальная активность и устойчивость к окислительным изменениям льняного масла, обогащенного антиоксидантами / Д. А. Гусева [и др.] // *Биомед. химия*. – 2008. – Т. 54, № 6. – С. 671–678.
23. Buxiang, S. Effect of co-administration of butylated hydroxyanisole and flavonoids on the activation of mutagens and drug-metabolising enzymes in mice / S. Buxiang, M. Fukuhara // *Toxicology*. – 1997. – Vol. 122, N 1–2. – P. 61–72.
24. Nakatani, N. Phenolic antioxidants from herbs and spices / N. Nakatani // *BioFactors*. – 2000. – Vol. 13, N 1–4. – P. 141–146.
25. Frankel, E. N. Antioxidants in lipid foods and their impact on food quality / E. N. Frankel // *Food Chemistry*. – 1996. – Vol. 57, N 1. – P. 51–55.

References

1. Connor W.E. Importance of n-3 fatty acids in health and disease. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2000, vol. 71, no. 1, pp. 171S–175S.
2. Simopoulos A.P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2002, vol. 56, no. 8, pp. 365–379. doi: 10.1016/s0753-3322(02)00253-6.
3. Thompson L.U., Cunnane S.C. (eds.) *Flaxseed in human nutrition*. 2nd ed. Champaign, AOCS Press, 2003. 458 p.
4. Pan A., Chen M., Chowdhury R., Wu J.H., Sun Q., Campos H., Mozaffarian D., Hu F.B. α -Linolenic acid and risk of cardiovascular disease: a systematic review and meta-analysis. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2012, vol. 96, no. 6, pp. 1262–1273. doi: 10.3945/ajcn.112.044040.
5. Halliwell B., Gutteridge J.M.C. *Free radicals in biology and medicine*. Oxford, Oxford University Press, 2007. 851 p.
6. Schultz T.W., Yarbrough J.W. Trends in structure-toxicity relationships for carbonyl-containing α,β -unsaturated compounds. *SAR and QSAR in Environmental Research*, 2004, vol. 15, no. 2, pp. 139–146. doi: 10.1080/10629360410001665839.
7. Wanasundara P.K.J.P.D., Shahidi F. Antioxidants: science, technology, and applications. *Bailey's industrial oil and fat products*. 6th ed. Hoboken, 2005, vol. 1, pp. 431–489. doi: 10.1002/047167849x.bio002.
8. Choe E., Vin D.B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2006, vol. 5, no. 4, pp. 169–186. doi:10.1111/j.1541-4337.2006.00009.x.
9. Quinn P.J., Fabisiak J.P., Kagan V.E. Expansion of antioxidant function of vitamin E by coenzyme Q. *Biofactors*, 1999, vol. 9, no. 2–4, pp. 149–154. doi: 10.1002/biof.5520090209.
10. Storozhok N.M., Kutuzova I.V. *Issledovanie sovmestnogo antioksidantnogo deystviya β -karotina i vitamina A s α -tokoferolom* [Study of the combined antioxidant effect of β -carotene and vitamin A with α -tocopherol]. *Khimiko-farmatsevticheskiy zhurnal* [Chemical-Pharmaceutical Journal], 1995, no. 12, pp. 37–41. (In Russian).
11. Cooke M.S., Evans M.D., Mistry N., Lunec J. Role of dietary antioxidants in the prevention of in vivo oxidative DNA damage. *Nutrition Research Reviews*, 2002, vol. 15, no. 1, pp. 19–41. doi: 10.1079/nrr.200132.
12. *Vitaminy – tseliteli* [Vitamins – healers]. Minsk, Paradox Publ., 2003. 445 p. (In Russian).
13. Brenneisen P., Steinbrenner H., Sies H. Selenium, oxidative stress, and health aspects. *Molecular Aspects of Medicine*, 2005, vol. 26, no. 4–5, pp. 256–267. doi: 10.1016/j.mam.2005.07.004.

14. Whitehead A.J., Mares J.A., Danis R.P. Macular pigment: a review of current knowledge. *Archives of Ophthalmology*, 2006, vol. 124, no. 7, pp. 1038–1045. doi: 10.1001/archophth.124.7.1038.
15. Ernster L., Dallner G. Biochemical, physiological and medical aspects of ubiquinone function. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1995, vol. 1271, no. 1, pp. 195–204. doi: 10.1016/0925-4439(95)00028-3.
16. Holick M.F. Vitamin D: importance in the prevention of cancers, type 1 diabetes, heart disease, and osteoporosis. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2004, vol. 79, no. 3, pp. 362–371.
17. Lee J.H., Ozcelik B., Min D.B. Electron donation mechanisms of β -carotene as a free radical scavenger. *Journal of Food Science*, 2003, vol. 68, no. 3, pp. 861–865. doi: 10.1111/j.1365-2621.2003.tb08256.x.
18. Burton G.W., Ingold K.U. β -carotene: an unusual type of lipid antioxidant. *Science*, 1984, vol. 224, no. 4649, pp. 569–573. doi: 10.1126/science.6710156.
19. Iannone A., Rota C., Bergamini S., Tomasi A., Canfield L.M. Antioxidant activity of carotenoids: an electron-spin resonance study on β -carotene and lutein interaction with free radicals generated in a chemical system. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 1998, vol. 12, no. 5, pp. 299–304. doi: 10.1002/(sici)1099-0461(1998)12:5<299::aid-jbt6>3.0.co;2-g.
20. Kamal-Eldin A., Appelqvist L.A. The chemistry and antioxidant properties of tocopherols and tocotrienols. *Lipids*, 1996, vol. 31, no. 7, pp. 671–701. doi: 10.1007/bf02522884.
21. Elisia I., Young J.W., Yuan Y.V., Kitts D.D. Association between tocopherol isoform composition and lipid oxidation in selected multiple edible oils. *Food Research International*, 2013, vol. 52, no. 2, pp. 508–514. doi: 10.1016/j.foodres.2013.02.013.
22. Guseva D.A., Prozorovskaya N.N., Rusina I.F., Ipatova O.M. Antiradikal'naya aktivnost' i ustoychivost' k oksidativnym izmeneniyam l'nyanogo masla, obogashchennogo antioksidantami [Antiradical activity and resistance of flaxseed oil, enriched with the antioxidants to oxidative changes]. *Biomeditsinskaya khimiya* [Biomedical Chemistry], 2008, vol. 54, no. 6, pp. 671–678. (In Russian).
23. Buxiang S., Fukuhara M. Effect of co-administration of butylated hydroxyanisole and flavonoids on the activation of mutagens and drug-metabolising enzymes in mice. *Toxicology*, 1997, vol. 122, no. 1–2, pp. 61–72. doi: 10.1016/s0300-483x(97)00078-4.
24. Nakatani N. Phenolic antioxidants from herbs and spices. *BioFactors*, 2000, vol. 13, no. 1–4, pp. 141–146. doi: 10.1002/biof.5520130123.
25. Frankel E.N. Antioxidants in lipid foods and their impact on food quality. *Food Chemistry*, 1996, vol. 57, no. 1, pp. 51–55. doi: 10.1016/0308-8146(96)00067-2.

Информация об авторах

Шадыро Олег Иосифович – доктор хим. наук, профессор, заведующий лабораторией химии свободно-радикальных процессов, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shadyro@open.by

Сосновская Анна Алексеевна – кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии свободно-радикальных процессов, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: anna-sosn@mail.ru

Едимечева Ирина Петровна – кандидат хим. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии свободно-радикальных процессов, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: edimecheva@mail.ru

Для цитирования

Шадыро, О.И. Разработка устойчивых к окислению биологически активных добавок к пище на основе льняного масла / О.И. Шадыро, А.А. Сосновская, И.П. Едимечева // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2017. – №3. – С. 109–120.

Information about authors

Shadyro Oleg I. – D.Sc. (Chemistry), Professor, Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University (14 Leningradskaja Str., Minsk, 220108 Republic of Belarus). E-mail: shadyro@open.by

Sosnovskaya Anna A. – Ph.D. (Chemistry), Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University (14 Leningradskaja Str., Minsk, 220108 Republic of Belarus). E-mail: anna-sosn@mail.ru

Edimecheva Irina P. – Ph.D. (Chemistry), Research Institute for Physical Chemical Problems, Belarusian State University (14 Leningradskaja Str., Minsk, 220108 Republic of Belarus). E-mail: edimecheva@mail.ru

For citation

Shadyro O. I., Sosnovskaya A. A., Edimecheva I. P. Development of oxidation-resistant biologically active food supplements based on flaxseed oil. *Vestsi Natsyyanal'ny akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series], 2017, no 3, pp.109–120.