

Научная статья
УДК 577.115+577.118
DOI: 10.31857/S0869769824030034
EDN: ISRZHA

Бурая водоросль *Costaria costata* – перспективный источник питательных веществ и биологически активных соединений

Т.И. Имбс [✉], О.С. Маляренко, И.Ю. Бакунина, Н.М. Шевченко,
В.В. Суриц, С.П. Ермакова [✉]

Татьяна Игоревна Имбс

кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН,
Владивосток, Россия
tatyanaimbs@mail.ru

Олеся Сергеевна Маляренко

кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН,
Владивосток, Россия
malyarenko.os@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3262-0373>

Ирина Юрьевна Бакунина

доктор химических наук, ведущий научный сотрудник
Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН,
Владивосток, Россия
bakun@list.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4039-5927>

Наталья Михайловна Шевченко

кандидат химических наук, старший научный сотрудник
Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН,
Владивосток, Россия
natalyshe@piboc.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4780-835X>

Валерий Викторович Суриц

младший научный сотрудник
Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН, В
ладивосток, Россия
suritsw@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0002-6585-2506>

Светлана Павловна Ермакова
доктор химических наук, доцент, заведующая лабораторией
Тихоокеанский институт биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН,
Владивосток, Россия
swetlana_e@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5905-2046>

Аннотация. Бурые водоросли являются богатым источником основных питательных веществ, включая углеводы, белки, минералы, полиненасыщенные липиды, а также ряд других полезных для здоровья соединений, способных воздействовать на широкий спектр заболеваний. Представлен обзор химического состава бурой водоросли *Costaria costata*, биологической активности выделенных из нее полисахарида фукоидана и флоротаннина – соединений, характерных только для бурых водорослей, а также эффектов, связанных с их потреблением.

Ключевые слова: *Costaria costata*, бурые водоросли, фукоиданы, флоротаннины

Для цитирования: Имбс Т.И., Мальяренко О.С., Бакунина И.Ю., Шевченко Н.М., Суриц В.В., Ермакова С.П. Бурая водоросль *Costaria costata* – перспективный источник питательных веществ и биологически активных соединений // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 3. С. 57–68. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824030034>

Original article

Brown algae *Costaria costata* is a promising source of nutrients and biologically active compounds

T.I. Imbs, O.S. Malyarenko, I.Yu. Bakunina, N.M. Shevchenko,
V.V. Surits, S.P. Ermakova

Tatyana I. Imbs

Candidate of Sciences in Chemistry, Senior Researcher
G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
tatyanaimbs@mail.ru

Olesya S. Malyarenko

Candidate of Sciences in Chemistry, Senior Researcher
G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
malyarenko.os@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3262-0373>

Irina Yu. Bakunina

Doctor of Sciences in Chemistry, Leading Researcher
G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
bakun@list.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4039-5927>

Natalia M. Shevchenko

Candidate of Sciences in Chemistry, Senior Researcher
G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
natalyshe@piboc.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4780-835X>

Valery V. Suris

Junior Researcher

G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
suritsw@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0002-6585-2506>

Svetlana P. Ermakova

Doctor of Sciences in Chemistry, Associate Professor, Head of the Laboratory,

G.B. Elyakov Pacific Institute of Bioorganic Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia
swsetlana_e@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5905-2046>

Abstract. Brown algae are a rich source of essential nutrients, including carbohydrates, proteins, minerals, polyunsaturated lipids, as well as a number of other health-promoting compounds that can act on a wide range of diseases. An overview is presented of the chemical composition of the brown algae *Costaria costata*, the biological activity of the polysaccharide fucoidan and phlorotannin isolated from it – compounds characteristic only of brown algae, as well as the effects associated with their consumption.

Keywords: *Costaria costata*, brown alga, fucoidan, phlorotannin

For citation: Imbs T.I., Malyarenko O.S., Bakunina I.Yu., Shevchenko N.M., Surits V.V., Ermakova S.P. Brown algae *Costaria costata* is a promising source of nutrients and biologically active compounds. *Vestnik of the FEB RAS.* 2024;(3):57–68. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824030034>

Морские водоросли – доступный и возобновляемый источник питательных веществ, включая углеводы, белки, минералы, полиненасыщенные липиды, а также ряда низкомолекулярных биологически активных соединений, имеющих терапевтический потенциал. Благотворное влияние водорослей на здоровье человека отмечено давно. Известно, что у японцев самая высокая средняя продолжительность жизни в мире, это отчасти связано с регулярным употреблением в пищу водорослей. В последние годы заметно вырос интерес к морским водорослям как источнику полезных для здоровья человека веществ. В мировой продовольственной политике водоросли рассматриваются как растительная пища будущего, а их регулярное потребление среди населения постоянно растет [1].

Бурые водоросли (Phaeophyta) составляют основу растительности морей Дальнего Востока России и включают наибольшее количество промысловых и потенциально промысловых видов, важнейшими из которых являются ламинариевые.

Бурая водоросль *Costaria costata* [Turn.] Saund – представитель семейства ламинариевых. Значительные запасы этой водоросли находятся у материкового побережья Приморского края, побережья о-ва Сахалин, Камчатки, Японии, Кореи. Растет *C. costata* в нижней литорали и в сублиторали, в открытых и полузакрытых участках побережья [2].

В обзоре мы представляем бурую водоросль *C. costata* как перспективный источник питательных веществ и полезных для здоровья биологически активных соединений. Химический состав и биологическое действие отдельных веществ водоросли *C. costata*, собранной у материкового побережья Приморского края, изучали в лабораториях Тихоокеанского института биоорганической химии им. Г.Б. Елякова ДВО РАН (ТИБОХ ДВО РАН).

C. costata – однолетнее растение, имеющее короткий вегетационный период. Наиболее активно водоросль растет с января по апрель и достигает максимального размера в первой половине лета. В мае–июне начинает появляться спорозонная ткань. В июне–июле у берегов Приморья завершается созревание зооспор водоросли и происходит их рассеивание; к августу слоевища водоросли разрушаются [3]. Высокая скорость роста, ранние сроки созревания и, как следствие, доминирующее положение в сообществе водорослей делают этот вид удобным объектом для марикультуры и перспективным для промышленной переработки [4].

По своему химическому составу бурые водоросли значительно отличаются от водорослей других отделов и наземных растений. Они содержат уникальные по структуре и биологическому действию соединения, среди которых важное место занимают полисахариды: ламинараны (1→3;1→6-β-D-глюканы), альгинаты (сополимеры маннуроносовой и гулууроносовой кислот) и фукоиданы (сульфатированные полисахариды, содержащие α-L-фукозу), а также

полифенольные соединения флоротаннины – полимерные производные флороглюцина, которые встречаются только в бурых водорослях. Известно, что содержание и качественный состав полисахаридов и полифенолов подвержен межвидовым и сезонным вариациям.

Как и в других макроводорослях, в бурых водорослях углеводы являются преобладающим по количественным показателям компонентом, выполняя различные функции: структурную, резервную, слизиобразующую. Большая их часть состоит из пищевых волокон, т.е. растворимых полисахаридов, которые не перевариваются и не всасываются в желудочно-кишечном тракте человека [5]. Таким образом, бурые водоросли – богатый источник пищевых волокон, которые могут играть важную роль в улучшении здоровья желудочно-кишечного тракта человека, регулируя кишечный поток, стимулируя рост благоприятной микробиоты, предотвращая рак толстого кишечника. Также могут участвовать в регулировании уровня глюкозы и холестерина в сыворотке крови, тем самым снижая риск сердечно-сосудистых заболеваний [6].

Основными компонентами пищевых волокон в бурых водорослях выступают полисахариды: альгиновая кислота и ее соли, фукоиданы и ламинараны.

Альгинаты – преобладающие полисахариды в бурых водорослях (до 24–26 % сухих веществ – СВ). Они обнаружены в составе клеточных стенок, где играют структурную роль, обеспечивая гибкость водоросли.

По химической структуре альгиновые кислоты – это семейство неразветвленных бинарных сополимеров, состоящих из остатков β -D-маннуриновой (M) и α -L-гулуриновой (G) кислот, соединенных (1→4)-связями [7]. Остатки маннуриновой кислоты образуют связи, которые придают сегментам M-блока линейную и гибкую конформацию, тогда как гулуриновая кислота образует связи, которые обеспечивают жесткую структуру сегментов G-блока. При этом в G-блоках создаются пространственные условия для прочного связывания двухвалентных катионов металлов. Координация с такими катионами приводит к кооперативному связыванию друг с другом разных молекул полимера, образуя так называемую egg-box структуру, придавая гелеобразующие свойства альгинатам. Следовательно, длина G-блоков в этом полисахариде является определяющей для механических и функциональных свойств гелей [8].

В бурой водоросли *C. costata* альгинаты (ACc) также составляют основную часть полисахаридов (до 23 % СВ) [4]. Показано, что с апреля по июль содержание альгината увеличивалось с 15,6 до 20,6 % СВ. Сезон сбора водоросли существенно влиял на мономерный состав альгинатов. В апрельских сборах в альгинатах обнаружили преимущественно D-маннуриновую кислоту, а в июльских доля L-гулуриновой кислоты увеличивалась до 32 %. Соотношение M/G изменялось от 2,63 в апреле до 1,87 в июле [7], в августе из камчатской водоросли выделили альгинат с соотношением M/G равным 1,55 [9].

Содержание ламинарана, резервного полисахарида, в *C. costata* было незначительно: с мая по июль оно увеличилось в 3,5 раза, но не превышало 0,01 % СВ. Ламинаран имел структуру, типичную для представителей 1→3;1→6- β -D глюканов. Соотношение между 1→3- и 1→6-связанными остатками β -D-глюкопиранозы составило 5:1. Молекулярная масса ламинарана *C. costata* 4,4 кДа [7]. Кроме ламинарана функцию резервных углеводов водоросли выполняет маннит. В *C. costata* содержание маннита с мая по июль существенно не изменялось и составляло 14 % СВ [10, 4].

Фукоиданы – сульфатированные полисахариды бурых водорослей представляют собой структурно разнообразную группу, неизменно и часто главным компонентом молекул большинства из них служат остатки α -L-фукозы, этирифицированной серной кислотой.

В процессе вегетации *C. costata* содержание фукоидана в водоросли увеличивалось в 5 раз, одновременно происходили существенные изменения в моносахаридном составе и заряде полисахарида. Из майской водоросли был выделен низкосульфатированный фукоглюкурономаннан (ФГМ) гетерогенный по моносахаридному составу (фукоза – 23 %, манноза – 37 %, глюкуроновая кислота – 16 % от суммы моносахаридов). Из генеративных растений выделили галактофукан (ГФ), высокосульфатированный (23,8 % веса фракции) и частично ацетилованный. Фукоза и галактоза в соотношении 1,0:0,3 составили около 90 % суммы моносахаридов [11].

Структуры фукоиданов были определены масс-спектрометрическим анализом низкомолекулярных олигосахаридных фрагментов, полученных автогидролизом галактофукана

и среднекислотным гидролизом фукоглокурономаннана. Было показано, что ГФ построен в основном из сульфатированных в положениях C-2, иногда C-4 и частично ацетилированных (1→3)-связанных остатков L-фукозы, аналогичные фракции фукоидана характерны для отряда Laminariales [12–14]. Остатки галактозы были сульфатированы в основном в положении C-2 и C-6 и обнаружены в (1→3)-связанных, смешанных с фукозой ди- и трисахаридах, расположенных на обоих концах и даже находящихся внутри смешанных трисахаридов [15].

Фукоглокурономаннан имел гетерогенный моносахаридный состав и более низкое содержание сульфатов (15,4 %), как и ФГМ, выделенный из *Saccharina latissima* [13], α-L-фукоза была основным компонентом, но другие сахара – галактоза, манноза и глюконовая кислота – также количественно присутствовали в полисахариде. Остатки фукозы и галактозы были сульфатированы преимущественно по C-2, а иногда и по C-4. Устойчивая к кислотному гидролизу фракция содержала ядро, построенное из остатков глюконовой кислоты (GlcA), маннозы и/или (1→3)-связанных между собой остатков GlcA, как и фукоидан из *S. latissima* [13]. В гидролизате обнаружены короткие моносульфатированные, образованные через (1→3)- и/или (1→4)-связи фукоолигосахариды, иногда оканчивающиеся (1→3)-связанными остатками Gal и, вероятно, представляющие собой точки ветвления на C-4 GlcA в ядре, так как были обнаружены фрагменты Fuc-(1→4)-GlcA. Предположительно, фукоидан имел также дополнительные точки ветвления на C-4 ядра GlcA, образованные через (1→4)- или (1→6)-связи галактоолигосахаридами, которые гидролизировались в выбранных условиях. Анализ литературы показал, что биологические свойства фукоиданов обусловлены структурой их основной цепи, содержанием и расположением сульфатных и ацетатных групп [14].

Была исследована *in vitro* противоопухолевая активность выделенных полисахаридов на клетках рака толстого кишечника человека DLD-1 и HT-29. Показано, что альгинат АСс и фукоиданы ФГМ и ГФ в концентрациях до 800 мкг/мл не проявляли цитотоксического действия по отношению к клеткам DLD-1 и HT-29, а в концентрации 400 мкг/мл в разной степени ингибировали формирование и рост колоний исследуемых клеток. Фукоглокурономаннан ингибировал наиболее эффективно формирование колоний клеток DLD-1 (на 68 %) и HT-29 (на 93 %), ГФ – ингибировал на 66 % в обоих случаях, а АСс подавлял рост колоний клеток DLD-1 и HT-29 на 37 % и 22 % соответственно (наши неопубликованные данные). Галактофукан из *S. costata*, собранной у побережья Кореи, в аналогичном эксперименте на 55 % ингибировал формирование колонии клеток DLD-1, а на формирование колоний клеток меланомы человека SK-MEL-28 практически не оказывал влияния [16].

Изучено действие ГФ из *S. costata* на матриксную металлопротеиназу 1 (ММР-1) в клетках иммортализованных кератиноцитов человека (HaCaT). ГФ из *S. costata* ингибировал экспрессию мРНК ММР-1, индуцированную UVB в исследуемых клетках, на 37,3, 53,3 и 58,5 % при концентрациях 0,01, 0,1 и 1 мкг/мл соответственно по сравнению с контролем. Галактофукан *S. costata* может быть потенциальным терапевтическим средством для предотвращения и лечения фотостарения кожи [17].

Изучено действие полисахаридов из *S. costata* против вирусов иммунодефицита человека (ВИЧ-1) [18] и клещевого энцефалита (КЭ) [19] *in vitro*. Противовирусную ВИЧ-1 активность фукоиданов из различных бурых водорослей (*Saccharina cichorioides*, *S. costata*, *Fucus evanescens*, *Saccharina gurjanovae*, *Alaria ochotensis* и *Saccharina japonica*) исследовали с использованием двух модельных вирусных систем на основе лентивирусных векторов и вируса лейкоза мышей Молони (Mo-MuLV). Было показано, что исследуемые фукоиданы не оказывали цитотоксического действия на клетки Jurkat и SC-1 в диапазоне концентраций 0,001–100 мкг/мл. Фукоиданы с разной эффективностью подавляли трансдукцию клеточной линии Jurkat частицами псевдо-ВИЧ-1, несущими оболочечный белок ВИЧ-1, и инфицирование клеток SC-1 вирусом Mo-MuLV. Установлено, что ГФ из *S. costata* и все исследованные фукоиданы можно рассматривать как потенциальные анти-ВИЧ-агенты независимо от их структурных характеристик, поскольку фукоиданы проявляли активность в низких концентрациях (0,001–0,05 мкг/мл) [18].

Изучено действие фукоиданов из бурых водорослей *Laminaria japonica*, *Laminaria cichorioides*, *F. evanescens* и *S. costata* на культуре клеток почки эмбриона свиньи (СПЭВ), инфицированных вирусом клещевого энцефалита [19]. Установлено, что фукоиданы обладают вирулицидным действием в отношении высокопатогенного штамма вируса клещевого энце-

фалита, а также способностью подавлять адсорбцию и репликацию вируса на ранних стадиях развития инфекции *in vitro*. При предварительной обработке вируса галактофуканом из *S. costata* (100, 500, 1000 мкг/мл) препарат способствовал значительному снижению титра вируса, а при исследовании протективного действия ГФ в этих же концентрациях подавлял цитопатическое действие вируса КЭ. Предполагается, что противовирусная активность ГФ может быть обусловлена ингибированием адсорбции и последующей репликации вирусов в клетках за счет конкурентного лиганд-рецепторного взаимодействия с гликопротеином вируса, что препятствует слиянию клеточной и вирусной мембран и способствует созданию защиты клеток [19].

Другие биологически активные соединения, которые встречаются только в бурых водорослях, – флоротаннины. Мономерной единицей флоротаннинов является флороглюцин (1,3,5-тригидроксibenзол). При соединении остатков флороглюцина через связи С-С и/или С-О-С образуются полимерные молекулы флоротаннинов с разнообразными структурами. Основываясь на типе связи мономеров, флоротаннины можно разделить на четыре класса: фугалолы и флоретолы (эфирная связь), фуколы (фенильная связь), фукофлоретолы (эфирные и фенильные связи), а также эколы и кармалола (дибензодиоксиновая связь). Внутри каждого класса связывание мономеров между собой может происходить по различным положениям флороглюцинольного кольца, в результате образуются структурные изомеры в дополнение к конформационным [20]. В бурых водорослях содержание флоротаннинов достигает 15 % от сухих веществ [21]. Предполагается, что флоротаннины содержатся внутри клеточной вакуоли, называемой физодом [22]. Основная роль флоротаннинов заключается в защите водорослей от оксидативного стресса [23], от поедания морскими животными и пр. [24].

Как показано в ряде исследований, флоротаннины бурых водорослей и обогащенные флоротаннинами экстракты проявляют мощную антиоксидантную активность [25, 26]. Флоротаннины водорослей известны как ингибиторы гликозидгидролаз, в том числе α -амилаз и α -глюкозидаз, влияющих на развитие гипергликемии при диабете второго типа и ожирении [27], как ингибиторы фермента холинэстеразы, участвующего в клинической картине болезни Альцгеймера [28], фермента гиалуронидазы, участвующего в аллергических реакциях, метастазировании рака и воспалительных процессах [29].

Из *S. costata* выделили фракцию флоротаннинов со степенью полимеризации 12–25 мономеров, относящихся к классу флоретолов (СсPh) [30]. Флоретол ингибировал действие рекомбинантной фукоиданазы FFA2 из морской бактерии *Formosa algae* КММ 3553^Т, выполняя защитную функцию водорослей от поедания морскими травоядными или от микробного загрязнения.

Было исследовано противораковое и радиосенсибилизирующее действие высокомолекулярного флоретоло СсPh *in vitro* на клетках рака толстого кишечника человека НСТ 116 и НТ-29. Флоретол СсPh обладал цитотоксической активностью в отношении клеток НТ-29 ($IC_{50} = 92$ мкг/мл) и НСТ 116 ($IC_{50} = 94$ мкг/мл). СсPh в нетоксичных концентрациях (5 мкг/мл) ингибировал самопроизвольное образование колоний в исследуемых клетках и значительно повышал их чувствительность к низким нетоксичным дозам рентгеновского облучения (2 Гр). Показано, что флоретолы водорослей могут быть перспективными кандидатами в качестве радиосенсибилизаторов для улучшения схемы лучевой терапии [31].

Фракция флоретоло СсPh, выделенная из бурых водорослей *S. costata*, оказалась эффективным морским природным ингибитором иммуносупрессорной α -N-ацетилгалактозаминидазы (α -NaGalase), продуцируемой раковыми клетками аденокарциномы двенадцатиперстной кишки HuTu 80 и меланомы SK-MEL-28 человека. *In silico* было показано, что олигофлоретолы прочно связываются с активным центром лизосомальной α -NaGalase человека, причем концевые остатки олигофлоретолов входят в активный центр фермента и занимают каталитический центр между Asp 156 и Asp 217. Результаты этой работы высветили понимание одного из аспектов противораковой активности этой группы морских соединений. Таким образом, флоретол СсPh обладает высоким фармацевтическим и терапевтическим потенциалом [32].

Белковая фракция бурых водорослей, как правило, невелика – 4–14 % [4], только в отдельных видах, таких как *Undaria*, содержание белков достигает 24 % СВ [33]. Тем не менее содержание белков в бурых водорослях выше по сравнению с сырым горошком или фасолью (6,4 % и 7,4 % СВ соответственно), которые обычно считаются поставщиками

растительного белка с высоким его содержанием. В *S. costata* содержание белков составило 5–8 % СВ. В составе белков бурых водорослей содержится 17 аминокислот, из них 9 незаменимых [4]. Профиль аминокислот также является важным аспектом, поскольку каждая отдельная аминокислота может выполнять определенную роль в организме. Например, аспарагиновая кислота и глицин ответственны за формирование новых тканей и регуляцию нервной системы, лизин и изолейцин важны для иммунной системы, а фенилаланин – для функции щитовидной железы. Качественная особенность белков бурых водорослей состоит в том, что они содержат тирозин – предшественник моно- и дийодаминокислот, участвующих в синтезе фермента щитовидной железы тироксина [4]. Свободные аминокислоты (САК) составляют до 50 % от суммы аминокислот в бурых водорослях. В *S. costata* среди свободных аминокислот преобладали аланин, глутаминовая кислота и пролин (50, 14 и 14 % суммы САК соответственно) [10]. Высокое содержание глутаминовой кислоты очень важно для развития особого аромата и вкуса морских водорослей, поскольку эта аминокислота определяет вкусовые ощущения умами [34].

Общее содержание липидов в морских водорослях, как правило, невелико – до 6 % СВ, что в практическом смысле делает их вклад как источника пищевой энергии незначительным [35]. В водорослях это содержание имеет сезонную динамику: выше – зимой и весной, ниже – летом [36]. Основную часть жирных кислот (ЖК) составляют полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), которые являются незаменимыми жирными кислотами, имеющими первостепенное значение для метаболизма человека [37]. ПНЖК представляют особый интерес из-за их благоприятного воздействия на здоровье человека, особенно при рассмотрении ω 3-жирных кислот. Как известно, ω 3-жирные кислоты обладают противовоспалительной и антиоксидантной активностью, что может способствовать их благотворному воздействию на сердце, в то время как большинство ω 6-жирных кислот (предшественники арахидоновой кислоты и простагландина E2) имеют тенденцию способствовать воспалению [38]. Поэтому важно поддерживать соответствующий баланс между ω 6 и ω 3 в рационе, чтобы снизить риск развития ряда заболеваний и поддерживать здоровое состояние организма. По данным Симопулоса и др. [39], оптимальное соотношение ω 6/ ω 3 составляет 2–5:1, но в западной культуре питания из-за высокого потребления рафинированных масел, богатых ω 6, фактическое соотношение составляет 15–17:1.

В *S. costata* липиды составляли небольшую долю (10,9–13,4 % экстрактивных сырых веществ). Максимум в содержании липидов наблюдали в мае в период подготовки водоросли к спороношению. Полярные липиды (глицерогликолипиды и фосфолипиды) составляли основную часть липидов в это время, а нейтральные липиды были главными в июле. Весной при низкой температуре, низком уровне освещенности и в стадии активного роста водоросли в сумме ЖК преобладали ПНЖК, а в составе ПНЖК – относящиеся к ω 3-серии стеарионовая и эйкозопентаеновая кислоты. Арахидоновая и линолевая кислоты были главными жирными кислотами ω 6-серии. Отношение суммы ПНЖК ω 6/ ω 3 составило от 0,5:1 (в апреле) до 1,4:1 (в июле) [40].

Как и другие бурые водоросли, *S. costata* богата сочетанием макро- и микроэлементов, включая Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn и I. Натрий и калий являются основными элементами среди них. Их концентрации, например в экстракте майской водоросли, 0,052 и 0,077 мг/100 мл экстракта соответственно. Соотношение Na/K = 0,68 [10]. Потребление продуктов с высоким соотношением Na/K, типичных для современных «европейских» диет, как известно, связано с более высокой заболеваемостью гипертонией [41], и, следовательно, продукты с низким соотношением Na/K могут регулировать диетический дисбаланс Na/K. Эта характеристика является одним из основных преимуществ использования *S. costata* и других бурых водорослей в пищу. Бурые водоросли – природный источник йода. Йод в водорослях содержится в различных формах: органический йод в виде дийодаминокислот, минеральный – в виде йодатов и йодитов калия. Содержание этого микроэлемента в *S. costata* может варьировать от 0,1 до 0,6 % СВ, при этом максимальная концентрация обнаружена в зрелых водорослях [4]. По мнению Моро и Базиля [42], этот элемент является важным действующим веществом, поскольку он играет активную роль в выработке гормонов щитовидной железы, которые, в свою очередь, ответственны за активацию метаболизма в большинстве тканей и, как следствие, всего организма [43].

Заключение

Бурая водоросль *C. costata*, как и другие представители бурых водорослей, является источником питательных веществ с высокой пищевой ценностью и низкой калорийностью, поскольку содержание липидов в ней невелико, а углеводы представлены полисахаридами с низкой биодоступностью. Хотя содержание питательных веществ в *C. costata* зависит от сезонных и других изменений, она остается источником пищевых волокон, представленных фукоиданами и альгиновой кислотой, богатых минеральным составом, где Na и K содержатся в значительном количестве, но в нужной пропорции, что важно для регулирования дисбаланса Na/K в диетах. Кроме того, эта водоросль способна накапливать высокие концентрации йода, дефицит которого наблюдается во многих регионах нашей страны и который очень важен для нормальной функции щитовидной железы. Хотя бурые водоросли не так богаты белком по сравнению с красными или зелеными водорослями, уровень белка в них все же выше, чем у некоторых наземных растений, обычно считающихся поставщиками растительного белка, и они содержат все девять незаменимых аминокислот. Несмотря на низкое содержание липидов, в липидном профиле много ПНЖК с очень низким соотношением $\omega 6/\omega 3$, в отличие от того, что в настоящее время наблюдается в традиционных диетах. *C. costata* также является ценным источником биологически активных соединений, которые можно использовать для разработки природных агентов терапевтического применения. Среди них можно выделить фукоиданы и флоротаннины, которые в последние годы привлекли большое внимание из-за их терапевтического потенциала. Эти соединения показали хорошие антиоксидантные эффекты за счет удаления активных форм кислорода (АФК) или усиления внутриклеточной антиоксидантной защиты, а также противоопухолевые и противовирусные эффекты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cardoso S.M., Pereira O.R., Seca A.M.L. et al. Seaweeds as preventive agents for cardiovascular diseases: From nutrients to functional foods // *Mar. Drugs*. 2015. Vol.13. P. 6838–6865.
2. Белоус О.С., Титлянова Т.В., Титлянов Э.Я. Морские растения бухты Троицы и смежных акваторий (залив Петра Великого, Японское море). Владивосток: Дальнаука, 2013. 264 с.
3. Денисова А.В., Крупнова Т.Н. Перспективы культивирования костарии ребристой (*Costaria costata*) // Тезисы докладов четвертой международной научно-практической конференции «Морские прибрежные экосистемы. Водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки», 19–22 сентября 2011 года, г. Южно-Сахалинск. Южно-Сахалинск: СахНИРО, 2011. С. 176–177.
4. Суховеева М.В., Подкорытова А.В. Промысловые водоросли и травы морей Дальнего Востока: биология, распределение, запасы, технология переработки. Владивосток: ТИПРО-Центр, 2006. 244 с.
5. Dawczynski C., Schubert R., Jahreis G. Amino acids, fatty acids, and dietary fiber in edible seaweed products // *Food Chem*. 2007. Vol. 103. P. 891–899.
6. Patarra R.F., Paiva L., Neto A.I. et al. Nutritional value of selected macroalgae // *J. Appl. Phycol*. 2011. Vol. 23. P. 205–208.
7. Имбс Т.И., Шевченко Н.М., Суховерхов С.В. и др. Сезонные изменения состава и структурные характеристики полисахаридов бурой водоросли *Costaria costata* // *Химия природных соединений*. 2009. № 6. С. 661–665.
8. Deniaud-Bouët E., Kervarec N., Michel G. et al. Chemical and enzymatic fractionation of cell walls from Fucales: Insights into the structure of the extracellular matrix of brown algae // *Ann. Bot*. 2014. Vol. 114. P. 1203–1216.
9. Усов А.И., Кошелева Е.А., Яковлев А.П. Полисахаридный состав некоторых бурых водорослей Японского моря // *Биоорг. химия*. 1985. Т. 11, № 6. С. 830–836.
10. Имбс Т.И., Красовская Н.П., Ермакова С.П. и др. Сравнительное исследование химического состава и противоопухолевой активности водно-этанольных экстрактов бурых водорослей *Laminaria cichorioides*, *Costaria costata* и *Fucus evanescens* // *Биология моря*. 2009. Т. 35, № 2. С. 140–146.
11. Имбс Т.И. Полисахариды и низкомолекулярные метаболиты некоторых массовых видов бурых водорослей морей Дальнего Востока России. Способ комплексной переработки водорослей: дис. ... канд. хим. наук / ТИБОХ. Владивосток, 2010. 122 с.

12. Anastyuk S.D., Shevchenko N.M., Nazarenko E.L. et al. Structural analysis of a highly sulfated fucan from the brown alga *Laminaria cichorioides* by tandem MALDI and ESI mass spectrometry // Carbohydr. Res. 2010. Vol. 345, N15. P. 2206–2212.
13. Bilan M.I., Grachev A.A., Shashkov A.S., Kelly M. et al. Further studies on the composition and structure of a fucoidan preparation from the brown alga *Saccharina latissima* // Carbohydr. Res. 2010. Vol. 345, N14. P. 2038–2047.
14. Cumashi A., Ushakova N.A., Preobrazhenslaya N.E., D’Incecco A. et al. A comparative study of the anti-inflammatory, anticoagulant, antiangiogenic, and antiadhesive activities of nine different fucoidans from brown seaweeds // Glycobiology. 2007. Vol. 17. P. 541–552.
15. Anastyuk S.D., Imbs T.I., Shevchenko N.M. et al. ESIMS analysis of fucoidan preparations from *Costaria costata*, extracted from alga at different life-stages // Carbohydr. Polym. 2012. Vol. 90. P. 993–1002.
16. Ermakova S.P., Sokolova R.V., Kim S.-M. et al. Fucoidan from brown seaweeds *Sargassum hornery*, *Eclonia cava*, *Costaria costata* structural characteristics and anticancer activity // Appl. Biochem. Biotechnol. 2011. Vol. 164. P. 841–850.
17. Moon H.J., Park K.S., Ku M.J. et al. Effect of *Costaria costata* fucoidan on expression of matrix metalloproteinase-1 promoter, mRNA, and protein // J. Nat. Prod. 2009. Vol.72. P. 1731–1734.
18. Prokofjeva M.M., Imbs T.I., Shevchenko N.M. et al. Fucoidans as potential inhibitors of HIV-1 // Mar. Drugs. 2013. Vol. 11, N8. P. 3000–3014.
19. Макаренкова И.Д., Леонова Г.Н., Майстровская О.С. и др. Противовирусная активность сульфатированных полисахаридов из бурых водорослей при экспериментальном клещевом энцефалите: связь структуры и функции // Тихоокеан. мед. журн. 2012. Т. 1. С. 44–46.
20. Martínez J.H.I., Castañeda H.G.T. Preparation and chromatographic analysis of phlorotannins // J. Chromatogr. Sci. 2013. Vol. 51. P. 825–838.
21. Ragan M.A., Glombitza K.W. Phlorotannins, brown algal polyphenols // Prog. Phycol. Res. 1986. Vol. 4. P. 129–241.
22. Имбс Т.И., Звягинцева Т.Н. Флоротаннины – полифенольные метаболиты бурых водорослей // Биология моря. 2018. Т. 44, № 4. С. 217–227.
23. Tierney M.S., Soler-Vila A., Rai D.K. et al. UPLC-MS profiling of low molecular weight phlorotannin polymers in *Ascophyllum nodosum*, *Pelvetia canaliculata* and *Fucus spiralis* // Metabolomics. 2014. Vol. 10. P. 524–535.
24. Сильченко А.С., Имбс Т.И., Звягинцева Т.Н. и др. Метаболиты бурых водорослей – ингибиторы фукондан-гидролаз морских организмов // Химия природ. соединений 2017. № 2. С. 291–295.
25. Ferreres F., Lopes G., Gil-Izquierdo A. et al. Phlorotannin extracts from Fucales characterized by HPLC-DAD-ESI-MSn: approaches to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant properties // Mar. Drugs. 2012. Vol. 10. P. 2766–2781.
26. Tierney M.S., Smyth T.J., Rai D.K. et al. Enrichment of polyphenol contents and antioxidant activities of Irish brown macroalgae using food-friendly techniques based on polarity and molecular size // Food Chem. 2013. Vol. 139. P. 753–761.
27. Krentz A.J., Bailey C.J. Oral antidiabetic agents: current role in type 2 diabetes mellitus // Drugs. 2005. Vol. 65. P. 385–411.
28. Yoon N.Y., Lee S.-H., Yong-Li, Kim S.-K. Phlorotannins from *Ishige okamurae* and their acetyl and butyrylcholinesterase inhibitory effects // J. Funct. Foods. 2009. Vol. 1. P. 331–335.
29. Shibata T., Fujimoto K., Nagayama K. et al. Inhibitory activity of brown algal phlorotannins against hyaluronidase // Int. J. Food Sci. Technol. 2002. Vol. 37. P. 703–709.
30. Imbs T.I., Silchenko A.S., Fedoreev S.A. et al. Fucoidanase inhibitory activity of phlorotannins from brown algae // Algal Res. 2018. Vol. 32. P. 54–59.
31. Malyarenko O.S., Imbs T.I., Ermakova S.P. *In vitro* anticancer and radiosensitizing activities of phlorethols from the brown alga *Costaria costata* // Molecules. 2020. Vol. 25. P. 115–122. 3208.
32. Bakunina I., Imbs T., Likhatskaya G. et al. Effect of phlorotannins from brown algae *Costaria costata* on α -N-acetylgalactosaminidase produced by duodenal adenocarcinoma and melanoma cells // Mar. Drugs. 2023. Vol. 21, N33. P. 1–18.
33. Holdt S.L., Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation // J. Appl. Phycol. 2011. Vol. 23. P. 543–597.
34. Ninomiya K. Science of umami taste: Adaptation to gastronomic culture // Flavour. 2015. Vol. 4. P. 13.

35. Хотимченко С.В. Липиды морских водорослей-макрофитов и трав. Структура, распределение, анализ. Владивосток: Дальнаука, 2003. 234 с.
36. Nelson M.M., Phleger C.F., Nichols P.D. Seasonal lipid composition in macroalgae of the north-eastern Pacific Ocean // *Bot. Mar.* 2002. Vol. 45. P. 58–65.
37. Pereira H., Barreira L., Figueiredo F. et al. Polyunsaturated fatty acids of marine macroalgae: Potential for nutritional and pharmaceutical applications // *Mar. Drugs.* 2012. Vol. 10. P. 1920–1935.
38. Simopoulos A.P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids // *Biomed. Pharmacother.* 2002. Vol. 56. P. 365–379.
39. Simopoulos A. The importance of the omega-6 /omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases // *Exp. Biol. Med.* 2008. Vol. 233. P. 674–688.
40. Герасименко Н.И., Бусарова Н.Г., Моисеенко О.П. Сезонные изменения в содержании липидов, жирных кислот и пигментов бурой водоросли *Costaria costata* // *Физиол. растений.* 2010. Т. 57, № 2. С. 217–223.
41. Adrogué H.J., Madias N.E. The impact of sodium and potassium on hypertension risk // *Semin. Nephrol.* 2014. Vol. 34. P. 257–272.
42. Moro C.O., Basile G. Obesity and medicinal plants // *Fitoterapia.* 2000. Vol. 71. P. S73–S82.
43. Küpper F.C., Feiters M.C., Olofsson B. et al. Commemorating two centuries of iodine research: An interdisciplinary overview of current research // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011. Vol. 50. P. 11598–11620.

REFERENCES

1. Cardoso S.M., Pereira O.R., Seca A.M.L., Pinto D.C.G.A., Silva A.M.S. Seaweeds as preventive agents for cardiovascular diseases: From nutrients to functional foods. *Marine Drugs.* 2015;13:6838–6865.
2. Belous O.S., Titlyanova T.V., Titlyanov E. Ya. Morskije rasteniya bukhty Troitsy i smezhnykh akvatorii (zaliv Petra Velikogo, Yaponskoe more) = [Marine plants of Troitsy Bay and adjacent water areas (Peter the Great Bay, Sea of Japan)]. Vladivostok: Dal'nauka; 2013. 264 p. (In Russ.).
3. Denisova A.V., Krupnova T.N. Perspektivy kul'tivirovaniya kostarii rebristoi (*Costaria costata*) = [Prospects for cultivating *Costaria costata*]. Tezisy dokladov chetvertoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Morskije pribrezhnyye ehkosistemy. Vodorosli, bespozvonochnye i produkty ikh pererabotki», Yuzhno-Sakhalinsk, 19–22 sentyabrya 2011 = [Abstracts of reports of the fourth international scientific and practical conference *Marine coastal ecosystems. Algae, invertebrates and their products.* Yuzhno-Sakhalinsk, 2011, 19–22 september]. Yuzhno-Sakhalinsk; 2011. P. 176–177. (In Russ.).
4. Sukhoveeva M.V., Podkorytova A.V. Promyslovye vodorosli i travy morei Dal'nego Vostoka: biologiya, raspredelenie, zapasy, tekhnologiya pererabotki = [Commercial algae and grasses of the seas of the Far East: biology, distribution, reserves, processing technology]. Vladivostok: TINRO-Tsentr; 2006. 244 p. (In Russ.).
5. Dawczynski C., Schubert R., Jahreis G. Amino acids, fatty acids, and dietary fiber in edible seaweed products. *Food Chemistry.* 2007;103:891–899.
6. Patarra R.F., Paiva L., Neto A.I. et al. Nutritional value of selected macroalgae. *Journal of Applied Phycology.* 2011;23:205–208.
7. Imbs T.I., Shevchenko N.M., Sukhoverkhov S.V. et al. Seasonal variations of the composition and structural characteristics of polysaccharides from the brown alga *Costaria costata*. *Chemistry of Natural Compounds.* 2009;45(6):786–791.
8. Deniaud-Bouët E., Kervarec N., Michel G. et al. Chemical and enzymatic fractionation of cell walls from Fucales: Insights into the structure of the extracellular matrix of brown algae. *Annals of Botany.* 2014;114:1203–1216.
9. Usov A.I., Kosheleva E.A., Yakovlev A.P. Polysaccharide composition of several brown algae of the Japan Sea. *Bioorganicheskaya Khimiya.* 1985;11(6):830–836. (In Russ.).
10. Imbs T.I., Krasovskaya N.P., Ermakova S.P. et al. Comparative study of chemical composition and antitumor activity of aqueous-ethanol extracts of brown algae *Laminaria cichorioides*, *Costaria costata*, and *Fucus evanescens*. *Russian Journal of Marine Biology.* 2009;35(2):164–170.
11. Imbs T.I. Polisakharidy i nizkomolekulyarnye metabolity nekotorykh massovykh vidov burykh vodoroslei morei Dal'nego Vostoka Rossii. Sposob kompleksnoi pererabotki vodoroslei: dis. kand. khim. nauk (dissertatsiya kandidata khimicheskikh nauk) = [Polysaccharides and low-molecular metabolites

of some common species of brown algae in the seas of the Russian Far East. Method for complex processing of algae: dissertation of a Candidate of Chemical Sciences] / PIBOC. Vladivostok; 2010. 122 p. (In Russ.).

12. Anastyuk S.D., Shevchenko N.M., Nazarenko E.L. et al. Structural analysis of a highly sulfated fucan from the brown alga *Laminaria cichorioides* by tandem MALDI and ESI mass spectrometry. *Carbohydrate Research*. 2010;345(15):2206–2212.

13. Bilan M.I., Grachev A.A., Shashkov, A.S., Kelly M. et al. Further studies on the composition and structure of a fucoidan preparation from the brown alga *Saccharina latissima*. *Carbohydrate Research*. 2010;345(14):2038–2047.

14. Cumashi A., Ushakova N.A., Preobrazhenslaya N.E., D’Incecco A. et al. A comparative study of the anti-inflammatory, anticoagulant, antiangiogenic, and antiadhesive activities of nine different fucoidans from brown seaweeds. *Glycobiology*. 2007;17:541–552.

15. Anastyuk S.D., Imbs T.I., Shevchenko N.M. et al. ESIMS analysis of fucoidan preparations from *Costaria costata*, extracted from alga at different life-stages. *Carbohydrate Polymers*. 2012;90:993–1002.

16. Ermakova S.P., Sokolova R.V., Kim S.-M. et al. Fucoidan from brown seaweeds *Sargassum hornery*, *Eclonia cava*, *Costaria costata* structural characteristics and anticancer activity. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2011;164:841–850.

17. Moon H.J., Park K.S., Ku M.J. et al. Effect of *Costaria costata* fucoidan on expression of matrix metalloproteinase-1 promoter, mRNA, and protein. *Journal of Natural Products*. 2009;72:1731–1734.

18. Prokofjeva M.M., Imbs T.I., Shevchenko N.M. et al. Fucoidans as Potential Inhibitors of HIV-1. *Marine Drugs*. 2013;11(8):3000–3014.

19. Makarenkova I.D., Leonova G.N., Maystrovkaya O.S. et al. Antiviral effect of brown algae-derived sulphated polysaccharides in case of experimental tick-borne encephalitis: tying structure and function. *Pacific Medical Journal*. 2012;1:44–46. (In Russ.).

20. Martínez J.H.I., Castañeda H.G.T. Preparation and chromatographic analysis of phlorotannins. *Journal of Chromatographic Science*. 2013;51:825–838.

21. Ragan M.A., Glombitza K.W. Phlorotannins, brown algal polyphenols. *Progress in Phycological Research*. 1986;4:129–241.

22. Imbs T.I., Zvyagintseva T.N. Phlorotannins are polyphenolic metabolites of brown algae. *Russian Journal of Marine Biology*. 2018;44(4):217–227. (In Russ.).

23. Tierney M.S., Soler-Vila A., Rai D.K. et al. UPLC-MS profiling of low molecular weight phlorotannin polymers in *Ascophyllum nodosum*, *Pelvetia canaliculata* and *Fucus spiralis*. *Metabolomics*. 2014;10:524–535.

24. Silchenko A.S., Imbs T.I., Zvyagintseva T.N. et al. Brown alga metabolites – inhibitors of marine organism fucoidan hydrolases. *Chemistry of Natural Compounds*. 2017;53:345–350.

25. Ferreres F., Lopes G., Gil-Izquierdo A. et al. Phlorotannin extracts from *Fucales* characterized by HPLC-DAD-ESI-MSn: approaches to hyaluronidase inhibitory capacity and antioxidant properties. *Marine Drugs*. 2012;10:2766–2781.

26. Tierney M.S., Smyth T.J., Rai D.K. et al. Enrichment of polyphenol contents and antioxidant activities of Irish brown macroalgae using food-friendly techniques based on polarity and molecular size. *Food Chemistry*. 2013;139:753–761.

27. Krentz A.J., Bailey C.J. Oral antidiabetic agents: current role in type 2 diabetes mellitus. *Drugs*. 2005;65:385–411.

28. Yoon N.Y., Lee S.-H., Yong-Li, Kim S.-K. Phlorotannins from *Ishige okamurae* and their acetyl and butyrylcholinesterase inhibitory effects. *Journal of Functional Foods*. 2009;1:331–335.

29. Shibata T., Fujimoto K., Nagayama K. et al. Inhibitory activity of brown algal phlorotannins against hyaluronidase. *International Journal of Food Science and Technology*. 2002;37:703–709.

30. Imbs T.I., Silchenko A.S., Fedoreev S.A., et al. Fucoidanase inhibitory activity of phlorotannins from brown algae. *Algal Research*. 2018;32:54–59.

31. Malyarenko O.S., Imbs T.I., Ermakova S.P. *In vitro* anticancer and radiosensitizing activities of phlorethols from the brown alga *Costaria costata*. *Molecules*. 2020;25:115–122. 3208.

32. Bakunina I., Imbs T., Likhatskaya G. et al. Effect of phlorotannins from brown algae *Costaria costata* on α -N-acetylgalactosaminidase produced by duodenal adenocarcinoma and melanoma cells. *Marine Drugs*. 2023;21(33):1–18.

33. Holdt S.L., Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*. 2011;23:543–597.

34. Ninomiya K. Science of umami taste: Adaptation to gastronomic culture. *Flavour*. 2015;4:13.

35. Khotimchenko S.V. Lipidy morskikh vodoroslei-makrofitov i trav. Struktura, raspredelenie, analiz = [Lipids from macrophyte seaweeds and herbs. Structure, distribution, analysis]. Vladivostok: Dal'nauka; 2003. 234 p. (In Russ.).
36. Nelson M.M., Phleger C.F., Nichols P.D. Seasonal lipid composition in macroalgae of the north-eastern Pacific Ocean. *Botanica Marina*. 2002;45:58–65.
37. Pereira H., Barreira L., Figueiredo F. et al. Polyunsaturated fatty acids of marine macroalgae: Potential for nutritional and pharmaceutical applications. *Marine Drugs*. 2012;10:1920–1935.
38. Simopoulos A.P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine and Pharmacotherapy*. 2002;56:365–379.
39. Simopoulos A. The importance of the omega-6 /omega-3 fatty acid ratio in cardiovascular disease and other chronic diseases. *Experimental Biology and Medicine*. 2008;233:674–688.
40. Gerasimenko N.I., Busarova N.G., Moiseenko O.P. Seasonal changes in the content of lipids, fatty acids, and pigments in brown alga *Costaria costat*. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2010;57(2):217–223. (In Russ.).
41. Adrogué H.J., Madias N.E. The impact of sodium and potassium on hypertension risk. *Seminars in Nephrology*. 2014;34:257–272.
42. Moro C.O., Basile G. Obesity and medicinal plants. *Fitoterapia*. 2000;71:S73–S82.
43. Küpper F.C., Feiters M.C., Olofsson B., et al. Commemorating two centuries of iodine research: An interdisciplinary overview of current research. *Angewandte Chemie International Edition*. 2011;50:11598–11620.