

**MARINE MACROPHYTES.
SYSTEMATICS,
BIOCHEMISTRY
AND USAGE**

V. E. VASKOVSKY

A short information on marine macrophytes – red, brown, green algae and sea grasses – is given. Discussed topics are systematics, carbohydrate and lipid biochemistry, as well as macrophytes which may be used as sources of biological active substances.

Даны краткие сведения о морских макрофитах: красных, бурых, зеленых водорослях и морских травах. Рассмотрены вопросы их систематики, состава углеводов и липидов, а также приведены сведения об использовании макрофитов как перспективных источников биологически активных веществ.

**МОРСКИЕ МАКРОФИТЫ.
СИСТЕМАТИКА, БИОХИМИЯ,
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ**

В. Е. ВАСЬКОВСКИЙ

Дальневосточный государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Тот, кому хотя бы раз в жизни довелось побывать на берегу моря, не мог не обратить внимания на причудливые, разноцветные растения на скалах в зоне прибой или на заросли в бухтах. Все это многообразие форм растительности можно объединить общим названием “морские макрофиты”. В их состав входят водоросли и высшие, цветковые растения – морские травы. Термин “макрофиты” означает “крупные растения”, то есть видимые невооруженным глазом. К ним относятся морские растения размером от нескольких миллиметров до десятков метров.

Макрофиты являются важнейшими компонентами морских экосистем: продуцентами органического вещества, убежищем и местами нереста для рыб и размножения беспозвоночных. Несмотря на обширные знания об этих растениях и тысячелетний опыт их практического использования, мы находимся в начале пути исследования и понимания того, что они могут дать человечеству. Цель статьи – привлечь внимание к этой интересной и важной группе живых организмов.

СИСТЕМАТИКА МОРСКИХ МАКРОФИТОВ

В число морских макрофитов входят представители красных, бурых, зеленых водорослей и морские травы (рис. 1). Иногда к этой же категории относят еще один отдел водорослей – харовые [1], однако его виды обитают в основном в пресноводных водоемах. С систематикой водорослей и морских трав, а также обширной информацией об этих растениях можно ознакомиться по книге “Жизнь растений”. Третий том этого издания [1] на 80% посвящен водорослям, а сведения о морских травах приводятся в первой части тома 6 [2]. Согласно классификации, принятой в [2], которая в основном совпадает с используемой в настоящее время в мировой науке, морские травы входят в состав отдела высшие растения (Embryophyta), принадлежат к классу лилиоопсиды (Lilioopsida), или однодольные (Monocotyledones), порядку наядовые (Najadales). В составе Najadales есть три семейства с представителями морских трав, но все их виды, обитающие в наших водах, принадлежат к родам *Zostera* и *Phyllospadix* из семейства Zosteraceae (взморниковые). В



Рис. 1. Расщелина в скалах, поросшая водорослями (фото Т.А. Тереховой)

некоторых работах морские травы ошибочно относят к семейству рдестовых (Potamogetonaceae).

Значительно сложнее ситуация с систематикой водорослей. В [1] отдел красных водорослей (Rhodophyta) делят на два класса: Bangiophyceae и Florideophyceae. Два класса – Phaeozoosporophyceae и Cyclosporophyceae – выделяют в отделе бурых водорослей (Phaeophyta). Из пяти классов зеленых водорослей (Chlorophyta) макрофиты входят в два: Ulvotrichophyceae и Siphonophyceae. Этой системы в основном придерживаются все отечественные специалисты. Классификация водорослей, принятая за рубежом, заметно отличается. Красные водоросли чаще всего рассматривают как отдел Rhodophycota, включающий один класс Rhodophyceae и два подкласса: Bangiophycidae и Florideophycidae, а бурые водоросли определяют как монофилетический класс Phaeophyceae (без разделения на подклассы), входящий в отдел Chromophycota. Зеленые водоросли включают в монофилетический класс Chlorophycota. Отметим, что на основании некоторых биохимических критериев разделение отделов бурых и зеленых водорослей на классы, как это принято в отечественной систематике, кажется вполне обоснованным.

В мировой науке все чаще появляются новые системы классификации живых организмов, в значительной степени основанные на данных цитологии, молекулярной биологии, биохимии. Одна из последних и наиболее совершенная предложена О.Г. Кусакиным и А.Л. Дроздовым [3]. В ней красные водоросли получили ранг царства – Rhodobionta, включающего один отдел – Rhodophycota. Бурые водоросли являются отделом Fucophycota в царстве Chromobionta. Зеленые водоросли и морские травы входят в два разных подцарства одного общего царства Chlorobionta. Первые образуют отдел Chlorophycota (подцарство Thallobionta), вторые входят в отдел Magnoliophyta подцарства Embryobionta.

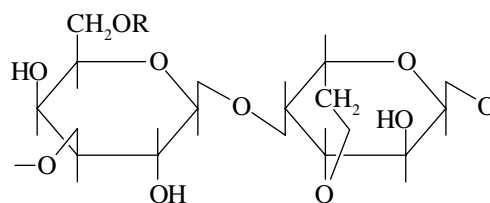
БИОХИМИЯ МОРСКИХ МАКРОФИТОВ

Информацию о всех химических компонентах морских макрофитов читатели могут получить в обширной литературе, посвященной морским растениям, из которой упомянем три книги [4–6]. Мы ограничимся кратким обзором только двух групп природных соединений: углеводов и липидов. Первые являются наиболее ценными компонентами многих морских макрофитов, вторые близки автору в связи с его научными интересами. Обе группы соединений, особенно липиды, являются хорошими хемотаксономическими маркерами. Это позволит вернуться к проблеме систематики морских макрофитов с позиций биохимии.

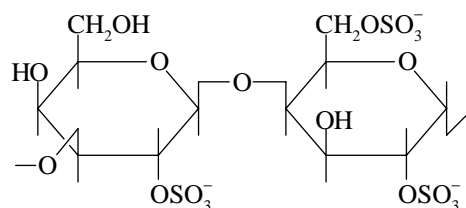
Углеводы морских макрофитов

В этом разделе даны только краткие биохимические сведения об углеводах морских растений. В следующем разделе приведены материалы о практическом использовании этих веществ и о полисахаридах морских макрофитов как биологически активных веществах. Для получения более детальной информации рекомендуем книгу [5].

Все морские макрофиты содержат целлюлозу. Состав многих других углеводов (важнейших компонентов макрофитов) тесно связан с их систематическим положением. В красных водорослях главными углеводами являются флоридный крахмал и сульфированные галактаны. Первый – разветвленный альфа-флаюкан, аналогичный по строению амилопектину. Сульфированные галактаны характерны только для красных водорослей и нигде больше в природе не найдены. Две главные группы этих полисахаридов: группа агара – агароза (1) и порфиран и группа каррагинана – шесть типов, обозначаемых буквами греческого алфавита, например λ -каррагинан (2).



1
Агароза



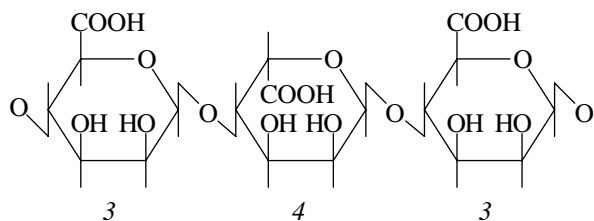
2
 λ -Каррагинан

Полисахариды первой группы содержат значительно меньше сульфатных групп, чем второй, агароза может вообще не содержать серы. Полисахарид из филлофоры, который обычно называют агароидом, и фуцелларан из фуцеллярии являются каппа-карагинанами.

Недавно группа ученых из Норвегии, США и России предложила новую номенклатуру для сульфированных полисахаридов Rhodophyta. Полисахариды, содержащие остатки только D-галактозы, стали называть карагинанами, а те, в которых есть и L-галактоза, — агаранами. Если один из остатков галактозы замещен в полисахаридах на остаток 3,6-ангидрогалактозы, то названия заменяются на “карагиноза” и “агароза” соответственно.

В красных водорослях встречаются и другие полисахариды — ксиланы, маннаны [5]. Недавно в водоросли *Liagora valida* обнаружен сульфированный ксиломаннан. В известковых водорослях найдена альгиновая кислота, которая до этого была обнаружена только в бурых водорослях и некоторых бактериях. Углеводы бурых водорослей более разнообразны и не менее интересны, чем красных. Начать следует с сахарного спирта — маннита. Его содержание может составлять более 25% сухого веса некоторых водорослей из порядков ламинариевых. Главными полисахаридами Phaeophyta являются ламинараны, альгиновые кислоты и фукоиданы.

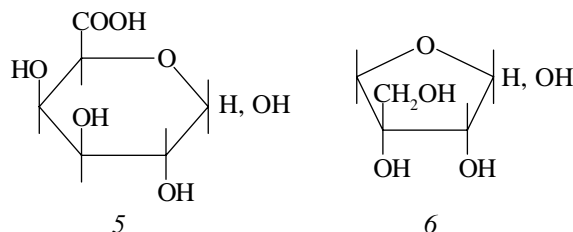
Ламинараны содержат 20–50 остатков глюкозы, в основном связанных 1–3-связями, а также 1–6-связями. В состав некоторых ламинаранов входит маннит. Альгиновые кислоты — это линейные полисахариды, содержащие остатки D-маннуровой (3) и L-гулуровой (4) кислот.



Свойства альгинатов зависят от соотношения мономеров в углеводной цепи и их взаимного расположения. Фукоиданы представляют собой высокосульфированные, обычно разветвленные полисахариды из L-фукозы с примесью галактозы, ксилозы, уроновых кислот, часто включающие белковый фрагмент. В зеленых водорослях найдены глюкоманнаны, маннаны, ксиланы, сульфированные полисахариды, пектины [5]. Однако среди этих веществ нет таких интересных и практически важных, как полисахариды красных и бурых водорослей.

Наиболее ценным и самым интересным углеводом морских трав является полисахарид зостерин. Это пектин, то есть полимер галактуроновой кислоты (5). Широко известны и практически важны пектины из яблок, кожуры лимонов, свеклы. Одна-

ко у зостерина есть две особенности: у него почти нет метильных групп, которые этерифицируют значительную часть карбоксилатов в пектинах наземных растений, в состав зостерина входит довольно редкий моносахарид апиоза (6).



Первая особенность приводит к тому, что зостерин связывает больше катионов, чем другие пектины, а вторая — к высокой устойчивости к действию ферментов — пектиназ и, следовательно, большей стабильности. Состав многих углеводов морских макрофитов тесно связан с их систематическим положением. По этому показателю зеленые водоросли ближе к морским травам, чем к красным и бурым водорослям. В некоторых случаях состав углеводов позволяет делать выводы, касающиеся систематики менее крупных таксонов. Недавно установили, что виды бурых водорослей из порядков Dictyotales и Fucales содержат одни и те же четыре кислых полисахарида: альгиновую кислоту, ксилофукан и два фукоидана.

Липиды морских макрофитов

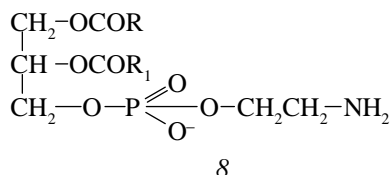
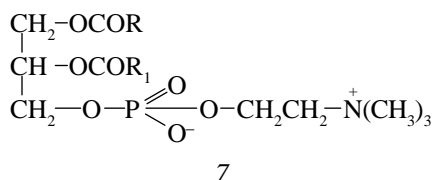
Все четыре группы морских макрофитов четко различаются по составу полиеновых жирных кислот (ПНЖК)¹. В красных главными кислотами являются C20 ПНЖК, чаще всего эйкозапентаеновая кислота ($20 : 5 \ n - 3$)², которая может составлять свыше 70% от суммы ЖК. В некоторых видах из рода *Gracilaria* может быть высоким уровень арахидоновой кислоты ($20 : 4 \ n - 6$) — более 50% от суммы ЖК. Для бурых водорослей характерен более низкий уровень C20 ПНЖК: содержание $20 : 5 \ n - 3$ редко превышает 20%, а $20 : 4 \ n - 6$ — 10–15%. В них довольно высоко содержание кислоты $18 : 4 \ n - 3$. Ее несколько меньше в зеленых водорослях. В последних также присутствуют C20 ПНЖК, но их суммарное содержание обычно не превышает 10%. Морские травы по составу ПНЖК не отличаются принципиально от цветковых наземных растений: главной является линоленовая кислота ($18 : 3 \ n - 3$). Еще лучшими хемотаксономическими маркерами

¹ Перед чтением этого раздела полезно ознакомиться со статьей автора в “Соросовском Образовательном Журнале”, посвященной липидам [7].

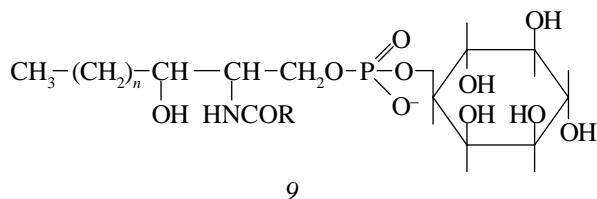
² Первая цифра указывает на общее число углеродных атомов в молекуле жирной кислоты, вторая — число двойных связей. Цифра после n говорит о принадлежности к семейству линоленовой ($n - 3$) или линолевой кислоты ($n - 6$) жирных кислот (подробнее см. в [7]).

оказались полярные липиды макрофитов, они позволяют различить друг от друга не только отделы, но и классы бурых и зеленых водорослей.

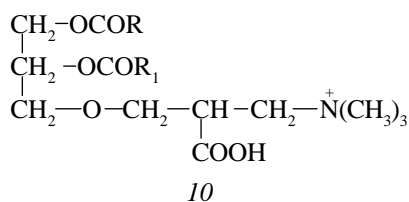
Красные водоросли отличаются от всех других групп растений самым высоким относительным содержанием фосфатидилхолина (ФХ) (7) — часто более 70% от суммы фосфолипидов и очень низким (до следов) количеством фосфатидилэтаноламина (ФЭ) (8).



Из водорослей только красные содержат керамид-фосфоинозит (9), который встречается также в низших грибах.



Два класса бурых водорослей четко разнятся между собой по составу полярных липидов. В Phaeosporophyceae главным фосфолипидом (свыше 40%) является ФХ. А в представителях Syclosporophyceae этот липид отсутствует, вместо него одним из главных полярных липидов оказался недавно идентифицированный диацилглицеринтриметил-β-аланин (ДГТА) (10)

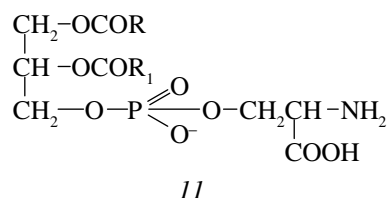


Присутствие его строго доказано только для бурых водорослей, хотя, вероятно, ДГТА есть и в водорослях из других отделов Chromobionta.

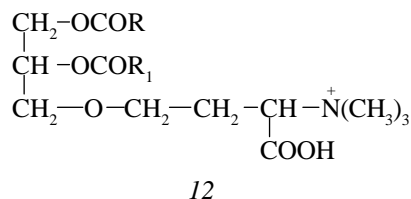
При исследовании состава полярных липидов водорослей из порядка Dictyotales мы нашли, что они близки по этим показателям водорослям из класса Syclosporophyceae (порядок Fucales), а не Phaeosporophyceae, в который включают Dictyotales большинство ботаников. Однако известный рос-

сийский альголог Л.П. Перестенко на основании некоторых морфологических и эмбриологических характеристик относит Dictyotales к Syclosporophyceae.

В зеленых водорослях присутствует фосфатидилсерин (ФС) (11), который является обычным компонентом высших растений, но отсутствует во всех других группах макро- и микроводорослей.



Особенностью этого отдела водорослей является присутствие диацилглицеринтриметилгомосерина (ДГТС) (12). Два класса зеленых водорослей (Chlorophyceae и Siphonophyceae) различаются тем, что в первых ФХ отсутствует или присутствует только в следах, а во вторых он является одним из главных фосфолипидов. Морские травы не отличаются по составу полярных липидов от других цветковых растений: в них есть ФС (11), нет ДГТА (10) или ДГТС (12)



Рассказ о липидах морских водорослей будет неполным, если коротко не упомянуть об их оксипинах. Это продукты превращения некоторых ПНЖК, аналогичные эйкозаноидам животных. Их исследует американский ученый В.Х. Гервик, который вместе со шведскими учеными предложил название “оксипины” для этой группы липидов. Он показал, что водоросли из трех отделов различаются по способности синтезировать оксипины. В красных идет метаболизм С20 ПНЖК, в зеленых субстратом являются С18 ПНЖК, бурые способны превращать в оксипины как С18, так и С20 ПНЖК. При этом есть заметные различия между водорослями и в наборе ферментов — липоксигеназ, которые превращают жирные кислоты в оксипины.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОРСКИХ МАКРОФИТОВ

Этот раздел, вероятно, наиболее интересен для читателей, но размеры статьи позволяют дать только краткие сведения общего характера и привести отдельные примеры из последних научных работ в рассматриваемой области. Обширную информацию об использовании морских макрофитов можно получить из книг [1, 4–6, 8–11]. Помимо первого

издания монографии В. Чэпмена, переведенной на русский [6], вышли еще два. Третье издание, вышедшее на английском языке в 1980 году, написано В. Чэпменом вместе с сыном (ныне крупным альгологом Д. Чэпменом).

Ресурсы морских макрофитов

Морские макрофиты — не самая главная группа биологических ресурсов моря [8], но количество этого сырья огромно и используется далеко не полностью. Заготавливают его около 4 млн т (4% всех морских биологических объектов), а по данным FAO (Международной продовольственной организации), имеющиеся запасы позволяют добывать в год до 2,6 млн т красных водорослей и более 14,5 млн т бурых.

Перспективно искусственное выращивание водорослей (марикультура). Уже сегодня они составляют более четверти всех продуктов этой отрасли. В России на плантациях собирают с гектара 500–600 ц свежей ламинарии в тех местах, где в природе заготавливают до 300 ц/га. Впечатляют результаты, получаемые в США: урожай гигантских бурых водорослей рода *Mastocystis* составляет более 1000 ц сухой массы на 1 га.

Главные направления использования морских макрофитов

До сих пор больше всего водорослей идет в пищу. Макрофиты используют также на корм скоту, как удобрения, для получения полисахаридов и некоторых других химических веществ, а также в медицине. Так, 37 родов наиболее важных водорослей Японии применяют для таких целей: 20 используют в пищу, шесть — для производства агара, по три — для выпуска строительных материалов, в сельском хозяйстве, для производства иода и хлористого калия, по два — для производства альгинатов и в текстильном производстве.

В отдельных морских водорослях содержится более 60% белка (на сухой вес), хотя он не всегда легко усваивается. Водоросли могут полностью обеспечить потребность человека в витаминах А, В₂, В₁₂. В Исландии, Финляндии, Норвегии, Шотландии, Франции и других странах водоросли в свежем или консервированном виде добавляют в корм для скота, птицы и пушных зверей. При этом усиливается воспроизводство животных, усиливается окраска желтка яиц и повышается содержание иода в них, увеличивается жирность молока. Как удобрения водоросли, которые особо богаты калием и микроэлементами, широко применяют в разных странах всех континентов. В этих удобрениях нет семян сорняков и спор фитопатогенов. Они ускоряют прорастание семян, повышают устойчивость растений к холоду, поражению грибами и насекомыми, что ведет к заметной прибавке урожая.

В последние годы появляется все больше работ, посвященных изучению действия веществ из водорослей на растения. Так, препарат, полученный из бурой водоросли *Ecklonia maxima*, стимулировал образование корней у некоторых видов растений, ускорял рост и созревание томатов, снижал их заражение нематодами. Опубликован обзор, указывающий на перспективность использования водорослей как источника антибактериальных и антигрибковых препаратов для растений. В Тихоокеанском институте биоорганической химии (Владивосток) получены препараты на основе ламинарана, трансформированного с помощью ферментов, которые повышают устойчивость растений к действию фитопатогенных грибов и вирусов.

Практическое использование углеводов морских макрофитов

Углеводы морских макрофитов — вещества с ценными свойствами. Маннит используют как заменитель сахара при диабете, а также для получения полимеров. Но наиболее широко применяют полисахариды, в первую очередь агар, каррагинаны и альгинаты. Агар производят в Японии уже с XVII века. Промышленное производство альгината начала в 1929 года американская фирма “Келко”. Первые партии каррагинана произвели в 40-х годах сразу несколько компаний, хотя издавна в Европе использовали сырой продукт — отвар *Chondrus crispus*. Мировое производство агара составляет около 7 тыс. т в год. Он используется в микробиологии, пищевой промышленности, и около 1% идет для получения агарозы. Каррагинанов получают около 13 тыс. т в год и почти полностью используют в пищевой промышленности, в первую очередь в молочной и кондитерской. В последние годы интерес к этим полисахаридам растет, расширяется область их применения. В мире ежегодно производят около 20 тыс. т альгинатов. 50% их идет в текстильное производство, 30% — в пищевую промышленность, 6% — для производства бумаги, по 5% — в фармацевтическую промышленность и для изготовления электродов. Зостерин, как и другие пектины, обладает желеобразующими свойствами. Поэтому он может быть использован в кондитерской промышленности. Однако гораздо важнее его медицинское применение.

Практическая значимость липидов морских макрофитов

Красные и бурые водоросли-макрофиты и морские травы бедны липидами. В большинстве из них содержание этих соединений варьирует в пределах от долей процента до 3% на сухой вес. Несколько богаче липидами зеленые водоросли. Тем не менее в книге “Новые источники жиров и масел”, опубликованной в 1981 году, есть глава “Водоросли как источники съедобных липидов”, написанная крупнейшим специалистом в области жиров морских

организмов Р.Г. Акманом. Вывод автора о перспективности нового сырья для получения липидов основан на высоких урожаях водорослей при марикультуре и содержании в них ценных полиеновых жирных кислот.

Однако в настоящее время в отличие от микроводорослей морские макрофиты промышленным сырьем для получения липидов в больших количествах не являются и вряд ли станут в ближайшие годы. Но для получения небольших количеств чистых липидов для научных целей макрофиты вполне пригодны. В нашей лаборатории разработана схема получения эйкозапентаеновой кислоты из красной водоросли *Palmaria stenogona*, которая содержит более 70% этой кислоты от суммы ЖК. Арахидоновую кислоту можно выделять из некоторых видов красных водорослей рода *Gracilaria*, где ее содержание составляет более 50% от суммы ЖК. Бурые и зеленые водоросли можно использовать для выделения ДГТА и ДГТС соответственно.

Медицинское использование морских макрофитов

Медицинское применение морских макрофитов до сих пор не очень широко. Главным объектом отечественной официальной фармакологии является сушеная морская капуста – различные виды *Laminaria* (рис. 2). В Японии красную водоросль *Digenia simplex* широко используют в качестве антигельминтного средства. Выявлены действующие начала этой водоросли, их получают теперь как фармакологические препараты. В США некоторые водоросли продают в магазинах как источник витаминов и



Рис. 2. Промысловая водоросль *Laminaria japonica* (подводная фотография А.А. Омеляненко)

мягкое слабительное. Однако морские макрофиты представляют потенциальный источник многочисленных лекарственных веществ самого разнообразного применения.

В последние годы все большее внимание исследователей привлекает биологическая активность полисахаридов морских макрофитов. Считают, что они перспективны как антикоагулянты крови. Полисахарид из красной водоросли *Gloiopeltis tenax* заметно ингибировал развитие нескольких видов рака у мышей, а также показал иммуностимулирующую активность в нескольких тестах. Антираковую, антивирусную, антибактериальную и иммуностимулирующую активность проявляют препараты фукоиданов. Недавно из зеленой водоросли *Ulva lactuca* был выделен гетерополисахарид, который проявил антивирусную активность.

Разносторонняя и высокая биологическая активность обнаружена у препаратов зостерина. Оказалось, что его защитное действие против соединений тяжелых металлов выше, чем у обычных пектинов. Зостерин дает хороший эффект при желудочных заболеваниях, стимулирует иммунные реакции, активен против некоторых форм лейкоза.

Морские макрофиты, в первую очередь водоросли, богаты также вторичными метаболитами, с которыми медицина связывает большие надежды. Примерно из 6500 новых соединений, выделенных из различных морских организмов, почти 2100 дали водоросли. Из них более 1000 получили из представителей всего трех семейств красных и бурых водорослей: более 560 – из *Rhodomelaceae*, свыше 310 – из *Dictiotaceae* и более 130 – из *Cystoseiraceae*. Обнаружена антигрибковая, антимитотическая, цитотоксическая, антивирусная и антибактериальная активности этих веществ. При испытании экстрактов из различных водорослей на антибактериальную активность против штаммов, устойчивых к действию известных антибиотиков, наиболее активными оказались препараты из красных водорослей. Недавно из красной водоросли *Portieria hornemannii* был выделен монотерпен, содержащий в молекуле два атома брома и три атома хлора, который проявил высокую активность против раковых клеток, поражающих мозг, почки и толстый кишечник. Этот препарат под названием “холомон” проходит предклинические испытания в США как антираковый.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После краткого знакомства с морскими макрофитами читатели согласятся с тем, что это интересная группа живых организмов, достойная более пристального изучения, в результате которого человечество сможет увеличить ресурсы пищевых продуктов, получить новые ценные лекарственные и другие препараты. В то же время не следует выделять эти растения из всей системы живых объектов.

Главный вывод – в природе нет групп организмов, не представляющих научного и практического интереса. Например, микроводоросли являются основным продуцентом органического вещества в Мировом океане, основой многих океанических пищевых цепей; морские беспозвоночные – важное пищевое сырье, корм для многих видов рыб. И те и другие – источник разнообразных биологически активных веществ.

Автор благодарит Т.А. Терехову за помощь в оформлении рукописи и А.А. Омеляненко за фотografiю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жизнь растений. М.: Просвещение, 1977. Т. 3 / Под ред. А.А. Федорова.
2. Жизнь растений. М.: Просвещение, 1982. Т. 6 / Под ред. А.Л. Тахтаджана.
3. Кусакин О.Г., Дроздов А.Л. Филема органического мира. СПб.: Наука, 1994. Ч. 1: Прологомены к построению филемы.
4. Барашков Г.Е. Химия водорослей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
5. Усов А.И., Чижев О.С. Химические исследования водорослей. М.: Наука, 1988.
6. Чэпмен В. Морские водоросли и их использование. М.; Л.: Изд-во иностр. лит., 1953.
7. Васьковский В.Е. Липиды // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 3. С. 32–37.
8. Моисеев П.А. Биологические ресурсы Мирового океана. М.: Агропромиздат, 1989.
9. Кизеветтер И.В., Суховеева М.В., Шмелькова Л.П. Промысловые морские водоросли и травы дальневосточных морей. М.: Пищ. пром-сть, 1981.
10. Уитон Ф.У., Лосон Т.Б. Производство продуктов питания из океанических ресурсов. М.: Агропромиздат, 1989. Т. 1–2.
11. Зайцев В.П., Ажгихин И.С., Гандель В.Г. Комплексное использование морских организмов. М.: Пищ. пром-сть, 1980.

* * *

Виктор Евгеньевич Васьковский, доктор биологических наук, профессор, зав. отделом Тихоокеанского института биоорганической химии Дальневосточного отделения Российской академии наук. Область научных интересов: липидология, сравнительная биохимия морских организмов и наземных растений. Автор более 90 научных статей и изобретений.