

УДК 582.272:57.014

**В.И. РЯБУШКО¹, Л.И. МУСАТЕНКО², Л.В. ВОЙТЕНКО²,
Е.В. ПОПОВА¹, М.В. НЕХОРОШЕВ¹**

¹Ин-т биологии южных морей им. А.О. Ковалевского НАН Украины,
пр. Нахимова, 2, 99011 Севастополь, Украина

²Ин-т ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины,
ул. Терещенковская, 2, 01001 Киев, Украина

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РОЛЬ ФУКОКСАНТИНА И ФИТОГОРМОНОВ ИЗ МОРСКИХ БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ

Обобщены литературные и оригинальные данные о содержании фукоксантина и фитогормонов в морских бурых водорослях. Рассмотрена биологическая активность фукоксантина, в т.ч. его антиоксидантные, противовоспалительные, противораковые, антидиабетические и другие свойства. Показано, что бурые водоросли рода *Cystoseira* C. Agardh, обитающие в Черном море, являются перспективным сырьем для получения биологически активных веществ, в т.ч. фукоксантина и фитогормонов.

Ключевые слова: фукоксантин, фитогормоны, бурые водоросли, цистозира, Черное море.

Введение

В течение длительного времени макроводоросли широко используют как источник промышленно важных полисахаридов, таких как агар, каррагинан, фукоидан и др. (Норре et al., 1979). В последние годы увеличилось количество публикаций, посвященных лечебным свойствам экстрактов и отдельных компонентов из бурых водорослей (Облучинская, 2005). Биологически активные вещества (БАВ) из макрофитов используют для приготовления фармацевтических, пищевых, косметических и сельскохозяйственных препаратов. Наиболее известные из них – полиненасыщенные жирные кислоты омега-3, фитогормоны, каротиноиды, витамины, макро- и микроэлементы и т.д. Развитие технологий получения БАВ позволило создать большой ассортимент лекарственных и лечебно-профилактических препаратов, включающих макрофиты и продукты их переработки. Среди них значительное место занимают препараты на основе бурых водорослей.

Цель данной работы – обобщить сведения о содержании, биологической активности фукоксантина и фитогормонов из бурых водорослей, в т.ч. представителей рода *Cystoseira*, обитающих в Черном море.

© В.И. Рябушко, Л.И. Мусатенко, Л.В. Войтенко, Е.В. Попова, М.В. Нехорошев, 2014

Биологическая характеристика и запасы бурых водорослей рода *Cystoseira* в Черном море

В Черном море произрастают 2 вида цистозир (*Cystoseira barbata* (Stackh.) C. Agardh и *C. crinita* Duby), относящиеся к порядку *Fucales*, семейству *Sargassaceae*. Цистозира – самая крупная водоросль в Чёрном море, средняя длина ее слоевищ составляет 60–70 см. Она образует в прибрежье обширные заросли преимущественно на глубине 0,5–10 м на твердых скалистых и каменистых грунтах со средней биомассой 3 кг·м⁻². По биомассе и численности цистозира преобладает на глубине до 5 м. В сезонной динамике биомассы наблюдается два максимума: весенний (апрель–июнь) и осенний (сентябрь–ноябрь), когда биомасса достигает 7 и 4 кг·м⁻² соответственно, что связано с интенсивным ростом в эти периоды и массовым развитием ее репродуктивных органов. Рост цистозир продолжается круглый год и достигает максимума в мае. Наиболее высокая биомасса *Cystoseira* отмечена у полузащищенных и открытых берегов. Различия в развитии водоросли зависят от степени загрязнения вод. Средняя продолжительность жизни цистозир составляет 8–10 лет, но она может достигать возраста 15 лет и более. Основная масса приходится на боковые веточки, продолжительность жизни которых всего 3–6 месяцев, поэтому 2–3-летние слоевища и слоевища 10–15 лет имеют приблизительно одинаковую массу. В возрасте 3 лет длина талломов достигает 0,5–0,6 м, биомасса – 4–6 кг·м⁻². С этого времени можно рекомендовать ее добычу (Блинова, 2007).

Несмотря на усиливающийся антропогенный прессинг, сырьевые запасы промысловых водорослей в Черном море достаточно велики. Основные скопления макрофитов сосредоточены в северо-западной части Черного моря, на крымском и кавказском шельфе. Наиболее крупные скопления водорослей наблюдаются на шельфе юго-западного и западного Крыма, где запасы цистозир оцениваются в 34 тыс. тонн. Обширные заросли макрофитов сосредоточены в верхней и средней сублиторальной зоне, в нижней сублиторальной зоне у границы фитали количество водорослей меньше в 6–7 раз. Биомасса цистозир в верхней сублиторальной зоне варьирует от 25,2 до 74,4 т·га⁻¹, а в нижней не превышает 0,03–5,0 т·га⁻¹ (Современное ..., 2003).

Самые большие запасы в российском прибрежье имеет *C. crinita* (200,6 тыс. т сырой биомассы), занимающая господствующее положение в чистых экотопах открытых берегов с интенсивным движением воды. Близкородственный ей вид *C. barbata* предпочитает более глубоководные местообитания с условиями менее интенсивного внешнего обмена. Общие запасы цистозир в этом регионе оцениваются в 80,6 тыс. т сырой биомассы. Наибольшая биомасса обоих видов цистозир приходится на относительно небольшой участок побережья от пос. Дюрсо до м. Анапского (до 120 тыс. т сырой биомассы *C. crinita* и около 26 тыс. т сырой биомассы *C. barbata*). Общие запасы водорослей на участке мыс Кадош – мыс Анапский составляют около 375 тыс. т сырой биомассы, из них около

Приблизительно из 700 природных каротиноидов только 43 содержат алленовую группу. Основные алленовые каротиноиды – фукоксантин из бурых водорослей и некоторых микроводорослей и неоксантин из высших растений (Miyashita et al., 2009). Содержание фукоксантина подробно исследовано у наиболее распространенных в прибрежных водах Японии бурых водорослей (Kanazawa et al., 2008) и черноморской *Cystoseira* sp. (табл. 1). Сырые водоросли содержат фукоксантин в большем количестве, чем сухие, так как процесс высушивания приводит к разрушению каротиноида, поскольку он чувствителен к окислению.

Таблица 1

Содержание фукоксантина в бурых водорослях

Таксон	Состояние сырья	Содержание фукоксантина, мг/100 г сырой биомассы	Литературные данные
<i>Laminaria japonica</i>	Сырая биомасса	18,7	Kanazawa et al., 2008
<i>Undaria pinnatifida</i>	Сырая биомасса	11,1	«
	Сухая биомасса	8,4	«
<i>Eisenia bicyclis</i>	Сырая биомасса	7,7	«
<i>Sargassum fulvellum</i>	Сырая биомасса	6,5	«
	Сухая биомасса	Следы	«
<i>Hizikia fusiformis</i>	Сырая биомасса	2,2	«
	Сухая биомасса	Следы	Kanazawa et al., 2008
<i>Cystoseira</i> sp.	Сырая биомасса	18,8	Оригинальные данные

Содержание фукоксантина в морских водорослях колеблется в зависимости от сезона и стадии развития растений. Экспериментальные данные показали, что в апреле и мае его содержание максимально. Таким образом, апрель–май является наиболее подходящим временем для получения этого пигмента (Miyashita, Hosokawa, 2008). В результате исследований биологической активности фукоксантина установлены его антиоксидантные, антираковые, противоопухолевые, антидиабетические и другие свойства. В косметологии его используют для отбеливания и улучшения состояния кожи (Нео, Jeon, 2009).

Наиболее известным свойством каротиноидов является их антиоксидантная активность. Фукоксантин обладает сильным антиоксидантным свойством в бескислородных условиях, тогда как другие каротиноиды (ликопин, рутин, астаксантин, зеаксантин) практически не проявляют активность в этих условиях, а большинство тканей при физиологических условиях имеют низкое содержание кислорода. Кроме того, типичные антиоксиданты обычно являются донорами протона (аскорбиновая кислота, α -токоферол, глутатион), а фукоксантин – донором электрона при антирадикальной активности. Комбинация этих отличии-

тельных свойств редко встречается среди природных пищевых компонентов (Riccioni et al., 2011). Свободные радикалы и оксидантный стресс вовлечены в патогенез онкологических заболеваний. Таким образом, каротиноиды, благодаря их антиокислительным свойствам, являются эффективными противораковыми молекулами (Peng et al., 2011; D'Orazio et al., 2012).

В настоящее время проводятся эксперименты по выявлению возможной защитной роли фукоксантина при сердечно-сосудистых заболеваниях. Этот каротиноид значительно уменьшает повреждение нервных клеток при гипоксии и реоксигенации, возможно, посредством его антиоксидантной активности, оказывая таким образом благоприятное воздействие при цереброваскулярных заболеваниях и проявляя активность против ишемического некроза нейронов при гипертензии у крыс (Peng et al., 2011; Riccioni et al., 2011). Фукоксантин также обладает сильным и безопасным антипролиферативным действием на эпителиальные клетки капсулы хрусталика глаза и может применяться при лечении катаракты (Moreau et al., 2006)

Возможные пути применени фукоксантина в медицине

Противораковая активность. Предполагается, что фукоксантин активирует апоптоз и останавливает пролиферацию раковых клеток. Этот пигмент принимает участие в регуляции клеточного цикла (Peng et al., 2011). Он особенно активен при раке кожи, предстательной железы, толстой кишки и лейкемии, проявляя антипролиферативную активность и индуцируя апоптоз раковых клеток различного генезиса (Nishino et al., 2009; D'Orazio, 2012) (табл. 2).

Сильный ингибирующий эффект фукоксантина на рост раковых клеток был подтвержден также на примере человеческих раковых клеток предстательной железы (Kotake-Nara et al., 2001). Неоксантин и фукоксантин замедляли рост раковых клеток. В пользу того, что фукоксантин ускоряет апоптоз, свидетельствует и фрагментация ДНК в раковых клетках. Пигмент может селективно ингибировать активность ДНК-полимеразы млекопитающих, таким образом проявляя противоопухолевую активность (Peng et al., 2011). Хотя противоопухолевый эффект фукоксантина уже описан, точные механизмы его действия ещё не выяснены.

Влияние фукоксантина на снижение массы тела. Увеличение количества тучных людей признано международной проблемой. Это может быть второй после курения самой важной предотвратимой причиной смерти. Чрезмерное накопление жира в теле и белой жировой ткани вызывает ожирение и нарушение выделения цитокинов из жировой ткани, что приводит к увеличению риска многих заболеваний, таких, например, как диабет типа II, гиперлипидемия, гипертензия и сердечно-сосудистые патологии.

Фукоксантин способствует уменьшению концентрации абдоминального белого жира в брюшной полости, с которым связаны болезни сердца и сахарный диабет. Клинические испытания показали, что ксан-

тиген (фукоксантин + масло из семян граната) способствует потере массы, уменьшению содержания жира в организме и печени, улучшает печеночные пробы у тучных женщин, не страдающих сахарным диабетом. Исследователи пришли к заключению, что 300 мг экстракта семечек граната и 4 300 мг экстракта бурых водорослей (общее содержание фукоксантина в этой комбинации составляло 2,4 мг) снижают процент жира в организме. Ксантиген и фукоксантин также увеличивают расход энергии организма в состоянии покоя (Abidov et al., 2010).

Таблица 2

Противораковый эффект фукоксантина (Nishino et al., 2009)

Состояние	Число мышей	Среднее число опухолей у мыши	Ингибирование, %
Канцерогенез кожи			
Контрольная группа	15	2,2	
+ Фукоксантин (смазывание 0,6 мкмоль раствором 2 раза в неделю, 20 недель)	15	0	100
Канцерогенез двенадцатиперстной кишки			
Контрольная группа	21	1,1	
+ Фукоксантин (0,005 % в питьевой воде, 16 недель)	20	0,5	55
Канцерогенез толстой кишки			
Контрольная группа	19	63,3	
+ Фукоксантин (0,01 % в питьевой воде, 7 недель)	15	47,1	26
Канцерогенез печени			
Контрольная группа	15	5,9	
+ Фукоксантин (0,001 % в питьевой воде, 40 недель)	15	3,1	47

Фукоксантин значительно снижает концентрацию триглицеридов плазмы и печени, а также активность синтеза жирных кислот и триглицеридов печени, значительно увеличивает содержание плазменного высокоплотного липопротеина холестерина, фекального триглицерида и холестерина. Фукоксантин увеличивает активность окислительных ферментов жирных кислот в белой жировой ткани мышей, о чем свидетельствует повышение качества плазменного и печеночного липидного профиля, фекальных липидов, печеночного метаболизма холестерина, синтеза жирных кислот и абсорбции липидов (Peng et al., 2011).

Известно, что в процессе метаболизма организм производит тепло. Фукоксантин регулирует термогенез и увеличивает количество энергии, выделяющейся в виде тепла из жировой ткани. Этот пигмент стимулирует выработку разобщающего белка-1 (UCP1), термогенина, в митохондриях адипоцитов абдоминальной белой жировой ткани, который обеспечивает

быстрое окисление питательных веществ с низкой интенсивностью синтеза АТФ. Таким образом, происходит увеличение скорости «сжигания» абдоминального жира. Накопление разобщающего белка-1 в белой жировой ткани индуцируется метаболитами фукоксантина, что представляет интерес, так как обычно этот белок находится только в бурой жировой ткани (D'Orazio et al., 2012).

Компания Beijing Ginkgo Biological Technology Co (Китай) в 2008 г. проводила клинические испытания препарата, содержащего фукоксантин (Ishikawa et al., 2008). Рандомизированное клиническое исследование проводили на группе людей. 5 из них принимали плацебо, 6 – фукоксантин в количестве 2 мг в день, 8 человек принимали 4 мг фукоксантина в день. На протяжении исследования пациенты не придерживались какой-либо диеты. Были получены статистически достоверные различия между пациентами, принимавшими и не принимавшими плацебо. После прекращения 3-месячного приема фукоксантина на протяжении следующих 4 месяцев продолжалось равномерное снижение веса и жировой массы тела. Компьютерная томография показала положительную динамику продолжительной потери абдоминального (брюшного) жира. При анализе мочи, крови и общего самочувствия у пациентов не выявлено никаких отклонений от нормы. Таким образом, препараты, содержащие фукоксантин, могут быть рекомендованы в комплексной терапии для борьбы с ожирением.

Антидиабетическая активность. В результате исследований *in vivo* была показана антидиабетическая активность фукоксантина на группе мышей (Maeda et al., 2007). Фукоксантин заметно уменьшал уровень глюкозы в крови и инсулина плазмы, так же как и потребление воды у диабетических/тучных мышей линии КК-Ау. Высказано предположение, что этот каротиноид улучшает устойчивость к инсулину и уменьшает уровень глюкозы в крови, по крайней мере частично, через даунрегуляцию адипокинов (фактор некроза опухоли- α , интерлейкин-6, ингибитор активатора плазминогена-1), непосредственно действуя на адипоциты и макрофаги в белой жировой ткани при повышенном регулировании ГЛЮТ-4 в скелетной мышце у мышей (Peng et al., 2011; D'Orazio et al., 2012). Исследуемой группе мышей на протяжении 4 недель давали корм с концентрацией фукоксантина 0,1 и 0,2 %. При этом фиксировали показатели уровня глюкозы в крови, уровень инсулина и концентрацию лептина в сыворотке крови. В результате эти показатели были значительно ниже у группы, получавшей фукоксантин, по сравнению с контрольной (Maeda et al., 2007; Park et al., 2011).

Противовоспалительное действие. Воспаление – защитная реакция организма против различных патогенных возбудителей, которое характеризуется привлечением большого количества лейкоцитов (нейтрофилов, моноцитов-макрофагов, тучных клеток) к воспаленной области, к которой эти клетки вызываются посредством воспалительных медиаторов,

генерируя при этом супероксид анион и нитроксильный радикал, что может стать саморазрушительным процессом. Противовоспалительные средства должны уменьшить воспалительный ответ, подавляя производство воспалительных цитокинов, таких как фактор некроза опухоли- α , интерлейкин- 1β , интерлейкин-6, и воспалительные медиаторы, включая синтез нитроксильного радикала и простагландина E₂, индуцируя синтез NO-синтазы и циклооксигеназы. В результате исследований было показано, что фукоксантин ингибирует воспалительные цитокины и медиаторы в липополисахарид-активированных клетках макрофага (RAW 264.7), подавляет дегрануляцию тучных клеток *in vivo* (Peng et al., 2011; D'Orazio et al., 2012).

Применение фукоксантина в косметологии. Коллаген составляет 90 % дермы кожи. Он распределен по всей дерме, делая кожу достаточно эластичной. Когда фермент коллагеназа активирован и коллаген расщепляется, начинают проявляться такие возрастные явления, как морщины и провисание кожи. Гиалуроновая кислота широко представлена в организме человека, она входит в состав кожи, суставной жидкости, стекловидного тела и связок. Она выполняет различные функции, например связывание и защиту клеток, формирование тканей кожи, сохранение влаги в тканях и поддержание эластичности кожи. Когда количество гиалуроновой кислоты снижается, кожа становится дегидратированной и теряет прочность, в результате появляются морщины. Гиалуроновая кислота в организме расщепляется гиалуронидазой. Клинические исследования показали, что экстракт бурой водоросли, содержащий 8,6 % фукоксантина, замедляет активацию гиалуронидазы, понижая её концентрацию от 30 до 1 мкг/мл, ингибируя тем самым расщепление гиалуроновой кислоты и коллагена. Подобным образом происходит ингибирование активности эластазы (Нео, Jeon, 2009; Urikura et al., 2011).

Темный цвет и темные пятна на коже вызваны меланином. Допахинон в пигментных клетках (меланоцитах) продуцируется из тирозина в организме под действием тирозиназы. Затем путем последовательных неэнзиматических реакций, включая циклизацию и окислительную полимеризацию, допахинон превращается в 5,6-дигидрохиндол и 5,6-дигидрохиндол-2-карбоксилую кислоту. Синтезируемые соединения включаются в высокомолекулярный полимер – меланин (эумеланин). Клинические испытания показали, что 8,6 %-й раствор фукоксантина ингибирует активность тирозиназы, снижая концентрацию от 10 до 1 мкг/мл. В исследованиях *in vivo* морские свинки с вызванной УФ-светом пигментацией получали продукт, содержащий 1 %-й раствор фукоксантина. В результате на 12-й день эксперимента темное пятно значительно посветлело, а на 15-й день практически исчезло. Таким образом, каротиноид значительно ускоряет процесс удаления пигментных пятен (Shimoda et al., 2010; Urikura et al., 2011).

Фитогормоны

Растительные гормоны – это низкомолекулярные органические вещества, вырабатываемые растениями в исключительно малых концентрациях и влияющие на физиологические процессы, такие как рост, развитие, дифференцирование и ответ на абиотические и биотические стрессы (Lin, Tan, 2011). В настоящее время у высших растений идентифицировано 10 групп физиологически активных веществ гормонального типа действия: абсцизины, ауксины, цитокинины, гиббереллины, этилен, полиамины, brassinosteroids, жасмонаты, салицилаты и олигосахариды. Но только два из них полностью соответствуют принятым в настоящее время критериям, характеризующим фитогормон: вещество низкой молекулярной массы, которое действует на расстоянии и в очень низких концентрациях. Это вещества с ауксиновой и цитокининовой активностью. Ряд косвенных свидетельств позволяет предположить, что именно эти фитогормоны возникли на наиболее ранних этапах эволюции (Тараховская и др., 2007). К настоящему времени в водорослях обнаружены практически все известные фитогормоны высших растений. Содержание основных гормонов роста в талломах бурой водоросли *Cystoseira barbata*, обитающей в Черном море, варьирует в зависимости от сезона года и стадии развития растения (табл. 3).

Таблица 3

Содержание фитогормонов в талломе бурой водоросли *Cystoseira barbata* из Черного моря, нг/г сырой биомассы (оригинальные данные)

Время сбора	Индолил-3-уксусная кислота	Абсцизовая кислота	Цитокинины
Октябрь	13,1	1,5	43,4
Январь	40,0	5,9	225,6
Апрель	7,7	2,9	145,2
Июль	2,4	2,0	43,2

Фитогормоны морских водорослей исследованы значительно меньше, чем у высших наземных растений. Растительные и животные гормоны имеют сходную химическую структуру. Поэтому можно предположить, что биологические активные соединения водорослей существенно влияют на метаболические процессы у животных и человека. Ауксины участвуют в регулировании развития растений, включая эмбриогенез, деление и дифференциацию клеток, органогенез, а также играют важную роль в явлениях гео- и фототропизма. У водорослей различных систематических групп обнаружено до 5 биологически активных соединений индольной природы. Наиболее широко распространена индолил-3-уксусная кислота (ИУК), а также индолил-ацетонитрил, индолил-ацетэтил, триптофан, который считают предшественником ИУК (Bail et al., 2010).

Первые сообщения о наличии ауксиноподобных веществ в экстрактах многоклеточных водорослей появились еще в 30-х годах прошлого столетия у зеленой водоросли *Valonia macrophyta*, бурой *Fucus vesiculosus*, а также у морских диатомовых водорослей. Наличие ИУК было подтверждено у бурых водорослей *Macrocystis purifera*, *Laminaria digitata*, *L. cloustonii*, *Ascophyllum nodosum*, *Halopteris scoparia*, *Pyleiela litoralis*, *Halidrys* sp. Ауксины обнаружены в экстрактах фукуса, однако их содержание составляло меньше 0,1 мкг/г сырой массы, причем в мужском талломе водоросли их обнаружено больше, чем в женском (Полевой и др., 2003; Basu, 2002). Индолил-3-уксусная кислота находится в растениях в двух формах: свободной и связанной. Свободная ИУК подвижна и легко экстрагируется. Связанная ИУК соединена с белками, белок-подобными веществами и другими органическими соединениями, например полифенолами, сахарами, липидами. В определенных условиях связанные ауксины легко продуцируют свободные, а свободные, в комплексе с другими веществами, образуют связанные (рис. 2).

Индолил-3-уксусная кислота обладает цитотоксическими свойствами после преобразования в активную форму ферментом пероксидазой хрена (HRP). Последние исследования подтвердили, что ИУК в комбинации с HRP вызывает апоптоз человеческих клеток меланомы G361. Бромпроизводное индолуксусной кислоты является потенциальным ингибитором пептидной деформилазы (PDF), от которой зависит выживание и рост патогенных бактерий, не затрагивая человеческую митохондриальную PDF, т.о. избегая неблагоприятного воздействия на нормальные клетки. На основе производных ИУК могут быть разработаны новые антибиотики для борьбы с высокорезистентными штаммами бактерий (Lin, Tan, 2011).

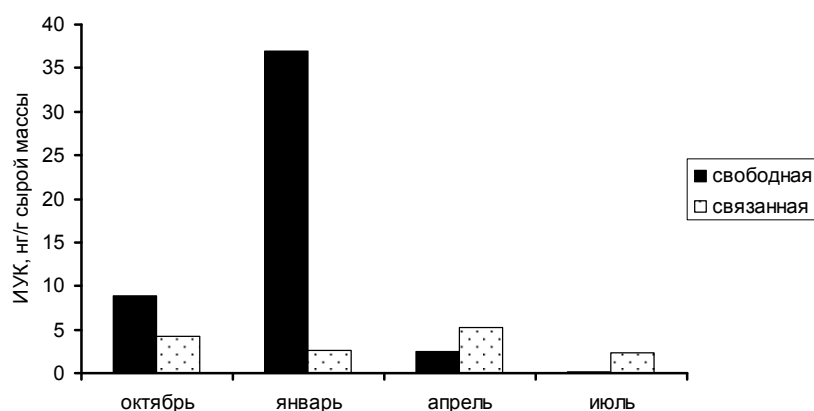


Рис. 2. Содержание индолил-3-уксусной кислоты в талломе бурой водоросли *Cystoseira barbata* (оригинальные данные)

Абсцизовая кислота (АБК) — универсальный стрессовый гормон кормофитов — была найдена в малых концентрациях практически у всех исследованных в этом отношении цианопрокариот, бриофитов, грибов,

лишайников и высших растений (Hartung, 2010). Из примерно 100 видов исследуемых водорослей 96 % содержат абсцизовую кислоту (Hirsch et al., 1989; Jameson, 1993). Этот гормон был найден в зеленых микроводорослях *Chlorella* sp., *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, в красных водорослях рода *Porphyra*, а также в талломах бурых макрофитов, относящихся к родам *Ascophyllum* и *Laminaria* (Тараховская и др., 2007; Hartung, 2010). АБК, как и цитокинины, обнаружены в черноморских макрофитах рода *Cystoseira* (рис. 3, 4).

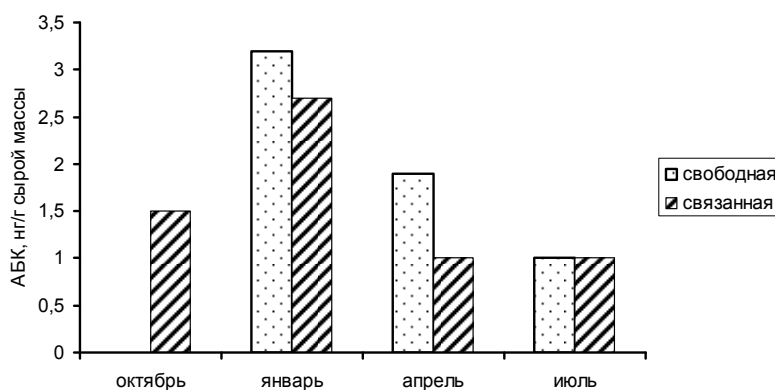


Рис. 3. Содержание абсцизовой кислоты в талломе бурой водоросли *Cystoseira barbata* из Черного моря (оригинальные данные)

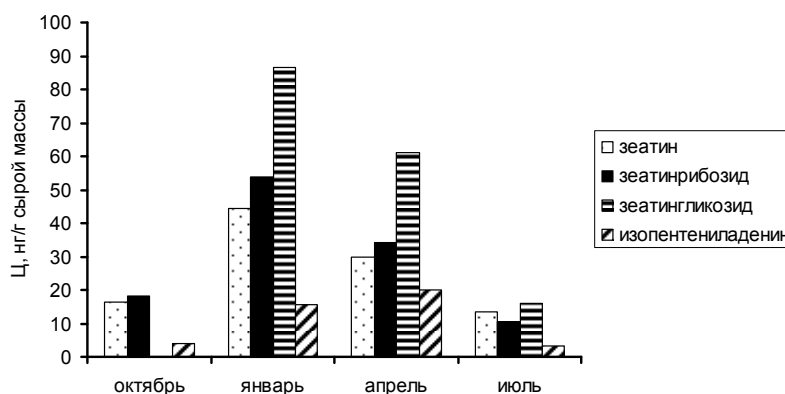


Рис. 4. Содержание цитокининов в талломе бурой водоросли *Cystoseira barbata* из Черного моря (оригинальные данные)

Заключение

Установлена высокая эффективность применения фукоксантина при похудении, антипролиферативное действие на Т-клеточную лейкемию. Ингибиторное действие этого каротиноида на жизнестойкость HL-60 клеток намного сильнее, чем β -каротина и астаксантина. Уникальный

подавляющий эффект фукоксантина на дифференцировку адипоцитов связан с его структурной особенностью, ключевым моментом в которой является алленовая связь. Комбинирование фукоксантина, выделенного из бурых водорослей, с маслом или липидами увеличивает его усвояемость в организме человека и может быть использовано для создания лекарственных препаратов. Дальнейшая разработка эффективных технологий выделения фукоксантина из водорослей необходима для исследования биологических свойств каротиноида и проведения клинических испытаний препаратов, созданных на его основе. В Черном море имеется достаточное количество доступного сырья (учитывая штормовые выбросы), бурых водорослей рода *Cystoseira*, которые являются перспективным сырьем для получения биологически активных веществ, в т. ч. фукоксантина и фитогормонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев Д.Ф.* Структура и продуктивность макрофитобентоса северо-кавказского шельфа Черного моря: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Краснодар, 2004. — 25 с.
- Афанасьев Д.Ф.* Макрофитобентос российского сектора Черного моря // Экол. моря. — 2005. — **68**. — С. 19–25.
- Блинова Е.И.* Водоросли-макрофиты и травы морей европейской части России (флора, распространение, биология, запасы, марикультура). — М.: ВНИРО, 2007. — 114 с.
- Облучинская Е.Д.* Технологии лекарственных и лечебно-профилактических средств из бурых водорослей. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. — 164 с.
- Полевой В.В., Тараховская Е.Р., Маслов Ю.И.* Роль ауксина в индукции полярности у зигот. *Fucus vesiculosus* L. // Онтогенез. — 2003. — **34**. — С. 432–437.
- Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей* / Ред. В.Н. Еремеев, А.В. Гаевская, Г.Е. Шульман, Ю.А. Загородняя. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. — 367 с.
- Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор)* / Под ред. В.Н. Еремеева, А.В. Гаевской. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. — 511 с.
- Тараховская Е.Р., Маслов Ю.И., Шишова М.Ф.* Фитогормоны водорослей // Физиол. раст. — 2007. — **54**(2). — С. 1–9.
- Abidov M., Ramazanov Z., Seifulla R. et al.* The effects of Xanthigen in the weight management of obese premenopausal women with non-alcoholic fatty liver disease and normal liver fat // Diabet. Obes. Metab. — 2010. — **12**(1). — P. 72–81.
- Bail A., Billoud B., Kowalczyk N. et al.* Auxin metabolism and function in the multicellular brown alga *Ectocarpus siliculosus* // Plant Physiol. — 2010. — **153**. — P. 128–144.
- Basu S., Sun H., Brian L. et al.* Early Embryo Development in *Fucus distichus* is auxin sensitive // Ibid. — 2002. — **130**. — P. 292–302.
- D'Orazio N., Gemello E., Gammone M. et al.* Fucoxanthin: a treasure from the sea // Mar. Drugs. — 2012. — **10**. — P. 604–616.
- Hartung W.* The evolution of abscisic acid (ABA) and ABA function in lower plants, fungi and lichen // Funct. Plant Biol. — 2010. — **37**. — P. 806–812.

- Heo S.J., Jeon Y.J. Protective effect of fucoxanthin isolated from *Sargassum siliquastrum* on UV-B induced dell damage // J. Photochem. Photobiol. – 2009. – **95**. – P. 101–107.
- Hirsch R., Hartung W., Gimmler H. Abscisic acid content of algae under stress // Bot. Acta. – 1989. – **102**. – P. 326–334.
- Ishikawa C., Tafuku S., Kadokaru T. et al. Antiadult T-cell leukemia effects of brown algae fucoxanthin and its deacetylated product fucoxanthinol // Int. J. Canc. – 2008. – **123**. – P. 2702–2712.
- Jameson P. Plant hormones in the algae // Progress in phycological research. – Biopress Ltd: Bristol, UK, 1993. – P. 240–279.
- Kanazawa K., Ozaki Y., Hashimoto T. et al. Commercial-scale preparation of biofunctional fucoxanthin from waste parts of brown sea algae *Laminalia japonica* // Food Sci. Technol. Res. – 2008. – **14**. – P. 573–582.
- Kotake-Nara E., Kuschiro M., Zhang H. et al. Carotenoids affect proliferation of fuman prostate cancer cells // J. Nutr. – 2001. – **131**. – P. 3303–3306.
- Lin L., Tan R. Cross-Kingdom actions of phytohormones: a functional scaffold exploration // Chem. Rev. – 2011. – **111**. – P. 2734–2760.
- Maeda H., Hosokawa M., Sashima T. et al. Effect of medium-chain triacylglycerols on anti-obesity effect of fucoxanthin // J. Oleo Sci. – 2007. – **56**. – P. 615–621.
- Matsuno T. Aquatic animal carotenoids // Fisher. Sci. – 2001. – **67**(5). – P. 771–783.
- Miyashita K., Hosokawa M. Beneficial health effects of seaweed carotenoid, fucoxanthin // Marine Nutraceuticals and functional foods. – Boca Raton, FL: CRC Press – Taylor & Francis Group, 2008. – P. 297–319.
- Miyashita K., Hosokawa M. Antiobesity effect of allenic carotenoid, fucoxanthin. In: Nutri-genomics and proteomics in health and disease: food factors and gene interactions. – Ames, IA: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – P. 145–160.
- Moreau D., Tamasoni C, Jacquot C. et al. Cultivated microalgae and the carotenoid fucoxanthin from *Odontella aurita* as potent anti-proliferative agents in bronchopulmonary and epithelial cell lines // Environ. Toxicol. Pharm. – 2006. – **22**. – P. 97–103.
- Niklitschek M., Alkaino J., Barahoma S. et al. Genomic organization of the structural genes controlling the astaxanthin biosynthesis pathway of *Xanthophyllomyces dendrorhous* // Biol. Res. – 2008. – **41**. – P. 93–108.
- Nishino H., Murakoschi M, Tokuda H. et al. Cancer prevention by carotenoids // Arch. Biochem. and Biophys. – 2009. – **483**. – P. 165–169.
- Park H.J., Lee M.K., Park Y.B. et al. Benefical effects of *Undaris pinnatifida* ethanol extract on diet-induced-insulin resistance in C57BL/6J mice // Food Chem. Toxicol. – 2011. – **49**. – P. 727–733.
- Peng J., Yuan J., Wu C. et al. Fucoxanthin, a marine carotenoid present in brown seaweeds and diatoms: metabolism and ioactivities relevant to human helth // Mar. Drugs. – 2011. – **9**. – P. 1806–1828.
- Riccioni G. Marine carotenoids and oxidative stress // Ibid. – 2012. – **10**. – P. 116–118.
- Riccioni G., D'Orazio N. Franceschelli S. et al. Marine carotenoids and cardiovascular risk markers // Ibid. – 2011. – **9**. – P. 1166–1175.
- Seddon J. Multivitamin-multimineral supplements and eye disease: age-related macular degeneration and cataract // Amer. J. Clin. Nutr. – 2007. – **85**(1). – P. 304–307.

Shimoda H., Tanaka J., Shan S. et al. Anti-pigmentary activity of fucoxanthin and its influence on skin mRNA expression of melanogenic molecules // J. Pharm. and Pharmacol. – 2010. – 62. – P. 1137–1145.

Urikura I., Sugawara T., Hirata T. Protective effect of fucoxanthin against UVB-induced skin photoaging in hairless mice // Biosci. Biotechnol. Biochem. – 2011. – 75. – P. 757–760.

Получена 28 декабря 2012 г.

Подписал в печать А.И. Божков

V.I. Ryabushko¹, L.I. Musatenko², L.V. Voitenko², E.V. Popova¹, M.V. Nechoroshev¹

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of Southern Seas, NAS of Ukraine,
2, Nakhimov Av., 99011 Sevastopol, Ukraine

²N.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine,
2, Tereshchenkivska St., 01001 Kiev, Ukraine

THE FUNCTIONAL ROLE OF FUCOXANTHIN AND PHYTOHORMONES FROM THE BROWN SEAWEEDS

The literature and original data on the content of fucoxanthin and phytohormones in marine brown algae are summarized. The biological activity of fucoxanthin, including its antioxidant, anti-inflammatory, anticancer, antidiabetic and other properties are examined. The brown seaweeds genus *Cystoseira* C. Agardh, distributed in the Black Sea, are good source for the production of biologically active substances, including fucoxanthin and phytohormones.

Key words: fucoxanthin, phytohormones, brown algae, *Cystoseira*, Black Sea.