ISSN 0868-854 (Print)
ISSN 2413-5984 (Online). Algologia. 2019, 29(4): 391–403
https://doi.org/10.15407/alg29.04.391

РЯБУШКО В.И.[1], КАМНЕВ А.Н.[2,3], ГУРЕЕВА Е.В.[1], ПРАЗУКИН А.В.[1], НЕХОРОШЕВ М.В.[1]

[1]Федеральный исследовательский центр РАН,
Ленинский просп, 38, корп. 3, Москва 119991, Россия
rabushko2006@yandex.ru
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский просп., 36, Москва 117997, Россия
[3]Московский государственный областной университет,
ул. Радио, 10А, Москва 105005, Россия
dr.kamnev@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ ЛИПИДОВ, ЖИРНЫХ КИСЛОТ И ФУКОКСАНТИНА В РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ВЕТВЯХ *CYSTOSEIRA BARBATA* (STACKHOUSE) C.AGARDH (*PHAEOPHYTA*)

Приведены данные о концентрации суммарных липидов, жирных кислот и фукоксантина в ветвях бурой водоросли *Cystoseira barbata* разного возраста, собранной на крымском побережье Чёрного моря. Содержание жирных кислот определяли методом газовой хроматографии, фукоксантина – методом тонкослойной хроматографии. В летний период в ветвях водоросли отмечены достаточно низкие концентрации липидов и фукоксантина. Максимальная концентрация липидов (7,8 ± 0,3 мг·г$^{-1}_{сух}$) и фукоксантина (0,59 ± 0,04 мг·г$^{-1}_{сух}$) обнаружена в ветвях 3–5-месячного возраста. Отмечено также высокое содержание жирных кислот: миристиновая C14:0, пальмитиновая C16:0, стеариновая C18:0, олеиновая C18:1 (n-9), линолевая C18:2 (n-6), стеаридоновая C18:4 (n-3), арахидоновая C20:4 (n-6) и эйкозапентаеновая C20:5(n-3). В ветвях *C. barbata* во фракции липидов обнаружено максимальное содержание пальмитиновой кислоты (C16:0) – 21,6%. В небольших количествах присутствовала миристиновая кислота (C14:0), в следовых – пентадекановая (C15:0) и гептадекановая (C17:0) кислоты. При этом концентрация C14:0, C15:0 и C17:0 в талломе *C. barbata* была в 2-3 раза выше, чем в других видах бурых водорослей. Общее содержание насыщенных жирных кислот составляло 31%, полиненасыщенных жирных кислот – 36–42%. Концентрация арахидоновой кислоты варьировала в пределах 7–14% в зависимости от возраста ветвей, а её максимальное количество обнаружено в ветвях старше 3 мес. Среднее содержание эйкозапентаеновой кислоты составляло 7%, максимальное – 9% в ветвях 5–6-месячного возраста. Докозагексаеновая кислота найдена в небольших количествах (0,37 ± 0,2%). Анализ общего количества ПНЖК и НЖК, n-3 и n-6 кислот показал

© Рябушко В.И., Камнев А.Н., Гуреева Е.В., Празукин А.В., Нехорошев М.В., 2019

максимальное содержание всех групп кислот в ветвях старше 5 мес. Доля наиболее ценных n-3 жирных кислот составляет в среднем 15,3% общего количества метиловых эфиров жирных кислот. Ветви *C. barbata* старше 3 мес имеют оптимальное для здоровья человека соотношение n-3/n-6 ПНЖК, равное 1,0. У водоросли высокие концентрации C14:0, C16:0, C18:4 (n-3), C20:4 (n-3), C18:2 (n-6) и C20:4 (n-3) коррелируют с максимальным содержанием фукоксантина. Полученные данные позволяют оптимизировать процесс сбора сырья с целью максимального выхода целевых биологически активных веществ.

Ключевые слова: *Cystoseira barbata*, жирные кислоты, липиды, фукоксантин, Чёрное море

Введение

Бурые водоросли, в частности представители семейства *Cystoseiraceae*, являются ценным сырьём для получения многих биологически активных веществ (БАВ), используемых в различных областях хозяйства. Наряду с углеводами, витаминами, фитогормонами, макро- и микроэлементами, которые давно используются человеком (Камнев, 1989; Возжинская, Камнев, 1994; Облучинская, 2005), не менее важными химическими компонентами таллома водорослей являются липиды, жирные кислоты (ЖК) и каротиноиды. В последнее время их изучению уделяется особое внимание (Airanthi et al., 2011; Fariman et al., 2015; Susanto et al., 2016). Несмотря на то, что содержание липидов в бурых водорослях незначительное (менее 4 г·100 $г^{-1}_{сух}$), липидная фракция включает в себя такие важные БАВ, как n-3 полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) и фукоксантин (Фк), которые положительно влияют на здоровье людей и животных (Dembitsky, Maoka, 2007; Tsukui et al., 2007; Woo et al., 2010; Airanthi et al., 2011; Calder, 2012). Содержание важных ПНЖК (таких как линолевая, гамма-линолевая, арахидоновая, эйкозапентаеновая и докозагексаеновая) в водорослях позволяет включать их в состав биомедицинских препаратов (Kumari et al., 2010). Например, арахидоновая кислота (АК) способствует снижению коронарного риска и, являясь бедным субстратом для β-окисления, очень важна для работы нервной системы, особенно мозговых и когнитивных функций (Tallima, El Ridi, 2017). Присутствие фукоксантина, основного пигмента бурых водорослей, способствует увеличению окисления жирных кислот и снижению содержания липидов в печени, регулируя активность метаболических ферментов и стимулируя активность β-окисления (Woo et al., 2010).

На сегодняшний день главным источником ПНЖК является морская рыба. К сожалению, её запасы резко сокращаются (Worm et al., 2009), поэтому необходимо искать новые источники ПНЖК. Такими могут стать морские водоросли, в которых содержание липидов колеблется от 36 до 82 мг·$г^{-1}$ (Terasaki et al., 2009; Susanto et al., 2016). Имеется достаточно сведений о содержании Фк и липидов, в частности

ЖК, в бурых водорослях, в т.ч. *Cystoseiraceae*, обитающих в разных морях (Stefanov et al., 1988; Dembitsky et al., 1990; Khotimchenko et al., 2002; Terasaki et al., 2009; Ivanova et al., 2013; Patarra et al., 2013; Silva et al., 2013; Ryabushko et al., 2014; Vizetto-Duarte et al., 2015; Susanto et al., 2016; Ryabushko et al., 2017). Однако данные о концентрации этих соединений в разновозрастных ветвях бурой водоросли *Cystoseira barbata* отсутствуют. Не установлена также зависимость содержания ЖК и Фк от разных факторов у представителей бурых водорослей.

Поэтому наша работа посвящена изучению содержания липидов, фукоксантина и состава жирных кислот в разновозрастных ветвях бурой водоросли *C. barbata*, обитающей в Чёрном море.

Материалы и методы

Материалом для исследований послужили пробы макрофитов (38 образцов), собранные на каменистых субстратах крымского побережья Чёрного моря в июне 2018 г. Свежие образцы талломов *C. barbata* разделяли на ствол и ветви. Возраст ветвей определяли по феноменологическим признакам состояния ветвей I порядка по известной методике (Празукин, 1983). Было выделено четыре возрастные группы ветвей: I – < 1,9 мес; II – 2 ≤ 3 мес; III – 3 ≤ 5 мес; IV – 5 ≤ 6 мес. Концентрацию Фк устанавливали методом препаративной тонкослойной хроматографии в экстрактах, полученных путем ступенчатого экстрагирования свежесобранных водорослей (1–2 ч после сбора) 96%-ным этиловым спиртом по разработанной ранее методике (Ryabushko et al., 2014; Нехорошев и др., 2018). Для определения метиловых эфиров жирных кислот выделяли липидную фракцию из *C. barbata* с помощью смеси Фолча (Кейтс, 1975). Содержание общих липидов устанавливали по цветной реакции с сульфофосфованилиновым реактивом. Для определения жирных кислот сначала проводили метилирование стандартов (пальмитиновой и стеариновой кислот, Merck, Германия) и липидной фракции исследуемых проб по методике Кейтс (1975). Содержание метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) определяли на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с масс-спектрометрическим детектором и капиллярной колонкой Agilent (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм) в режиме программирования температуры: 1 мин при 60 °С, затем повышали до 180 °С со скоростью 20 °С в мин, до 290 °С со скоростью 5 °С в мин, выдерживали 10 мин при 290 °С; температура испарителя 280 °С, введение 1 мкл пробы без деления потока, скорость потока газа-носителя гелия 1 мл·мин$^{-1}$, диапазон сканирования масс: 50–450 m/e, энергия ионизации 70 эВ, температура ионного источника 230 °С, температура интерфейса 280 °С. Качественный анализ МЭЖК осуществляли по хроматограммам и полному ионному току, сравненивая полученные масс-спектры с библиотекой спектров NIST 17. Для идентификации метиловых эфиров жирных кислот применяли стандарт Supelco 37; для статистической обработки данных использовали программный пакет Statistica 6.0.

Концентрации фукоксантина, липидов и метиловых эфиров жирных кислот представлены как средние значения ± среднеквадратичное отклонение при $p \leq 0{,}05$.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 1, содержание липидов и Фк в образцах *C. barbata* представлено в малом количестве. Очевидно, это связано с тем, что водоросли собирали в летнее время, когда содержание липидов значительно уменьшается. Такую же закономерность наблюдали и другие исследователи (Gerasimenko et al., 2010; Fariman et al., 2015). Максимальная концентрация липидов (7,8 ± 0,3 мг·г$^{-1}_{сух.}$) и Фк (0,59 ± 0,04 мг·г$^{-1}_{сух}$) отмечена в ветвях III возрастной группы (см. рис. 1).

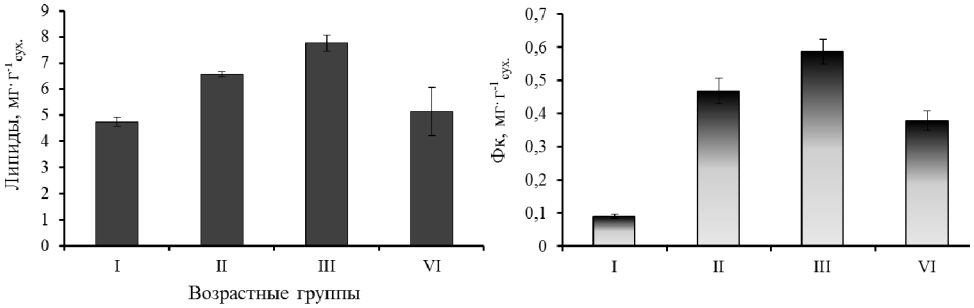

Рис. 1. Концентрация липидов и фукоксантина в ветвях *Cystoseira barbata*. Возрастные группы ветвей: I – < 1,9; II – 2 ≤ 3; III – 3 ≤ 5; IV – 5 ≤ 6 мес

При более детальном анализе липидного состава установлено, что для ветвей *C. barbata* характерны высокие концентрации ПНЖК: миристиновая C14:0, пальмитиновая C16:0, стеариновая C18:0, олеиновая C18:1 (n-9), линолевая C18:2 (n-6), стеаридоновая C18:4 (n-3), арахидоновая C20:4 (n-6), эйкозапентаеновая C20:5 (n-3) (табл. 1), что совпадает с данными литературы о составе ПНЖК в других бурых водорослях (Fariman et al., 2015; Susanto et al., 2016). В ветвях *C. barbata* отмечено максимальное содержание во фракции липидов пальмитиновой кислоты (C16:0) – 21,6% (см. табл. 1 и рис. 2), что характерно для многих бурых водорослей. В небольших количествах присутствует миристиновая кислота (C14:0) и в следовых – пентадекановая (C15:0) и гептадекановая (C17:0) кислоты. Несмотря на это, концентрация C14:0, C15:0 и C17:0 в талломе *C. barbata* в 2–3 раза выше, чем в других бурых водорослях (Susanto, 2016). В целом, полученные нами данные о составе ЖК в ветвях *C. barbata* согласуются с таковыми для некоторых видов цистозир: *C. nodicaulis* (Withering) M.Roberts, *C. usneoides* (Linnaeus) M.Roberts, *C. hakodatensis* (Yendo) Fensholt, *C. indica* (Thivy & Doshi) Mairh, *C. compressa* (Esper) Gerloff & Nizamuddin, *C. humilis* Schousboe ex Kützing, *C. osmundacea* (Turner)

C.Agardh, *C. crinita* Duby, *C. abies-marina* (S.G.Gmelin) C.Agardh из других локалитетов (Khotimchenko et al., 2002; Ivanova et al., 2013; Patarra et al., 2013; Silva et al., 2013; Vizetto-Duarte et al., 2015).

Таблица 1

Среднее относительное содержание жирных кислот липидной фракции в ветвях возрастных групп *Cystoseira barbata*

Жирные кислоты	% общей биомассы МЭЖК	Жирные кислоты	% общей биомассы МЭЖК
C20:2 (n-6)	0,20 ± 0,07	C14:0	5,46 ± 1,80
C20:3 (n-6)	0,92 ± 0,10	C15:0	0,87 ± 0,17
C20:4 (n-3)	0,68 ± 0,09	C16:0	21,61 ± 2,00
C20:4 (n-6)	10,63 ± 1,20	C16:1 (n-7)*	2,59
C20:5 (n-3)	7,11 ± 1,40	C16:4 (n-3)	0,28 ± 0,07
C22:6 (n-3)	0,37 ± 0,20	C17:0	0,57 ± 0,10
C24:0*	0,45	C18:0	2,35 ± 0,70
∑ПНЖК	31,40 ± 1,50	C18:1 (n-9)*	12,40
∑НЖК	31,25 ± 1,50	C18:2 (n-6)	3,97 ± 0,90
∑МНЖК	15	C18:3 (n-6)*	0,31
n-3/n-6	1,0	C18:4 (n-3)	6,90 ± 1,70
∑n9-ЖК	12,40	C20:0	0,26 ± 0,07

* Кислота обнаружена только в I группе ветвей.

Важным показателем липидного состава водорослей является содержание ПНЖК. По нашим данным, их содержание в талломе *C. barbata* составляет 32%, что также согласуется с литературными данными (Vizetto-Duarte et al., 2015). Например, концентрация ПНЖК в талломе *C. barbata* составляет 29%, в талломе *C. compressa* – 46%. Отмечена повышенная концентрация ПНЖК в талломе *C. barbata*, собранной в акватории крымского побережья Чёрного моря в районе Севастополя (31,4% общей биомассы МЭЖК), по сравнению с таковой из болгарского сектора Чёрного моря (16,3%) (м. Галата, Варна) (Panayotova et al., 2017).

Содержание ПНЖК в ламинариевых бурых водорослях варьирует от 39,9% общего количества МЭЖК в *Laminaria* sp. до 73,7% в *Undaria. pinnatifida* (Harvey) Suringar (Dawczynski et al., 2007). Содержание этих кислот в *C. barbata* такое же, как и в других бурых водорослях со сравнительно высоким показателем арахидоновой кислоты (10,7% общих ЖК). Среди ПНЖК предоминантными являются линолевая, стеаридоновая, арахидоновая и эйкозапентаеновая кислоты.

Наиболее распространенной во всех видах водорослей *Cystoseira* является арахидоновая кислота (АК) (C20:4 (n-6), содержание которой у

разных цистозир варьирует от 12 до 27% (Stefanov et al., 1988; Kim et al., 1996; Ratana-Arporn, Chirapart, 2006; Silva et al., 2013; Fariman et al., 2015; Vizetto-Duarte et al., 2015; Susanto et al., 2016). В талломах *Laminaria* sp. и *U. pinnatifida* концентрация АК составляет 11,3–14,3%, в *Hizika fusiforme* – 5% (Dawczynski et al., 2007). АК является важной составляющей биомембран, предшественником простагландинов и многих других эйкозаноидов. Мы установили, что в зависимости от возрастной группы ветви содержание АК изменяется от 7 до 14%, что также согласуется с данными других исследователей (рис. 2).

У большинства видов цистозир в относительно высоких концентрациях (5–10%) обнаружена эйкозапентаеновая кислота (ЭПК) (n-3 ПНЖК) (Vizetto-Duarte et al., 2015). Она конкурирует с линолевой кислотой за преобразование в АК, регулируя соотношение n-3/n-6 ПНЖК (Calder, 2012). Средняя концентрация ЭПК в разновозрастных ветвях *C. barbata* составляла 7%, максимальная 9% в ветвях IV возрастной группы (см. табл. 1, рис. 2).

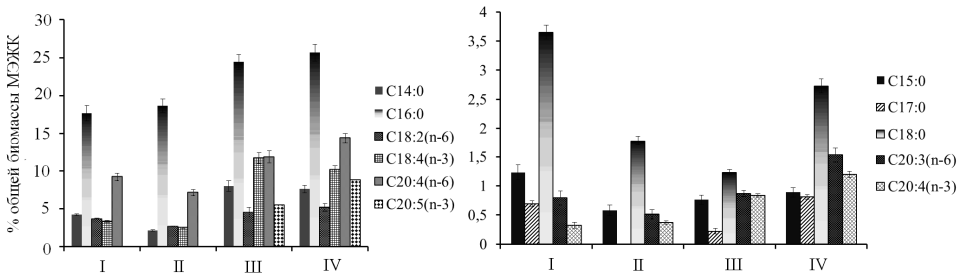

Рис. 2. Содержание МЭЖК в ветвях *Cystoseira barbata*. Возрастные группы ветвей: I – < 1,9; II – 2 ≤ 3; III – 3 ≤ 5; IV – 5 ≤ 6 мес

В ветвях *C. barbata* также обнаружена докозагексаеновая кислота C22:6 (n-3) (0,4 %), которая ранее идентифицирована в талломах *C. nodicaulis*, *C. tamariscifolia* и *C. usneoides* (Patarra et al., 2013; Silva et al., 2013), хотя при исследовании липидного состава цистозировых водорослей другими авторами она не была обнаружена (Dawczynski et al., 2007; Vizetto-Duarte et al., 2015; Susanto et al., 2016).

Следующим важным показателем липидного состава является сумма насыщенных жирных кислот (НЖК). Известно, что в талломах бурых водорослей этот показатель варьирует от 18 до 41% общих МЭЖК (Terasaki et al., 2009; Susanto et al., 2016). По нашим данным, суммарное содержание НЖК в *C. barbata* достигает 31% (см. табл. 1).

При определении концентраций МЭЖК в ветвях разных возрастных групп *C. barbata* выявлена следующая тенденция: содержание большинства кислот, в т.ч. доминантных: C14:0 (миристиновая), C16:0 (пальмитиновая), C16:4 (n-3), C18:2 (n-6) (линолевая), C18:4 (n-3) (стеаридоновая), C20:2 (n-6), C20:3 (n-6) (дигомо-гамма-линоленовая), C20:4 (n-3), C20:4 (n-6) (арахидоновая) и C20:5 (n-3) (тимнодоновая),

максимально в III и IV возрастных группах ветвей (см. рис. 2). При этом C20:0 (арахиновая) и C24:0 (лигноцериновая) в наибольшем количестве накапливаются в ветвях II группы.

В отдельную группу следует выделить МЭЖК с максимальной концентрацией в I и IV возрастных группах ветвей: C15:0 (пентадекановая), C17:0 (маргариновая), C18:0 (стеариновая), C22:6 (n-3) (цервоновая). Среди этих кислот превалируют насыщенные ЖК. Все ПНЖК, за исключением цервоновой кислоты, в максимальных количествах накапливаются в ветвях старше 3 мес.

По нашим данным, все n-3 ПНЖК накапливаются в ветвях III, IV возрастных групп и достигают максимума в IV группе. Концентрация C18:4 (n-3) и C20:5 (n-3) в ветвях цистозиры также коррелирует с содержанием Фк (см. рис. 1, 2), однако во II группе ветвей, где обнаружена такая же высокая концентрация Фк, как и в IV, эти МЭЖК не были отмечены. Во II группе ветвей при высокой концентрации липидов и Фк содержание практически всех МЭЖК, за исключением насыщенных арахиновой (C20:0) и лигноцериновой (C24:0) кислот, минимальное (табл. 2).

Сравнительный анализ общего количества ПНЖК и НЖК, n-3 и n-6 кислот показал, что максимальное содержание всех кислот обнаружено в IV, наиболее старой группе ветвей, а высокое соотношение n-3/n-6 кислот (1,05) характерно для III возрастной группы ветвей. Аналогично содержанию Фк и липидов, в III группе отмечена высокая концентрация большинства МЭЖК.

Таблица 2

Содержание МЭЖК в ветвях *Cystoseira barbata* разного возраста (I–IV группы)

Группа МЭЖК	% общей биомассы МЭЖК			
	I	II	III	IV
ПНЖК	18,39	13,20	35,64	42,35
НЖК	28,06	24,03	34,89	38,00
n-3	4,25	2,84	18,27	20,84
n-6	14,06	10,36	17,35	21,51
n-3/n-6	0,3	0,27	1,05	0,97

Заключение

При изучении липидного состава ветвей бурой водоросли *Cystoseira barbata* установлено, что максимальные концентрации липидов и фукоксантина в ее талломе содержатся в ветвях 3–5-месячного возраста. Ветви данной возрастной группы и старше являются основной морфофункциональной составляющей таллома. В данный период ветвь становится полностью сформированной, развитие фотосинтетического

корового слоя достигает максимального уровня, а удельная поверхность – максимальных значений.

В ветвях водоросли наблюдаются высокие концентрации жирных кислот C14:0, C16:0, C18:0, C18:1 (n-9), C18:2 (n-6), C18:4 (n-3), C20:4 (n-6), C20:5 (n-3), что характерно для других водорослей *Cystoseira*. Содержание важнейшей составляющей биологических мембран – арахидоновой кислоты варьирует в пределах 7–14%, а ее максимальная концентрация отмечена в ветвях старше 3 мес. Концентрация эйкозапентаеновой кислоты, которая конкурирует с линолевой за преобразование в арахидоновую кислоту, составляет в среднем 7%, а максимальная концентрация – 9% обнаружена в ветвях 5–6 мес. Общее содержание НЖК в талломе составляет 31%. В ветвях в небольших количествах найдена докозагексаеновая кислота C22:6 (n-3). Содержание ПНЖК составляет 36–42%. Максимальная концентрация этих кислот, за исключением червоновой, обнаружена в ветвях старше 3 мес. Из анализа общего количества ПНЖК и НЖК, n-3 и n-6 кислот видно, что максимальное содержание всех групп кислот содержится в ветвях старше 5 мес. При этом доля наиболее ценных n-3 ЖК составляет в среднем 15,3% общего количества метиловых эфиров ЖК. Установлено, что ветви *C. barbata* старше 3 мес имеют оптимальное для здоровья человека соотношение n-3/n-6 ПНЖК, равное 1,0. У водоросли высокие концентрации C14:0, C16:0, C18:4 (n-3), C20:4 (n-3), C18:2 (n-6) и C20:4 (n-3) коррелируют с максимальным содержанием фукоксантина.

При использовании морских водорослей в качестве пищевых ингредиентов важно учитывать распределение ЖК и фукоксантина в талломе макрофита. При сборе водорослей следует использовать лишь определённые части таллома, например ветви, в которых аккумулированы наибольшие концентрации необходимых химических соединений. Эти ветви можно срезать водолазным способом, не нарушая структуры популяции, что в ряде случаев может быть экологически и экономически оправдано.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ № АААА-А18-118021350003-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Возжинская В.Б., Камнев А.Н. 1994. *Эколого-биологические* основы культивирования и использования морских донных водорослей. М.: Наука. 202 с.

Камнев А.Н. 1989. Структура и функции бурых водорослей. М.: Изд-во МГУ. 200 с.

Кейтс М. 1975. *Техника липидологии: Выделение, анализ и идентификация липидов.* Пер. с англ. М.: Мир. 322 с.

Нехорошев М.В., Рябушко В.И., Гуреева Е.В. 2018. *Способ получения профилактического продукта из черноморских водорослей рода Cystoseira (варианты)*. Пат. РФ № 2658705. Опубл. 22.06.2018.

Облучинская Е.Д. 2005. Технологии лекарственных и лечебно-профилактических средств из бурых водорослей. Апатиты: Изд-во КРЦ РАН. 164 с.

Празукин А.В. 1983. Феноменологическое описание роста ветвей *Cystoseira barbata* как основа периодизации их онтогенеза. *Экол. моря*. 15: 49–58.

Airanthi M.K., Sasaki N., Iwasaki S., Baba N., Abe M., Hosokawa M., Miyashita K. 2011. Effect of brown seaweed lipids on fatty acid composition and lipid hydroperoxide levels of mouse liver. *J. Agric. and Food Chem*. 59(8): 4156–4163.

Calder P.C. 2012. Mechanisms of action of (n-3) fatty acids. *J. Nutr.* 142: 592S–599S.

Dawczynski C., Schubert R., Jahreis G. 2007. Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products. *Food Chem*. 103(3): 891–899.

Dembitsky V.M., Maoka T. 2007. Allenic and cumulenic lipids. *Prog. Lipid Res.* 46: 328–375.

Dembitsky V.M., Rozentsvet O.A., Pechenkina E.E. 1990. Glycolipids, phospholipids and fatty acids of brown algal species. *Phytochemistry*. 29: 3417–3423.

Fariman G.A., Shastan S.J., Zahedi M.M. 2015. Seasonal variation of total lipid, fatty acids, fucoxanthin content, and antioxidant properties of two tropical brown algae (*Nizamuddinia zanardinii* and *Cystoseira indica*) from Iran. *J. Appl. Phycol.* 28(2): 1323–1331.

Gerasimenko N.I., Busarova N.G., Moiseenko O.P. 2010. Seasonal changes in the content of lipids, fatty acids, and pigments in brown alga *Costaria costata*. *Rus. J. Plant Physiol.* 57(2): 205–211.

Ivanova V., Stancheva M., Petrova D. 2013. Fatty acid composition of Black Sea *Ulva Keitsrigida* and *Cystoseira crinite*. *Bulg. J. Agric. Sci.* 19(S1): 42–47.

Khotimchenko S.V., Vaskovsky V.E., Titlyanova T.V. 2002. Fatty acids of marine algae from the Pacific coast of North California. *Bot. Mar.* 45: 17–22.

Kim M.K., Dubacq J.P., Thomas J.C., Giraud G. 1996. Seasonal variations of triacylglycerols and fatty acids in *Fucus serratus*. *Phytochemistry*. 43: 49–55.

Kumari P., Kumar M., Gupta V., Reddy C.R.K., Jha B. 2010. Tropical marine macroalgae as potential sources of nutritionally important PUFAs. *Food Chem*. 120(3): 749–757.

Panayotova V., Merzdhanova A., Dobreva D.A., Zlatanov M., Makedonski L. 2017. Lipids of Black Sea algae: unveiling their potential for pharmaceutical and cosmetic applications. *J. IMAB*. 23(4): 1747–1751.

Ratana-Arporn P., Chirapart A. 2006. Nutritional evaluation of tropical green seaweeds *Caulerpa lentillifera* and *Ulva reticulate*. *Kaset. J.: Nat. Sci.* 40: 75–83.

Patarra R.F., Leite J., Pereira R., Baptista J., Neto A.I. 2013. Fatty acid composition of selected macrophytes. *Nat. Prod. Res.* 27: 665–669.

Ryabushko V.I., Prazukin A.V., Gureeva E.V., Bobko N.I., Kovrigina N.G., Nekhoroshev M.V. 2017. Fucoxanthin and heavy metals in brown algae of genus *Cystoseira* C.Agardh from water areas with different anthropogenic influences (Black Sea). *Mar. Biol. J.* 2(2): 70–79. doi: 10.21072/mbj.2017.02.2.07

Ryabushko V., Prazukin A., Popova E., Nekhoroshev M. 2014. Fucoxanthin of the brown alga *Cystoseira barbata* (Stackh.) C.Agardh from the Black Sea. *J. Black Sea/Mediter. Environ.* 20(2): 108–113.

Silva G., Pereira R.B., Valentao P., Andrade P.B, Sousa C. 2013. Distinct fatty acid profile of ten brown macroalgae. *Braz. J. Pharm*. 23: 608–613.

Stefanov K., Konaklieva M., Brechany E.Y., Christie W.W. 1988. Fatty acid composition of some algae from the Black Sea. *Phytochemistry*. 27(11): 3495–3497.

Susanto E., Fahmi A.S., Abe M., Hosokawa M., Miyashita K. 2016. Lipids, fatty acids, and fucoxanthin content from temperate and tropical brown seaweeds. *Aquat. Proc.* 7: 66–75.

Tallima H., El Ridi R. 2017. Arachidonic acid: Physiological roles and potential health benefits. A Review. *J. Adv. Res.* 11: 33–41.

Terasaki M., Hirose A., Narayan B., Baba Y., Kawagoe C., Yasui H., Miyashita K. 2009. Evaluation of recoverable functional lipid components of several brown seaweeds (*Phaeophyta*) from Japan with special reference to fucoxanthin and fucosterol contents. *J. Phycol.* 45(4): 974–980.

Tsukui T., Konno K., Hosokawa M., Maeda H., Sashima T., Miyashita K. 2007. Fucoxanthin and fucoxanthinol enhance the amount of docosahexaenoic acid in the liver of KKAy obese/diabetic mice. *J. Agr. Food Chem.* 55: 5025–5029.

Vizetto-Duarte C., Pereira H., Bruno de Sousa C., Pilar Rauter A., Albericio F., Custydio L., Varela J. 2015. Fatty acid profile of different species of algae of the *Cystoseira* genus: a nutraceutical perspective. *Nat. Prod. Res.* 29(13): 1264–1270.

Woo M.N., Jeon S.M., Kim H.J., Lee M.K., Shin S.K. 2010. Fucoxanthin supplementation improves plasma and hepatic lipid metabolism and blood glucose concentration in high-fat fed C57BL/6N mice. *Chem. Biol. Interact.* 186: 316–322.

Worm B., Hilborn R., Baum J.K., Branch T.A., Collie J.S., Costello C., Fogarty M.J., Fulton E.A., Hutchings J.A., Jennings S., Jensen O.P., Lotze H.K., Mace P.M., McClanahan T.R., Minto C., Palumbi S.R., Parma A.M., Ricard D., Rosenberg A.A., Watson R., Zeller D. 2009. Rebuilding global fisheries. *Science.* 325: 578–585.

Поступила 10.07.2019
Подписала в печать Е.К. Золотарева

REFERENCES

Airanthi M.K., Sasaki N., Iwasaki S., Baba N., Abe M., Hosokawa M., Miyashita K. 2011. Effect of brown seaweed lipids on fatty acid composition and lipid hydroperoxide levels of mouse liver. *J. Agric. Food Chem.* 59(8): 4156–4163.

Calder P.C. 2012. Mechanisms of action of (n-3) fatty acids. *J. Nutr.* 142: 592S–599S.

Dawczynski C., Schubert R., Jahreis G. 2007. Amino acids, fatty acids, and dietary fibre in edible seaweed products. *Food Chem.* 103(3): 891–899.

Dembitsky V.M., Maoka T. 2007. Allenic and cumulenic lipids. *Prog. Lipid Res.* 46: 328–375.

Dembitsky V.M., Rozentsvet O.A., Pechenkina E.E. 1990. Glycolipids, phospholipids and fatty acids of brown algal species. *Phytochemistry.* 29: 3417–3423.

Fariman G.A., Shastan S.J., Zahedi M.M. 2015. Seasonal variation of total lipid, fatty acids, fucoxanthin content, and antioxidant properties of two tropical brown algae (*Nizamuddinia zanardinii* and *Cystoseira indica*) from Iran. *J. Appl. Phycol.* 28(2): 1323–1331.

Gerasimenko N.I., Busarova N.G., Moiseenko O.P. 2010. Seasonal changes in the content of lipids, fatty acids, and pigments in brown alga *Costaria costata*. *Rus. J. Plant Physiol.* 57(2): 205–211.

Ivanova V., Stancheva M., Petrova D. 2013. Fatty acid composition of Black Sea *Ulva rigida* and *Cystoseira crinita*. *Bulg. J. Agric. Sci.* 19(S1): 42–47.

Kamnev A.N. 1989. *Structure and functions of brown algae*. Moscow: Moscow Gos. Univ. 200 p. [Rus.]

Keits M. 1975. Techniques of lipidology Isolation, analysis and identification of lipids. Translate from English. Moscow: Mir. 322 p. [Rus.]

Khotimchenko S.V., Vaskovsky V.E., Titlyanova T.V. 2002. Fatty acids of marine algae from the Pacific coast of North California. *Bot. Mar.* 45: 17–22.

Kim M.K., Dubacq J.P., Thomas J.C., Giraud G. 1996. Seasonal variations of triacylglycerols and fatty acids in *Fucus serratus*. *Phytochemistry*. 43: 49–55.

Kumari P., Kumar M., Gupta V., Reddy C.R.K., Jha B. 2010. Tropical marine macroalgae as potential sources of nutritionally important PUFAs. *Food Chem.* 120(3): 749–757.

Nekhoroshev M.V., Ryabushko V.I., Gureeva E.V. 2018. *Obtaining method of preventive product from the Black Sea algae genus Cystoseira* (*versions*). Pat. RF N 2658705. Publ. 22.06.2018. [Rus.]

Obluchinskaya E.D. 2005. *Technologies of the medicinal and medical prophylactics substances from brown seaweeds*. Apatity: Kola Sci. Centre RAS. 164 p. [Rus.]

Panayotova V., Merzdhanova A., Dobreva D.A., Zlatanov M., Makedonski L. 2017. Lipids of Black Sea algae: unveiling their potential for pharmaceutical and cosmetic applications. *J. IMAB.* 23(4): 1747–1751.

Prazukin A.V. 1983. Phenomenological description of the *Cystoseira barbata* branches growth as the basis for the periodization of their ontogenesis. *Ecol. Morya*. (15): 49–58.

Ratana-Arporn P., Chirapart A. 2006. Nutritional evaluation of tropical green seaweeds *Caulerpa lentillifera* and *Ulva reticulate*. *Kasetsart J. Nat. Sci.* 40: 75–83.

Patarra R.F., Leite J., Pereira R., Baptista J., Neto A.I. 2013. Fatty acid composition of selected macrophytes. *Nat. Prod. Res.* 27: 665–669.

Ryabushko V.I., Prazukin A.V., Gureeva E.V., Bobko N.I., Kovrigina N.G., Nekhoroshev M.V. 2017. Fucoxanthin and heavy metals in brown algae of genus *Cystoseira* C.Agardh from water areas with different anthropogenic influences (Black Sea). *Mar. Biol. J.* 2(2): 70–79. https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.2.07

Ryabushko V., Prazukin A., Popova E., Nekhoroshev M. 2014. Fucoxanthin of the brown alga *Cystoseira barbata* (Stackh.) C.Agardh from the Black Sea. *J. Black Sea/Mediter. Environ.* 20(2): 108–113.

Silva G., Pereira R.B., Valentao P., Andrade P.B., Sousa C. 2013. Distinct fatty acid profile of ten brown macroalgae. *Braz. J. Pharm.* 23: 608–613.

Stefanov K., Konaklieva M., Brechany E.Y., Christie W.W. 1988. Fatty acid composition of some algae from the Black Sea. *Phytochemistry*. 27(11): 3495–3497.

Susanto E., Fahmi A.S., Abe M., Hosokawa M., Miyashita K. 2016. Lipids, fatty acids, and fucoxanthin content from temperate and tropical brown seaweeds. *Aquat. Proc.* 7: 66–75.

Tallima H., El Ridi R. 2017. Arachidonic acid: Physiological roles and potential health benefits. A review. *J. Adv. Res.* 11: 33–41.

Terasaki M., Hirose A., Narayan B., Baba Y., Kawagoe C., Yasui H., Miyashita K. 2009. Evaluation of recoverable functional lipid components of several brown seaweeds (*Phaeophyta*) from Japan with special reference to fucoxanthin and fucosterol contents. *J. Phycol.* 45(4): 974–980.

Tsukui T., Konno K., Hosokawa M., Maeda H., Sashima T., Miyashita K. 2007. Fucoxanthin and fucoxanthinol enhance the amount of docosahexaenoic acid in the liver of KKAy obese/diabetic mice. *J. Agric. Food Chem.* 55: 5025–5029.

Vizetto-Duarte C., Pereira H., Bruno de Sousa C., Pilar Rauter A., Albericio F., Custydio L., Varela J. 2015. Fatty acid profile of different species of algae of the *Cystoseira* genus: a nutraceutical perspective. *Nat. Prod. Res.* 29(13): 1264–1270.

Vozzhinskaya V.B., Kamnev A.N. 1994. *Ecological and biological basis for cultivation and usage of sea bottom algae.* Moscow: Nauka. 202 p. [Rus.]

Woo M.N., Jeon S.M., Kim H.J., Lee M.K., Shin S.K. 2010. Fucoxanthin supplementation improves plasma and hepatic lipid metabolism and blood glucose concentration in high-fat fed C57BL/6N mice. *Chem. Biol. Interact.* 186: 316–322.

Worm B., Hilborn R., Baum J.K., Branch T.A., Collie J.S., Costello C., Fogarty M.J., Fulton E.A., Hutchings J.A., Jennings S., Jensen O.P., Lotze H.K., Mace P.M., McClanahan T.R., Minto C., Palumbi S.R., Parma A.M., Ricard D., Rosenberg A.A., Watson R., Zeller D. 2009. Rebuilding global fisheries. *Science.* 325: 578–585.

Algologia. 2019, 29(4): 391–403
https://doi.org/10.15407/alg29.04.391

Ryabushko V.I.[1], Kamnev A.N.[2,3], Gureeva E.V.[1], Prazukin A.V.[1], Nechoroshev M.V.[1]

[1]Federal Research Center of RAS,
38 Lenin Avenue, build. 3, Moscow 119991, Russia
[2]P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the RAS,
36 Nahimovskiy Prosp., Moscow 117997, Russia
[3]Moscow Region State University,
10A Radio Str., Moscow 105005, Russia

CONTENT OF LIPIDS, FATTY ACIDS, AND FUCOXANTHIN IN BRANCHES OF DIFFERENT AGES OF *CYSTOSEIRA BARBATA* (STACKHOUSE) C.AGARDH (*PHAEOPHYCEAE*)

Data on the concentration of total lipids, fatty acids, and fucoxanthin, depending on the age of the branches of brown alga *Cystoseira barbata*, collected on the Crimean coast of the Black Sea, are presented. The fatty acid content was determined by gas chromatography, and fucoxanthin was measured by means of thin layer chromatography. In the summer, fairly low concentrations of lipids and fucoxanthin were noted in the branches of *Cystoseira* thalli. The maximum concentration of lipids (7.8 ± 0.3 $mg \cdot g^{-1}_{dry}$) and fucoxanthin (0.59 ± 0.04 $mg \cdot g^{-1}_{dry}$) was found in branches of 3–5 months old. A high content of fatty acids was also noted: myristic C14:0, palmitic C16:0, stearic C18:0, oleic C18:1 (n-9), linoleic C18:2 (n-6), stearidonic C18:4 (n-3), arachidonic C20:4 (n-6), and eicosapentaenoic C20:5 (n-3). In the lipid fraction of *C. barbata* branches, the maximum content of palmitic acid (C16:0) was found to be 21.6%. Myristic acid (C14:0) was present in small amounts, and pentadecanoic (C15:0) and heptadecanoic (C17:0) acids were present in trace amounts.

The concentration of C14:0, C15:0, and C17:0 in the thallus of *C. barbata* was 2-3 times higher than in other species of brown algae. The total content of saturated fatty acids (SFAs) was 31%, polyunsaturated fatty acids (PUFAs) 36–42%. The concentration of arachidonic acid varied within 7–14% depending on the age of the branches, and its maximum amount was found in branches older than 3 months. The content of eicosapentaenoic acid averaged 7%; its maximum content of 9% was in branches 5–6 months old. Docosahexaenoic acid was found in small quantities (0.37 ± 0.2%). Analysis of the total amount of PUFAs and SFAs, (n-3) and (n-6) acids showed that the maximum content of all groups of acids is contained in branches older than 5 months. The proportion of the most valuable n-3 fatty acids averages 15.3% of the total amount of fatty acids methyl esters (FAME). Branches of *C. barbata* older than 3 months have an optimal (1.0) n-3/n-6 PUFAs ratio for human health. The high concentrations of C14:0, C16:0, C18:4 (n-3), C20:4 (n-3), C18:2 (n-6), and C20:4 (n-3) in *Cystoseira* correlate with the maximum fucoxanthin content. The data obtained allow optimizing the process of collecting raw materials in order to maximize the yield of target biologically active substances.

Key words: *Cystoseira barbata*, *Phaeophyceae*, fatty acids, lipids, fucoxanthin, Black Sea