

# Charakterystyka i właściwości prozdrowotne wybranych karotenoidów występujących w rybach i skorupiakach

## Characteristics and health-promoting properties of selected carotenoids from fish and crustaceans

AGATA ADAMSKA, JAROSŁAWA RUTKOWSKA, MAŁGORZATA BIAŁEK

Zakład Analiz Instrumentalnych, Wydział Nauk o Żywieniu Człowieka i Konsumpcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Wprowadzenie.** Karotenoidy są związkami rozpowszechnionymi w przyrodzie, głównie w surowcach roślinnych. Dotychczas zidentyfikowano ok. 750 tych związków. W surowcach morskich oznaczono ponad 250 różnych typów karotenoidów. Związki te nadają barwę zarówno roślinom, jak i zwierzętom; niektóre z nich pełnią w organizmach rolę prowitaminy A oraz wykazują właściwości antyoksydacyjne.

**Analiza piśmiennictwa.** Ryby i skorupiaki są cennym źródłem karotenoidów. Organizmy te nie są w stanie syntetyzować tych związków, jednakże pobierają je wraz z paszą, głównie z alg. Absorpcja i zawartość karotenoidów w organizmach ryb uzależniona jest od ich gatunku, wieku, stanu fizjologicznego, sposobu żywienia i środowiska życia. Dystrybucja tych związków w organizmach ryb i skorupiaków jest również zróżnicowana w zależności od tkanki.

**Wnioski.** Ryby i skorupiaki oprócz powszechnie występujących karotenoidów np.  $\beta$ -karotenu zawierają charakterystyczne związki takie jak astaksantyna i fukoksantyna. Z piśmiennictwa wynika, że zarówno astaksantyna jak i fukoksantyna wykazują właściwości antyoksydacyjne. Astaksantyna wykazuje działanie przeciwzapalne oraz ochronne przed chorobami układu sercowo-naczyniowego. Fukoksantyna natomiast zwiększa oporność na insulinę i wpływa na obniżanie poziomu glukozy we krwi oraz obniżenie masy ciała. Dokładne poznanie właściwości i mechanizmów działania karotenoidów pochodzących z organizmów ryb i skorupiaków wymaga dalszych badań, które umożliwią zastosowanie tych cennych związków w profilaktyce i terapii.

**Słowa kluczowe:** karotenoidy, ryby, skorupiaki, astaksantyna, fukoksantyna

**Introduction.** Carotenoids are compounds prevalent in nature, mainly in plant products. So far about 750 of these compounds have been identified. In marine raw materials there were identified more than 250 different types of carotenoids. They are responsible for the colour of both plants and animals, some of them have an essential function as a vitamin A precursor and also antioxidant properties.

**The analysis of the literature.** Fish and crustaceans are a valuable source of carotenoids. These organisms are not able to synthesize carotenoids, however they can accumulate these compounds from forage, mainly from algae. The absorption and content of carotenoids in fish organisms depends on the species, age, physiological condition, feeding regime and environment. The distribution of carotenoids in organisms of fish and crustaceans also depends on the tissue.

**Conclusion.** Apart from typical carotenoids, for example  $\beta$ -carotene, fish and crustaceans contain specific compounds such as astaxanthin and fucoxanthin. The literature shows that both astaxanthin and fucoxanthin have antioxidant activity. Astaxanthin manifests anti-inflammatory and protective activity against CVD, whereas fucoxanthin improves insulin resistance, decreases blood glucose level and reduces body weight. The detailed understanding of properties and mechanisms of carotenoid activity from fish and crustaceans have not been fully revealed yet and deserve future studies, which would enable the use of these valuable compounds in prophylaxis and therapy.

**Key words:** carotenoids, fish, crustaceans, astaxanthin, fucoxanthin

© Probl Hig Epidemiol 2014, 95(1): 36-40

www.phie.pl

Nadesłano: 20.12.2013

Zakwalifikowano do druku: 26.02.2014

Adres do korespondencji / Address for correspondence

dr inż. Agata Adamska

Zakład Analiz Instrumentalnych

Wydział Nauk o Żywieniu Człowieka i Konsumpcji

ul. Nowoursynowska 159c, 02-776 Warszawa

tel. 22 5937071/81, fax 22 5937071, e-mail: agata\_adamska@sggw.pl

## Wprowadzenie

Ryby i skorupiaki są wartościowym surowcem w diecie człowieka ze względu na znaczną obecność wielonienasyconych kwasów tłuszczowych z rodziny omega-3, wykazujących wiele korzystnych funkcji zdrowotnych. Wśród kwasów tłuszczowych na szczególną uwagę zasługują kwasy: EPA (eikozapentaenowy C20:5) i DHA (dokozaheksaenowy C22:6) szczegól-

nie cenne w zapobieganiu chorobom układu sercowo-naczyniowego [1, 2]. Innymi cennymi związkami występującymi w organizmach zwierząt morskich są karotenoidy. Chemicznie związki te są klasyfikowane jako terpenoidy (składają się z ośmiu jednostek izoprenowych) i są metabolicznymi produktami pośrednimi kwasu mewalonowego [3]. Karotenoidy znane są nie tylko ze swoich właściwości nadawania barwy, ale

również pełnią w organizmach wiele ważnych funkcji m. in. rolę prowitamins A oraz wykazują właściwości antyoksydacyjne [3, 4].

Karotenoidy są związkami rozpowszechnionymi w przyrodzie, głównie w surowcach roślinnych. Dotychczas zidentyfikowano ok. 750 tych związków. W surowcach morskich oznaczono ponad 250 różnych typów karotenoidów [5], a szczególnie bogatym ich źródłem są ryby i skorupiaki. Surowce te wyróżniają zarówno obecność powszechnie występujących karotenoidów np.  $\beta$ -karotenu, jak i charakterystycznych związków takich, jak astaksantyna i fukoksantyna [6, 7]. Karotenoidy te powstają na drodze przemian  $\beta$ -karotenu, fukoksantyny, perydyniny, diatoksantyny, alloksantyny i astoksantyny [5]. Zawarte w surowcach wodnych karotenoidy pełnią wiele istotnych funkcji metabolicznych w organizmie człowieka.

## Cel pracy

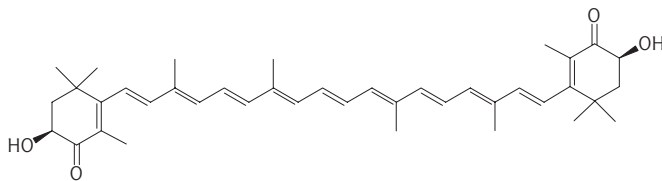
Charakterystyka i omówienie prozdrowotnych właściwości wybranych karotenoidów występujących w rybach i skorupiakach.

## Analiza piśmiennictwa

### Występowanie karotenoidów w rybach i skorupiakach

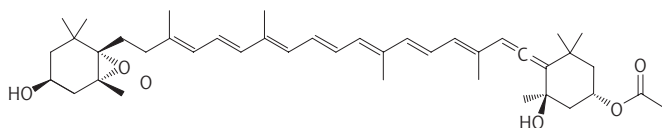
W organizmach ryb karotenoidy mogą umiejscawiać się w skórze, mięśniach, ikrze, mleczu, gonadach, wątrobie i oczach. W skórze ksantofile występują w formie zestryfikowanej, w innych narządach najczęściej w formie niezwiązanej. W organizmach skorupiaków takich jak: homar, krab czy krewetki ksantofile występują w połączeniu z białkami [8, 9].

Astaksantyna (ryc. 1) nadaje charakterystyczne czerwone zabarwienie łososiom, pstrągom, leszczom czerwonym oraz ikrze ryb [10]. Ryby łososiowate



Ryc. 1. Wzór strukturalny astaksantyny

Fig. 1. Chemical structure of astaxanthin



Ryc. 2. Wzór strukturalny fukoksantyny

Fig. 2. Chemical structure of fucoxanthin

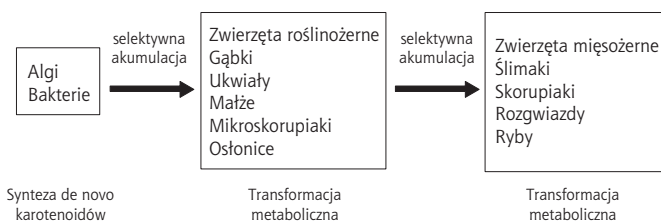
gromadzą astaksantynę w mięśniach. Karotenoid ten jest szeroko rozpowszechniony zarówno w rybach słodkowodnych jak i morskich [5]. Wykazano, że aktualnie pobranie astaksantyny przez człowieka jest największe z produktów morskich [11]. Astaksantyna jest ksantofilem, który zawiera dwie grupy tlenowe w każdym z pierścieni, przez co wykazuje silniejsze właściwości przeciwutleniające w porównaniu do innych karotenoidów [11]. Fukoksantyna (ryc. 2) jest naturalnie występującym związkiem o brązowej barwie nie wykazującym aktywności prowitamins A. Ksantofil ten zawiera w swojej strukturze grupę epoksydową i sprzężone grupy karbonylowe w polienowym łańcuchu. Budowa ta przekłada się na właściwości przeciwutleniające fukoksantyny [10, 12]. Ryby z rzędu okoniokształtnych zawierają także tunaksantynę, która nadaje żółtą barwę płetwom i skórze [5]. W pracy Czeczuga i wsp. [13] oznaczono zawartość tego karotenoidu w skórze i mięśniach tilapii nilowej hodowanej w Polsce, na poziomie odpowiednio: 0,040 i 0,038  $\mu\text{g/g}$  tkanki.

Ksantofile obecne są także w organizmach mięczaków oraz w pancerzach i mięsie skorupiaków. Za ich sprawą organizmy morskie mogą być: żółte, srebrzyste, zielone, czerwone, purpurowe bądź niebieskie [14]. Karotenoidy w pancerzach skorupiaków występują w formie wolnej oraz zestryfikowanej. Głównym karotenoidem skorupiaków jest astaksantyna, występująca w formie karotenoproteiny – krustacyjaniny, wykazującej barwę fioletową, niebieską i żółtą. Organizmy te syntetyzują astaksantynę z  $\beta$ -karotenu, powstającego z trawienia alg [5]. U homara występuje karotenoproteina  $\alpha$ -krustacyjanina, która nadaje pancerzowi charakterystyczny niebieski kolor. Krustacyjanina zbudowana jest z 16 podjednostek białkowych związanych z cząsteczkami astaksantyny. W temperaturze  $60^\circ\text{C}$  następuje denaturacja tego związku, zmienia się barwa pancerza homara z niebieskiej na czerwoną, ponieważ kompleks białka i ksantofilu ulega rozpadowi [15].

Również w przypadku krewetek, głównym pigmentem, który znacząco wpływa na zabarwienie mięsa jest astaksantyna, co potwierdzają badania Manjabhat i wsp. [16]. W badaniach przeprowadzonych przez Turecki Departament zajmujący się rybołówstwem i przetwórstwem ryb wykazano, że ilość ksantofili w krewetkach wynosi od 14,1 do 16,9  $\text{mg/kg}$  masy ciała krewetki, co świadczy o tym, że krewetki są lepszym źródłem karotenoidów w diecie niż na przykład pstrąg tęczowy, którego mięso zawiera od 10,2 do 13,7  $\text{mg/kg}$  [17].

### Czynniki kształtujące zawartość karotenoidów w organizmach morskich

Karotenoidy, pobrane przez zwierzęta wraz z paszą (ryc. 3), są w ich organizmach przekształcane



Ryc. 3. Odkładanie i metabolizm karotenoidów w łańcuchach pokarmowych zwierząt morskich. Opracowanie własne na podstawie: [5]

Fig. 3. Accumulation and metabolism of carotenoids in marine animals through food chain. Authors' own elaboration based on: [5]

w różne pochodne [18, 19]. Głównymi przemianami metabolicznymi, jakim ulegają karotenoidy w organizmach zwierząt są oksydacja, redukcja, przekształcenie lub oksydacyjny rozpad podwójnego wiązania oraz rozszczepienie wiązań epoksydowych [5].

Absorpcja i dystrybucja karotenoidów w organizmach ryb uzależniona jest przede wszystkim od ich gatunku, jak również od wieku, stanu fizjologicznego, sposobu żywienia i środowiska życia [20]. Hodowcy mogą na przykład zmieniać barwę mięsa rybiego poprzez modyfikacje składu paszy, zwiększając lub zmniejszając ilość danego barwnika karotenoidowego, modulując ilość tłuszczu oraz witamin A i E [14]. Dlatego do pasz dodawane są ekstrakty naturalnych barwników z drożdży *Phaffia rhodozyna* i alg, zwłaszcza *Haematococcus pluvialis* [8, 9, 21].

W pracy Woźniak i wsp. [20] wykazano, że dystrybucja barwników karotenoidowych w ciele ryb zróżnicowana jest w zależności od tkanki. Badania prowadzono na siejach, rodzaju ryb z gatunku łososiowatych, a ich zakres obejmował takie związki jak  $\beta$ -karoten, astaksantynę, luteinę, zeaksantynę i kantaksantynę. Wyniki doświadczenia pokazały, że najmniej karotenoidów gromadzonych jest w skórze, a dwa razy więcej barwników znajduje się w mięśniach ryb (0,78-0,90  $\mu\text{g/g}$  tkanki). Natomiast największe ilości ksantofili oznaczono w wątrobie (1,36-1,55  $\mu\text{g/g}$  tkanki). W skórze dominującym związkiem był  $\beta$ -karoten, jego zawartość wynosiła ok. 30%. Astaksantyna dominowała w mięśniach i wątrobie (30% i 28%), ilość zeaksantyny określono na poziomie 20%, kantaksantyny na 15%, najmniej było  $\beta$ -karotenu. Płeć ryb nie miała znaczącego wpływu na ilości karotenoidów w organizmie [20].

Ponadto z dotychczas przeprowadzonych badań na skorupiakach wynika, że ilość ksantofili w mięsie krewetek zależy od ich gatunku, oraz miejsca w którym żyją i rozwijają się, a także od spożywanej diety [16]. Kolejnym istotnym czynnikiem jest pora roku. Najwięcej karotenoidów występuje w krewetkach wiosną [16, 17].

## Właściwości prozdrowotne karotenoidów

Karotenoidy pełnią wiele funkcji metabolicznych w organizmach. Związki te wykazują właściwości antyoksydacyjne, które związane są z wygaszaniem tlenu singletowego i usuwaniem wolnych rodników [5]. Aktywność karotenoidów związana jest z polienową strukturą chemiczną tych związków i często zależy od obecności tlenowych grup funkcyjnych, medium w jakim karotenoidy się znajdują i rodzaju substancji prooksydacyjnej [22, 23]. Zdolność do neutralizacji tlenu singletowego jest proporcjonalna do ilości wiązań podwójnych w cząsteczce [5]. Antyoksydacyjne właściwości karotenoidów pochodzących z diety wpływają również na ich oddziaływanie przeciwnowotworowe i przeciwzapalne. Poza wymienionymi właściwościami niektóre karotenoidy wpływają na redukcję otyłości i przeciwdziałają cukrzycy [6, 24, 25]. Zdolność do zmiatania wolnych rodników przez ksantofile, łączy się z obroną przed powstawaniem niektórych nowotworów i guzów. W tym przypadku karotenoidy mogą działać jako antykancerogeny lub jako chemioprotektory. Wyniki wskazują na pozytywną korelację między poziomem karotenoidów ogółem w diecie a niższą zapadalnością na nowotwory prostaty [22].

Nieoceniona jest rola karotenoidów w zapobieganiu występowania chorób układu sercowo-naczyniowego np. zawału serca, udaru mózgu, jak również degeneracyjnych chorób wieku podeszłego [8].

Karotenoidy wspomagają również działanie limfocytów B i T, funkcje makrofagów i innych leukocytów pełniących ważne funkcje w reakcjach obronnych organizmu [26, 27]. Ich właściwości wykorzystano też w produkcji kosmetyków i produktów ochronnych przed promieniami słonecznymi [9].

## Astaksantyna w profilaktyce i leczeniu

Astaksantyna wykazuje znacznie silniejsze zdolności wychwytywania wolnych rodników i właściwości antyoksydacyjne w porównaniu do witaminy E i  $\beta$ -karotenu [28]. W badaniach przeprowadzonych nad zdolnością wygaszania różnych rodników tlenowych (ROS) i azotowych (RNS) związek ten wykazywał najsilniejsze właściwości wygaszenia w stosunku do rodnika nadtlenkowego i wodorotlenowego. Działanie to wyjaśnia aktywacja grup hydroksylowych spowodowana równowagą między formami ketonowymi i enolowymi astaksantyny, która skutkuje powstawaniem sprzężonego systemu działającego w podobny sposób do  $\alpha$ -tokoferolu [12], jak również ochrania błony fosfolipidowe i inne lipidy przed utlenieniem [7, 10]. Astaksantyna ze względu na szeroką skuteczność w zakresie ochrony przed stresem oksydacyjnym i stanami zapalnymi wykazuje pozytywne rokowania na spowalnianie przebiegu procesów degeneracyjnych u ludzi [11].

W badaniach klinicznych wykazano obniżenie poziomu markerów ryzyka chorób układu serowo-naczyniowego, stresu oksydacyjnego i stanu zapalnego po zastosowaniu astaksantyny [7, 29]. Badania prowadzone na liniach komórkowych stymulowanych nadtlaniem wodoru wykazały, że 24-godzinna inkubacja komórek z astaksantyną prowadziła do wydzielania znacznie mniejszych ilości prozapalnych cytokin (IL-1 $\beta$ , IL-6, TNF- $\alpha$ ) w porównaniu do próby kontrolnej (bez astaksantyny). Podobna zależność wykazana została w przypadku czynnika NF $\kappa$ B [30]. W badaniach z wykorzystaniem zwierząt laboratoryjnych (szczurów, królików, psów) stwierdzono redukcję wystąpienia zawału serca, zakrzepicy oraz znaczące obniżenie poziomu ciśnienia tętniczego wraz ze zwiększeniem dawki astaksantyny [31].

W przypadku astaksantyny wykazano również działanie przeciwmiażdżycowe, ochronne przeciw nadciśnieniu, a także przeciwzapalne [32]. Badania kliniczne z udziałem ludzi przeprowadzone z doustnym podaniem dawek astaksantyny w zakresie od 4 do 100 mg/dzień wykazały m.in. znaczne obniżenie poziomu triacylogliceroli, a zwiększenie poziomu cholesterolu HDL [31]. Astaksantyna w badaniach nad otyłością u ludzi powodowała redukcję poziomów biomarkerów stresu oksydacyjnego (malonaldehydu, izoprostanów i dysmutazy ponadtlenkowej) [31].

Ponadto w Japonii przeprowadzono szczegółowe badania pod kątem korzyści zdrowotnych jakie wywołuje astaksantyna na narząd wzroku. Stwierdzono, że konsekwentne przyjmowanie astaksantyny (w ilości 6 mg/dzień) poprawia ostrość widzenia nawet u osób zdrowych [33, 34].

Wykazano również antybakteryjne właściwości astaksantyny w badaniach na myszach zainfekowanych bakteriami *Helicobacter pylori*. Prawdopodobnie mechanizm działania tego ksantofilu polega na utrudnieniu kolonizacji błony śluzowej przez ten gatunek bakterii, ze względu na właściwości antyoksydacyjne tego związku [23].

### Fukoksantyna w profilaktyce i leczeniu

Fukoksantyna jest także silnym antyoksydantem przez co ma wpływ na ochronę komórek przed uszkodzeniami oksydacyjnymi. W badaniach *in vitro* wykazano, że fukoksantyna wykazuje silne właściwości wygaszania rodników ROO $\cdot$ , HO $\cdot$ , HOCl. Właściwości te mogą wynikać z niezwyklej struktury (ryc. 2), czyli obecności wiązania C=C=C w cząsteczce [12].

Innymi udokumentowanymi korzyściami dla zdrowia człowieka wynikającymi ze spożycia fuko-

ksantyny jest korzystny wpływ na układ sercowo-naczyniowy, objawiający się obniżeniem poziomu cholesterolu i triacylogliceroli oraz korzystnym wpływem na poziom ciśnienia tętniczego jak również obniżeniem występowania stanów zapalnych i pozytywnym oddziaływaniem na wątrobę [7].

Niezwykle wartym podkreślenia jest fakt, że fukoksantyna wpływa na aktywność wielu enzymów odpowiedzialnych za metabolizm tłuszczu przez co może zwiększać termogenezę [7]. Fukoksantyna poprzez indukcję ekspresji proteiny 1 w mitochondriach białej tkanki tłuszczowej nasila produkcję energii na drodze  $\beta$ -oksydacji kwasów tłuszczowych zapobiegając w ten sposób przyrostowi tkanki tłuszczowej. Zostało to potwierdzone również w badaniach na modelach zwierzęcych, gdzie fukoksantyna prowadziła do ograniczonego odkładania tkanki tłuszczowej w jamie brzusznej. W ten sposób fukoksantyna ma pośredni wpływ na ograniczenie ryzyka zachorowań na choroby układu sercowo-naczyniowego, ponieważ zawartość brzusznej tkanki tłuszczowej jest skorelowana ze wzrostem tego ryzyka [10].

W innych pracach także potwierdzono wpływ fukoksantyny na obniżenie masy ciała, oporność insulinową i obniżenie poziomu glukozy we krwi [6]. Ponadto fukoksantyna może wpływać na regulację transportera glukozy oraz ekspresję mRNA miotubul L6, które w tkance mięśniowej odpowiedzialne są za transport glukozy [10].

### Wnioski

Z piśmiennictwa wynika, że charakterystyczne karotenoidy – pochodzące z organizmów ryb i skorupiaków – wykazują niezwykle obiecujące działanie na organizm człowieka. Do takich związków należą głównie astaksantyna i fukoksantyna. Karotenoidy te wykazują silne działanie antyoksydacyjne. W badaniach wykazano, że astaksantyna jest silniejszym przeciwutleniaczem niż zeaksantyna, luteina, tunaksantyna, kantaksantyna i  $\beta$ -karoten, i o wiele silniejszym niż  $\alpha$ -tokoferol. Astaksantyna wykazuje działanie przeciwzapalne oraz ochronne przed chorobami układu sercowo-naczyniowego. Fukoksantyna natomiast zwiększa oporność na insulinę i wpływa na obniżanie poziomu glukozy we krwi oraz obniżenie masy ciała. Dokładne poznanie właściwości i mechanizmów działania tych karotenoidów pochodzących z organizmów ryb i skorupiaków wymaga dalszych badań, które umożliwią ich zastosowanie w profilaktyce i terapii.

## Piśmiennictwo / References

- Kolanowski W. Bioavailability of omega-3 PUFA from foods enriched with Fish oil. *Pol J Food Nutr Sci* 2005, 14/55(4): 335-340.
- Kolanowski W. Długołańcuchowe wielonienasycone kwasy tłuszczowe omaga-3 – znaczenie zdrowotne w obniżaniu ryzyka chorób cywilizacyjnych. *Bromat Chem Toksykol* 2007, 3: 229-237.
- Coulter TP. *Food: The Chemistry of its Components*. Royal Soc Chem, London 2009.
- MacDougall DB. *Color in food: improving quality*. Woodhead Publ, UK 2002.
- Maoka T. Carotenoids in marine animals. *Mar Drugs* 2011, 9: 278-293.
- Miyashita K. Function of marine carotenoids. *Forum Nutr* 2009, 61: 136-146.
- D'Orazio N, Gammone MA, Gemello E, De Girolamo M, Cusenza S, Riccioni G. Marine Bioactives. Pharmacological properties and potential applications against inflammatory diseases. *Mar Drugs* 2012, 10: 812-833.
- Woźniak M. Zawartość karotenoidów w organizmie pstrąga tęczowego. UW-M, Olsztyn 2004.
- Vilchez C, Forján E, Cuaresma M, Bédmar F, Garbayo I, Vega JM. Marine carotenoids: biological functions and commercial applications. *Mar Drugs* 2011, 9: 319-333.
- Riccioni G, D'Orazio N, Franceschelli S, Speranza L. Marine carotenoids and cardiovascular risk markers. *Mar Drugs* 2011, 9: 1166-1175.
- Kidd P. Astaxanthin, cell membrane nutrient with diverse clinical benefits and anti-aging potential. *Altern Med Rev* 2011, 16(4): 355-364.
- Rodrigues E, Mariutti LRB, Mercadante AZ. Scavenging capacity of marine carotenoids against reactive oxygen and nitrogen species in a membrane-mimicking system. *Mar Drugs* 2012, 10: 1784-1798.
- Czczuga B, Czczuga-Semieniuk E, Kłyszajko B, Szumiec J. Carotenoid content in the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) cultured in Poland. *Acta Sci Pol Piscaria* 2005, 4(1-2): 25-32.
- Sikorski ZE. Wartość użytkowa morskich surowców żywnościowych. [w:] *Ryby i bezkręgowce morskie: pozyskiwanie, właściwości i przetwarzanie*. Sikorski ZE (red). WNT, Warszawa 2004: 57-110.
- Sikorski ZE. Interakcje składników żywności. [w:] *Chemia żywności: Odżywcze i zdrowotne właściwości składników żywności*. Sikorski ZE (red). WNT, Warszawa 2007: 204-220.
- Manjabhat SN, Narayan B, Subbanna MN. Carotenoids in *Solenocera indica* and *Aristeus alcocki*, deep-sea shrimp from Indian Waters. *J Aquat Food Prod Technol* 2006, 15(2): 1-12.
- Yanar Y, Celik M, Yanar M. Seasonal changes in total carotenoid contents of Wild Marine shrimps (*Penaeus semisulcatus* and *Metapenaeus monoceros*) inhabiting the eastern Mediterranean. *Food Chem* 2004, 88: 267-269.
- Liaaen-Jensen S. Marine carotenoids-Selected topics. *New J Chem* 1990, 14: 747-759.
- Matsuno T. Aquatic animal carotenoids. *Fisheries Sci* 2001, 67: 771-789.
- Woźniak M, Martyniak A, Kozłowski J, Wziątek B, Sobocki M. Carotenoid content in the body of whitefish (*Coregonus Lavaretus Lavaretus* (L.)) from lake Łebsko (Northern Poland). *Arch Pol Fisheries* 2005, 1: 31-38.
- Stachowiak B, Czarnecki Z. Drożdże *Phaffia Rhodozyma* jako potencjalne źródło naturalnej astaksantyny. *Żywn Nauk Technol Jakość* 2006, 2 (47): 17-28.
- Minguez-Mosquera MI, Hornero-Mendez D, Perez-Galvez A. Carotenoids and provitamin A in functional foods. [in:] *Methods of analysis for functional food and nutraceuticals*. Hurst JW (ed). CRC PRESS, London 2002: 277-337.
- Higuera-Ciajara I, Félix-Valenzuela L, Goyacolea FM. Astaxanthin: a review of its chemistry and applications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2006, 46: 185-196.
- Nagao A. Absorption and function of dietary carotenoids. *Forum Nutr* 2009, 61: 55-63.
- Miyashita K, Nishikawa S, Beppu F, Tsukui T, Abe M, Hosokawa M. The allenic carotenoid fucoxanthin, a novel marine nutraceutical from brown seaweeds. *J Sci Food Agric* 2011, 91(1): 1166-1174.
- Madhavi DL, Deshpande SS, Salunkhe DK. Food antioxidants: technological, toxicological and health perspective. Marcel Dekker, NY-Basel-Hong Kong 1996.
- Krzysik M, Biernat J, Grajeta H. Wpływ wybranych składników odżywczych pożywienia na funkcjonowanie układu odpornościowego. Immunomodulatoryjne działanie witamin i pierwiastków śladowych na organizm człowieka. *Adv Clin Exp Med* 2007, 16 (1): 123-127.
- Shimidzu N. Carotenoids as singlet oxygen quenchers in marine organisms. *Fisheries Sci* 1996, 62: 134-137.
- Riccioni G. Marine carotenoids and oxidative stress. *Mar Drugs* 2012, 10: 116-118.
- Speranza L, Pesce M, Patruno A, Franceschelli S, de Lutiis MA, Grilli A, Felaco M. Astaxanthin treatment reduced oxidative induced pro-inflammatory cytokines secretion in U937: SHP-1 as a novel biological target. *Mar Drugs* 2012, 10: 890-899.
- Fassett RG, Coombes JS. Astaxanthin in cardiovascular health and disease. *Molecules* 2012, 17: 2030-2048.
- Lordan S, Ross PR, Stanton C. Marine bioactives as functional food ingredients: potential to reduce the incidence of chronic diseases. *Mar Drugs* 2011, 9: 1056-1100.
- Yuan JP, Peng J, Yin K, Wang JH. Potential health-promoting effects of astaxanthin: a high-value carotenoid mostly from microalgae 2011, 55: 150-165.
- Kajita M, Tsukahara H, Kato M. The effects of a dietary supplement containing astaxanthin on the accommodation function of the eye in middle-aged and older people. *Med Consult New Remedies* 2009, 46: 89-93.