

Научная статья
УДК 661.123
EDN: PXLPLW
DOI: 10.21285/achb.922



Антиоксидантные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей

О.В. Табакаева*, А.В. Табакаев***, В.Е. Силантьев*, С.В. Капуста*

*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

**Научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии им. Г.П. Сомова

Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. Морские водоросли являются уникальным сырьем, которое способно в достаточно короткие сроки формировать значительную биомассу, осуществлять синтез разнообразных химических соединений, в том числе и специфических биологически активных веществ, проявляющих различную биологическую активность. Изучение антиоксидантных, антибактериальных, противовирусных, противовоспалительных и других свойств биологически активных веществ бурых водорослей является актуальной задачей. Целью представленного исследования являлась оценка антиоксидантных свойств сверхкритических экстрактов бурых водорослей *Saccharina japonica* и *Ascophyllum nodosum*. Содержание каротиноидов, фенольных соединений, маннита определяли спектрофотометрическим методом. Исследование содержания металлов осуществляли с применением метода атомно-абсорбционной спектроскопии. Антиоксидантную активность оценивали по антирадикальной активности с использованием радикала 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила, гидроксил-ион связывающей и Fe^{+2} хелатирующей активностям, а также по активности поглощения супероксидных радикалов. В исследованных сверхкритических экстрактах бурых водорослей определено достаточно высокое содержание жирных кислот и фенольных соединений, причем жирные кислоты максимально представлены в сверхкритическом экстракте *Ascophyllum nodosum*, а фенолы, маннит и пигменты – в экстракте *Saccharina japonica*. Преобладающим макроэлементом в сверхкритических экстрактах бурых водорослей является калий с максимумом содержания в экстракте *Saccharina japonica*. Сверхкритические экстракты бурых водорослей являются безопасными по содержанию нитрозаминов, полихлорированных бифенилов, токсичных элементов и радионуклидов. Наиболее выраженные антирадикальные свойства продемонстрировал сверхкритический экстракт *Saccharina japonica*. Самая высокая гидроксил-ион связывающая активность отмечена для сверхкритического экстракта *Saccharina japonica*. В отношении активности поглощения супероксидных радикалов закономерности были иными: максимальную активность продемонстрировал экстракт *Ascophyllum nodosum*. Fe^{+2} хелатирующая активность для сверхкритических экстрактов бурых водорослей была примерно одинаковой, максимальная (38,7%) зафиксирована для экстракта *Ascophyllum nodosum*.

Ключевые слова: сверхкритические экстракты, бурые водоросли, антиоксидантные свойства, антирадикальная активность

Финансирование. Исследования объекта *Ascophyllum nodosum* выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-26-00197). Исследования объекта *Saccharina japonica* выполнены при поддержке проекта «Науки о жизни: Биомедицина» программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», инициативная тематика № 23-01-3.04.-0010 «Биофармацевтические технологии для персонализированной медицины и здоровьесбережения».

Для цитирования: Табакаева О.В., Табакаев А.В., Силантьев В.Е., Капуста С.В. Антиоксидантные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 2. С. 253–264. DOI: 10.21285/achb.922. EDN: PXLPLW.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Antioxidant properties of supercritical extracts of brown algae

Oksana V. Tabakaeva*✉, Anton V. Tabakaev*.,
Vladimir E. Silant'ev*, Svetlana V. Kapusta*

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

**Research Institute of Epidemiology and Microbiology named after G.P. Somov

Federal Service for Supervision in the Field of Protection of Consumer Rights

and Human Well-Being, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Macroalgae is a unique feedstock capable of producing significant biomass in a fairly short time and synthesizing various chemical compounds, including specific biologically active substances that exhibit different biological activity. The study of antioxidant, antibacterial, antiviral, anti-inflammatory, and other properties of the biologically active substances of brown algae constitutes a relevant problem. The present study aims to evaluate the antioxidant properties of supercritical extracts of the brown algae *Saccharina japonica* and *Ascophyllum nodosum*. The content of carotenoids, phenolic compounds, and mannitol was determined using a spectrophotometric method. The metal content was analyzed using atomic absorption spectrometry. The antioxidant activity was evaluated according to antiradical activity using a 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical, hydroxyl ion binding activity, and Fe^{+2} chelating activity, as well as the superoxide radical scavenging activity. The studies on the supercritical extracts of brown algae revealed a rather high content of fatty acids and phenolic compounds, with fatty acids most abundantly present in the supercritical extract of *Ascophyllum nodosum*; phenols, mannitol, and pigments, in the extract of *Saccharina japonica*. The predominant macroelement in the supercritical extracts of brown algae is potassium, with the maximum content found in the extract of *Saccharina japonica*. The supercritical extracts of brown algae are safe in terms of the contents of nitrosamines, polychlorinated biphenyls, toxic elements, and radionuclides. The most pronounced antiradical properties were shown by the supercritical extract of *Saccharina japonica*. The highest hydroxyl ion binding activity was noted in the supercritical extract of *Saccharina japonica*. In terms of superoxide radical scavenging activity, the maximum activity was exhibited by the extract of *Ascophyllum nodosum*. The Fe^{+2} chelating activity was about the same for the supercritical extracts of brown algae, with the maximum activity (38.7%) observed for the extract of *Ascophyllum nodosum*.

Keywords: supercritical extracts, brown algae, antioxidant properties, antiradical activity

Funding. Studies of the *Ascophyllum nodosum* object were carried out with the support of the RGNF (project no. 23-26-00197). The research of the *Saccharina japonica* object was carried out with the support of the "Life Sciences project: Biomedicine" Strategic Academic Leadership program "Priority 2030", initiative topic no. 23-01-3.04.-0010 "Biopharmaceutical technologies for personalized medicine and health care".

For citation: Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V., Silant'ev V.E., Kapusta S.V. Antioxidant properties of supercritical extracts of brown algae. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):253-264. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.922. EDN: PXLPLW.

ВВЕДЕНИЕ

Практическое использование человеком водорослей-макрофитов, в том числе и бурых, известно достаточно давно: они долгое время традиционно используются в качестве пищевого сырья в таких странах Восточной Азии, как Китай, Корея и Япония. Морские водоросли известны в качестве специфического и в то же время уникального сырья за счет их способности быстро наращивать достаточную биомассу, синтезировать различные сложные химические соединения, в частности биологически активные вещества, помогающие выживанию в морской среде. В Российской Федерации основное значение для промысла и промышленной переработки с целью последующего применения в пищевой, фармацевтической, косметологической

отраслях имеют бурые водоросли. Бурые водоросли богаты углеводами, белками, полиненасыщенными жирными кислотами, минералами и витаминами и практически не содержат жира¹. Богатый компонентный состав обеспечивает их востребованность в пищевой промышленности, в том числе в качестве сырья для получения компонентов здорового питания [1–3]. Данный факт позволяет считать водоросли ценным стратегическим ресурсом с высокой коммерческой ценностью. В связи с этим трудно переоценить значение научных исследований в области изучения бурых водорослей, их состава и перспектив использования в пищевых производствах.

Биологически активные вещества морских бурых водорослей характеризуются свойствами различной

¹Ferdouse F., Holdt S.L., Smith R., Murúa P., Yang Z. The global status of seaweed production, trade and utilization // Globefish Research Programme. Vol. 124. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018. 124 p.

направленности: антиоксидантными [4], антибактериальными, противовоспалительными и антиканцерогенными [5–7]. В результате многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых доказано, что антиоксидантные свойства биологически активных веществ бурых водорослей обеспечиваются наличием достаточно разных соединений: полифенолов (в частности флоротанинов [8–10], ксантофилов (фукоксантина и его производных) [8, 11, 12], альгиновых кислот и их солей [13], полисахаридов (в частности фукоидана [14–16], ламинарина [17, 18]. Большое внимание уделяется фракции полифенолов бурых водорослей как перспективной составляющей фармсубстанций, российскими и зарубежными исследователями дана оценка антиоксидантной, антирадикальной, биологической активности и фитоактивности данного класса соединений [19–21]. Разработаны и запатентованы различные способы выделения полифенолов, фракционирования, изучены структура и свойства [22, 23].

Для использования биологически активных веществ бурых водорослей в практических целях в пищевых продуктах, фармакологии, косметологии и др. целесообразно введение экстрактов в систему, однако экстракты, полученные традиционными методами с использованием большого объема токсичных химических растворителей, характеризуются определенными недостатками [24]. При использовании в качестве экстрагентов воды или спирта не удается эффективно извлечь все типы биологически активных веществ, присутствующие в сырье.

Минорные соединения, даже находящиеся в растительной клетке в незначительных количествах, могут обладать высокой биологической активностью, следовательно, их извлечение перспективно. Альтернативным способом экстракции является сверхкритическая экстракция, обладающая рядом определенных преимуществ, одним из которых является получение химически безопасных экстрактов высокого качества, в коих практически отсутствуют остатки традиционных органических растворителей, часто являющихся токсичными [25]. Использование высоких давлений при сверхкритической CO₂-экстракции позволяет извлекать термолabile соединения. Получение и исследование сверхкритических экстрактов бурых водорослей российскими учеными открывает новые перспективы использования биологически активных веществ бурых водорослей в пищевых технологиях и биотехнологиях, косметологии, фармации, сельском хозяйстве [26–28].

Широко известной промысловой бурой водорослью является *Saccharina japonica* семейства Laminariales. Также данная водоросль активно культивируется в различных странах. Она образует заросли, преимущественно на глубине от 0,5 до 12 м, характеризуется слоевищем, дифференцированным на пластину, ствол, подошву, ризоиды. *Saccharina japonica* имеет в своем составе микро- и макроэлементы (йод, кальций, цинк, магний, железо, селен и т.д.), витамины, биологически активные вещества, а также полисахариды (фукоидан, ламинарины, альгиновые кислоты) [29].

Бурая водоросль *Ascophyllum nodosum* (семейство Fucaceae) является многолетней, слоевище ее достигает 1–1,5 м в длину. Водоросль имеет форму неправильно ветвящегося куста, длинные, редко дихотомически ветвящиеся ветви, на которых располагаются более короткие ветви, прикрепляется подошвой [30]. Образует плотные заросли, растет на каменистом и песчаном грунте в защищенных от прибой местах средней и нижней литорали. *Ascophyllum nodosum* активно используется в медицине, косметологии и диетическом питании, в пищу употребляются слоевища.

Цель проведенного нами исследования заключалась в оценке антиоксидантных свойств сверхкритических экстрактов бурых водорослей *Saccharina japonica* и *Ascophyllum nodosum*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являлись сверхкритические экстракты бурых водорослей *Saccharina japonica* и *Ascophyllum nodosum*. Сухие бурые водоросли *Saccharina japonica* и *Ascophyllum nodosum* были приобретены в аптечной сети. Производителем бурой водоросли *Ascophyllum nodosum* являлся Архангельский водорослевый комбинат, район промысла – Белое море; производителем *Saccharina japonica* – ООО «Гидробионт-ДВ», район промысла – Японское море. Сверхкритические экстракты получали с использованием системы TharSCF SFE-500 (Waters, Питтсбург, США). В качестве модификатора использован этанол, массовая доля – 5%. Скорость потока составляла 10 мл/мин для сверхкритического CO₂ и 1,0 мл/мин для этанола. Для экстракции использовали образцы каждой сухой бурой водоросли весом по 28 г. Используемое давление составляло 300 бар, время экстракции – 60 мин, температура процесса – 60 °C.

Химикаты и реагенты. 2,2-Дифенил-1-пикрилгидразил (ДФПГ), ВНТ-2,6-дитретбутил-4-метилфенол (ионол), дубильная кислота были приобретены у компании Sigma-Aldrich (США). Фенольный реагент Folin-Ciocalteu – у компании Fluka (Швейцария). Все остальные реагенты были аналитического класса.

Содержание каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом. Пигментный комплекс из тканей бурых водорослей выделяли 100%-м ацетоном, полученный гомогенат проходил фильтрацию с использованием фильтр Шотта при помощи водоструйного насоса. Затем проводили реэкстракцию каротиноидов гексаном. Определение количественного содержания каротиноидов проводили спектрофотометрическим методом с использованием сканирующего спектрофотометра марки UV-1800 (Shimadzu, Япония; длина волны 450 нм) [31].

Общее содержание фенольных соединений определялось с использованием спектрофотометрического метода на основе взаимодействия с реагентом Folin-Ciocalteu, который является основным методом для определения суммарного содержания фенолов в лекарственном растительном сырье и пищевых продуктах². Определение осуществлялось с использованием ука-

²Определение содержания дубильных веществ в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах // Pharmacopoeia.regmed.ru. Режим доступа: <https://pharmacopoeia.regmed.ru/pharmacopoeia/izdanie-14/1/1-5/1-5-3/opredelenie-soderzhaniya-dubilnykh-veshchestv-v-lekarstvennom-rastitelnom-syre-i-lekarstvennykh-rast-?ysclid=lxu3z5ec61514248003> (дата обращения: 15.01.2024).

занного ранее сканирующего спектрофотометра UV-1800. Количественное содержание суммы фенольных соединений представлено в пересчете на галловую кислоту.

Определение содержания маннита проводили спектрофотометрическим методом, основанном на образовании медных комплексов при периодатном окислении³.

Для исследования содержания металлов использовали метод атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония), средняя проба состояла из 3 экземпляров, использовалась графитовая кювета и дейтериевая лампа корректора фона. Для определения железа, цинка, меди, марганца, никеля, молибдена, алюминия, кадмия, свинца и хрома использовали стандартные растворы данных элементов, включенные в реестр, определение проводили по методике АОАС⁴.

Определение элементов натрия, калия, кальция и магния с использованием воздушно-ацетиленового пламени при расходе топлива 50 л·ч⁻¹ осуществляли по методу 999.11 АОАС⁴.

Содержание нитрозаминов определяли с помощью комплексной газовой хроматографии и быстродействующего хемилюминесцентного детектора согласно источнику [32], содержание полихлорированных бифенилов – методом газожидкостной хроматографии по источнику [33].

Содержание токсичных элементов (свинца, кадмия, меди, мышьяка) измеряли с применением вышеуказанного атомно-абсорбционного спектрофотометра AA-7000 по методу 999.11 АОАС⁴. Пробоподготовку проводили при помощи минерализации смесью азотной и серной кислот и перманганатом калия. Пределы обнаружения составляли, мг/кг: для ртути – 0,01, для свинца – 0,01, для кадмия – 0,01, для мышьяка – 0,01. Для определения содержания ртути использован метод беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути Hg-1 (Hiranuma, Япония).

Содержание радионуклидов Cs-137 и Sr-90 определяли путем измерения удельной активности с помощью гамма-спектрометра сцинтилляционного «Прогресс-гамма» («Доза», Россия).

Определение антиоксидантной активности. Изначально проводили анализ радикала ДФПГ. Антирадикальные свойства полученных сверхкритических экстрактов оценивали по степени взаимодействия со стабильным свободным ДФПГ-радикалом *in vitro* [34]. Оптическую плотность измеряли на сканирующем спектрофотометре UV-1800 при $\lambda = 517$ нм.

Антирадикальные свойства описывали следующими показателями:

– радикалсвязывающая активность PCA, %:

$$PCA = [A_0 - A_1]/A_0 \times 100,$$

где A_0 – оптическая плотность раствора контроля;
 A_1 – оптическая плотность экстракта;

– эффективная концентрация вещества, при которой восстанавливается 50% свободных радикалов ДФПГ, E_{c50} , мг/мл;

– время восстановления половины количества радикала T_{EC50} , мин;

– антирадикальная эффективность AE – характеристика, связывающая время восстановления половины количества радикала T_{EC50} и необходимую для этого концентрацию субстрата E_{c50} :

$$AE = 1/[E_{c50} \times T_{ec50}].$$

Антирадикальные свойства сравнивали с эффектом хорошо известного синтетического антиоксиданта ионола (2,6-дитретбутил-4-метил-фенол).

Гидроксил-ион связывающая активность. Было проведено спектрофотометрическое определение ингибирования гидроксильных радикалов (ОН). Гидроксил-ион связывающая активность полученных экстрактов определялась согласно источнику [35]. 1,5 мМ FeSO₄ (0,5 мл) смешивали с 6 мМ H₂O₂ (0,35 мл), 20 мМ салицилатом натрия (0,15 мл) и различными концентрациями (0,2–1,0 мг/мл) образца (по 1 мл). Оптическую плотность образовавшегося гидроксильного салицилатного комплекса измеряли на сканирующем спектрофотометре UV-1800 при $\lambda = 562$ нм. Положительным контролем являлась аскорбиновая кислота. Расчет гидроксил-ион связывающей активности, %, проводили по следующей формуле:

$$1 - [A_1 - A_2]/A_0 \times 100,$$

где A_1 – оптическая плотность сверхкритического экстракта; A_0 – оптическая плотность контрольного раствора; A_2 – оптическая плотность заготовки реагента без салицилата натрия.

Активность поглощения супероксидных радикалов. Активность поглощения супероксидных радикалов определяли по методу, описанному в источнике [36]. Оптическую плотность измеряли на сканирующем спектрофотометре UV-1800 при $\lambda = 230$ нм.

Активность поглощения супероксидных радикалов, %, определяли по формуле:

$$[A_0 - A_1/A_0] \times 100,$$

где A_0 – оптическая плотность раствора контроля; A_1 – оптическая плотность сверхкритического экстракта.

Определение Fe⁺² хелатирующей активности. Определение Fe⁺² хелатирующей активности проводили согласно [37]. Измеряли оптическую плотность при длине волны 510 нм. Контрольный образец содержит 50 мкл 0,05% галловой кислоты. Хелатирующую активность (процент ингибирования) рассчитывали по формуле:

$$A_x/A_{\text{стандарта}} \times 100\%.$$

Статистический анализ. Данные были получены в виде среднего и стандартного отклонения (CO) и проанализированы с помощью одностороннего анализа ANOVA с помощью SPSS версии 11.5 для Windows. Разница в средних значениях считалась достоверной при $p < 0,05$.

³ГОСТ 26185-84. Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 33 с.

⁴AOAC. Official methods of analysis. Maryland: Association of Official Analytical Chemists, 2000.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные из бурых водорослей сверхкритические экстракты содержат биологически активные вещества [38]. С целью оценки содержания гидро- и липофильных соединений в сверхкритических экстрактах бурых водорослей определено содержание жирных кислот, полифенолов, маннита и пигментов. Результаты представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что содержание в исследованных сверхкритических экстрактах бурых водорослей жирных кислот и фенольных соединений достаточно высоко, причем жирные кислоты максимально представлены в сверхкритическом экстракте *Ascophyllum nodosum*, а фенолы, маннит и пигменты – в экстракте *Saccharina japonica*. Полученные данные достаточно хорошо коррелируют с данными по сверхкритическому экстракту бурой водоросли *Fucus vesiculosus* [27].

Водоросли представляют собой растения, средой произрастания которых является морская вода. Ввиду этого они обладают уникальной специфичной кумулятивной способностью в высоких концентрациях накапливать в своих клетках макро- и микроэлементы. Из минеральных элементов, присутствующих в водорослях, наибольшую ценность представляют макро- и микроэлементы: калий, кальций, магний, железо, марганец, селен и др. Результаты исследования макро- и микроминерального состава сверхкритических экстрактов бурых водорослей представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 доказывают, что преобладающим макроэлементом в сверхкритических экстрактах бурых водорослей является калий с максимумом содержания в экстракте *Saccharina japonica*, превышение в сравнении

с экстрактом *Ascophyllum nodosum* составляет 53%. Содержание натрия также максимально для экстракта *Saccharina japonica*: его больше на 65%, чем в экстракте *Ascophyllum nodosum*. Сверхкритический экстракт *Saccharina japonica* характеризуется максимальным содержанием кальция и магния. Определено содержание 8 микроэлементов, из которых максимально представлены железо (преобладание в экстракте *Saccharina japonica*) и марганец (преобладание в экстракте *Ascophyllum nodosum*). Содержание никеля, кобальта, хрома, цинка и селена в исследуемых экстрактах незначительно и различается незначительно.

В связи с последующим предполагаемым использованием сверхкритических экстрактов в пищевых системах проведена оценка их безопасности. Полученные данные представлены в табл. 3.

Представленные в табл. 3 данные демонстрируют, что все исследованные сверхкритические экстракты бурых водорослей характеризуются не превышающим нормативные значения содержанием нитрозаминов, полихлорированных бифенилов, токсичных элементов и радионуклидов, что позволяет утверждать об их безопасности.

Бурые водоросли и их экстракты характеризуются высоким содержанием веществ различной химической структуры, являющихся антиоксидантными компонентами клеток и помогающих выдерживать окислительный стресс [40, 41]. Сверхкритические экстракты бурых водорослей, характеризующиеся содержанием биологически активных веществ, присущих бурым водорослям, должны проявлять антиоксидантную активность.

Антиоксидантная активность сверхкритических экстрактов бурых водорослей исследована в части ради-

Таблица 1. Содержание биологически активных веществ в сверхкритических экстрактах бурых водорослей

Table 1. Content of biologically active substances in brown algae supercritical extracts

Группа соединений / соединения	Содержание в экстракте, мг/г сухого веса CO ₂ экстракта	
	<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Saccharina japonica</i>
Жирные кислоты	20,08±0,76	19,62±0,81
Полифенолы	22,06±1,01	24,60±1,34
Маннит	5,14±0,21	9,12±0,40
Хлорофилл	0,01±0,00	0,02±0,00
Каротиноиды	0,03±0,00	0,06±0,00

Таблица 2. Макро- и микроэлементный состав сверхкритических экстрактов бурых водорослей

Table 2. Macro- and microelement composition of brown algae supercritical extracts

Элемент	Содержание, г/100 г (на сухое вещество)	
	<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Saccharina japonica</i>
Na	0,043±0,002	0,071±0,003
K	0,189±0,007	0,290±0,0142
Ca	0,015±0,0006	0,018±0,0009
Mg	0,011±0,0005	0,013±0,005
Cr	0,00002±0,000001	0,00004±0,000002
Mn	0,00007±0,000004	0,00006±0,000002
Ni	0,000005±0,0000003	0,000004±0,0000002
Fe	0,004±0,0002	0,007±0,0002
Co	0,000001±0,0000005	0,000001±0,0000001
Zn	0,0000005±0,00000008	0,000004±0,0000002
Mo	0,000003±0,0000005	0,000005±0,0000002
Se	0,000065±0,0000002	0,000003±0,0000001

Таблица 3. Показатели безопасности сверхкритических экстрактов бурых водорослей

Table 3. Safety indicators of brown algae supercritical extracts

Наименование показателя, единица измерения	Нормативное значение [39]	Фактическое значение	
		<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Saccharina japonica</i>
Нитрозамины, мг/кг	Не более 0,003	Менее 0,0002*	Менее 0,0002*
Полихлорированные бифенилы, мг/кг	Не более 2	Менее 0,001*	Менее 0,0002*
Токсичные элементы, мг/кг			
свинец	Не более 0,1	0,039	0,034
мышьяк	Не более 0,1	Менее 0,04*	Менее 0,04*
кадмий	Не более 0,05	Менее 0,003*	Менее 0,003*
ртуть	Не более 0,03	Менее 0,004*	Менее 0,004*
железо	Не более 5	0,7	0,9
медь	Не более 0,4	Менее 0,03*	Менее 0,03*
Допустимые уровни радионуклидов, Бк/л			
удельная активность цезия-137	Не более 40	5,01	8,05
удельная активность стронция-90	Не более 80	3,26	7,14

Примечание. Звездочкой помечены значения менее предела обнаружения согласно методу испытаний.

калсвязывающих свойств, гидроксил-ион связывающей активности, активности поглощения супероксидных радикалов и Fe^{+2} хелатирующей активности. ДФПГ – это соединение, которое обладает свободным радикалом азота и легко подвергается разрушению веществами, являющимися поглотителями свободных радикалов. В данном исследовании реакции с радикалом ДФПГ были использованы для оценки способности антиоксидантных соединений сверхкритических экстрактов выполнять роль поглотителей протонных радикалов или доноров водорода.

Антирадикальные свойства сверхкритических экстрактов морских водорослей представлены в табл. 4.

Более высокая радикалсвязывающая активность установлена для сверхкритического экстракта *Saccharina japonica*, для экстракта *Ascophyllum nodosum* этот показатель был на 9,5% меньше. Максимальное значение эффективной концентрации вещества, при которой восстанавливается 50% свободных радикалов ДФПГ, E_{C50} и времени восстановления половины количества радикала T_{EC50} определено для сверхкритического экстракта *Ascophyllum nodosum*, максимальная антирадикальная эффективность определена для сверхкритического экстракта *Saccharina japonica*. Сверхкритический экстракт *Saccharina japonica* характеризовался максимальными антирадикальными свойствами. В сравнении с экстрактами *Ascophyllum nodosum* он характеризуется меньшей концентрацией E_{C50} (разница составляет 14%) антирадикальной эффективности (разница – 1,2 раза). Сверхкритический экстракт *Saccharina japonica* характеризовался максимальным уровнем содержания полифенолов, имел гораздо

более низкую эффективную концентрацию E_{C50} , чем другие экстракты, что позволяет говорить о корреляции между уровнем общего содержания фенолов и антирадикальными свойствами. Такая зависимость указывает на способность полифенольных компонентов, присутствующих в исследованных сверхкритических экстрактах бурых водорослей, функционировать в качестве поглотителей свободных радикалов. Тем не менее, так как исследование антирадикальной активности с использованием ДФПГ-радикала не является специфичным для каких-либо конкретных антиоксидантов, антирадикальные свойства экстрактов могут быть обусловлены присутствием не только фенолов, но и других различных антиоксидантов, в частности таких, как специфичные полисахариды [42] и витамины (фолиевая кислота, тиамин и аскорбиновая кислота), содержание которых характерно для большинства морских водорослей [43]. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей бурой водоросли *Saccharina japonica*, к примеру со сведениями, приведенными в работе [44].

Антиоксидантные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей были определены на основании способности присутствующих в них антиоксидантных веществ ингибировать окисление дезоксирибозы реакционно-способным гидроксил-ион радикалом ($\text{OH}^\bullet$), образующимся в результате реакции типа Фентона. Также исследована активность поглощения супероксидных радикалов. Хотя $\text{O}_2^\bullet$ является относительно слабым окислителем, он разлагается с образованием более сильных окислительных форм, таких как синглетный кислород и $\text{OH}^\bullet$. Кроме того, дана оценка Fe^{+2} хелатирующей актив-

Таблица 4. Антирадикальные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей

Table 4. Antiradical properties of brown algae supercritical extracts

Вид водоросли	Антирадикальные свойства			
	PCA, %	E_{C50} , мкг/мл	T_{EC50} , мин	AE, мкг/л×с
<i>Ascophyllum nodosum</i>	54,3±2,5	28,9±1,4	25,2±1,2	0,0015±0,0000
<i>Saccharina japonica</i>	59,5±2,4	25,3±1,2	20,6±1,0	0,0018±0,0000
Ионол	94,1±4,5	8,75±0,3	8,0±0,4	0,0160±0,0700

Примечание. Данные средние ($\pm\text{CO}$), $n = 3$.

Таблица 5. Антиоксидантные свойства сверхкритических экстрактов бурых водорослей

Table 5. Antioxidant properties of brown algae supercritical extracts

Вид водоросли	Гидроксил-ион связывающая активность, %	Активность поглощения супероксидных радикалов, %	Fe ²⁺ хелатирующая активность, %
<i>Ascophyllum nodosum</i>	52,1±2,6	13,8±0,6	36,9±1,2
<i>Saccharina japonica</i>	61,3±2,9	12,5±0,5	38,7±1,4

ности сверхкритических экстрактов бурых водорослей. Полученные результаты представлены в табл. 5.

По результатам табл. 5 самая высокая гидроксил-ион связывающая активность отмечена для сверхкритического экстракта *Saccharina japonica*. В отношении активности поглощения супероксидных радикалов закономерности были иными: максимальную активность продемонстрировал экстракт *Ascophyllum nodosum*. Fe²⁺ хелатирующая активность для сверхкритических экстрактов бурых водорослей была примерно одинаковой, максимальная (38,7%) зафиксирована для экстракта *Ascophyllum nodosum*.

Известно, что бурые водоросли содержат флоратанины [40], которые являются сильными хелаторами тяжелых металлов. Именно с высоким содержанием флоратанинов можно связать высокую гидроксил-ион связывающую активность экстрактов бурых водорослей. В то же время сложный химический состав бурых водорослей позволяет сделать предположение, что антиоксидантную активность проявляют не только фенольные соединения, но и активные соединения других классов, например каротиноиды [45] или полисахариды. Экспериментальными исследованиями доказано, что гидротермические экстракты некоторых зеленых и бурых водорослей, содержащие сульфатированные

гетерополисахариды, сильно ингибируют активность OH• *in vitro* [46–48].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные сверхкритические экстракты из бурых водорослей *Saccharina japonica* и *Ascophyllum nodosum* характеризуются достаточно высоким содержанием жирных кислот и фенольных соединений. Минеральный состав экстрактов представлен 4 макро- (максимально представлен калий) и 8 микроэлементами (максимально представлено железо). Сверхкритические экстракты бурых водорослей являются безопасными по содержанию нитрозаминов, полихлорированных бифенилов, токсичных элементов и радионуклидов. Сверхкритический экстракт *Saccharina japonica* характеризуется наиболее выраженными антирадикальными свойствами. Максимальная гидроксил-ион связывающая активность отмечена для сверхкритического экстракта *Saccharina japonica*, активность поглощения супероксидных радикалов – для экстракта *Ascophyllum nodosum*. Fe²⁺ хелатирующая активность для сверхкритических экстрактов бурых водорослей была примерно одинаковой, максимальная (38,7%) зафиксирована для экстракта *Ascophyllum nodosum*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lopez-Santamarina A., Cardelle-Cobas A., Mondragon A.C., Sinisterra-Loaiza L., Miranda J.M., Cepeda A. Evaluation of the potential prebiotic effect of *Himanthalia elongata*, an Atlantic brown seaweed, in an *in vitro* model of the human distal colon // Food Research International. 2022. Vol. 156. P. 111156. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111156.
2. Meng W., Mu T., Sun H., Garcia-Vaquero M. Evaluation of the chemical composition and nutritional potential of brown macroalgae commercialised in China // Algal Research. 2022. Vol. 64. P. 102683. DOI: 10.1016/j.algal.2022.102683.
3. Ghosh S., Sarkar T., Pati S., Kari Z.A., Edinur H.A., Chakraborty R. Novel bioactive compounds from marine sources as a tool for functional food development // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. P. 835927. DOI: 10.3389/fmars.2022.832957.
4. Jagtap A.S., Manohar C.S., Ayyapankutty A.M., Meena S.N. Antioxidant and antiglycemic properties of macroalgae, an underutilized blue economy bioresource in India // Russian Journal of Marine Biology. 2021. Vol. 47. P. 489–497. DOI: 10.1134/S1063074021060067.
5. Meresse S., Fodil M., Fleury F., Chénais B. Fucoxanthin, a marine-derived carotenoid from brown seaweeds and microalgae: a promising bioactive compound for cancer therapy // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21, no. 23. P. 9273. DOI: 10.3390/ijms21239273.
6. Synytsya A., Kim W.-J., Kim S.-M., Pohl R., Synytsya A., Kvasnička F., et al. Structure and antitumour activity of fucoidan isolated from sporophyll of Korean brown seaweed *Undaria pinnatifida* // Carbohydrate Polymers. 2010. Vol. 81, no. 1. P. 41–48. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.01.052.
7. Lee J.-B., Takeshita A., Hayashi K., Hayashi T. Structures and antiviral activities of polysaccharides from *Sargassum trichophyllum* // Carbohydrate Polymers. 2011. Vol. 86, no. 2. P. 995–999. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.05.059.
8. Gager L., Connan S., Molla M., Couteau C., Arbona J.-F., Coiffard L., et al. Active phlorotannins from seven brown seaweeds commercially harvested in Brittany (France) detected by ¹H NMR and *in vitro* assays: temporal variation and potential valorization in cosmetic applications // Journal of Applied Phycology. 2020. Vol. 32. P. 2375–2386. DOI: 10.1007/s10811-019-02022-1.
9. Bogolitsyn K., Druzhinina A., Kaplitsin P., Ovchinnikov D., Parshina A., Kuznetsova M. Relationship between radical scavenging activity and polymolecular properties of brown algae polyphenols // Chemical Papers. 2019. Vol. 73. P. 2377–2385. DOI: 10.1007/s11696-019-00760-7.
10. Corsetto P.A., Montorfano G., Zava S., Colombo I., Ingadottir B., Jonsdottir R., et al. Characterization of antioxidant potential of seaweed extracts for enrichment of convenience food // Antioxidants. 2020. Vol. 9, no. 3. P. 249. DOI: 10.3390/antiox9030249.
11. D'Orazio N., Gemello E., Gammone M., de Girolamo M., Ficoneri C., Riccioni G. Fucoxanthin: a treasure from the sea // Marine Drugs. 2012. Vol. 10, no. 12. P. 604–616. DOI: 10.3390/md10030604.

- 12.** Fung A., Hamid N., Lu J. Fucoxanthin content and antioxidant properties of *Undaria pinnatifida* // Food Chemistry. 2013. Vol. 136, no. 2. P. 1055–1062. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.09.024.
- 13.** Cong Q., Xiao F., Liao W., Dong Q., Ding K. Structure and biological activities of an alginate from *Sargassum fusiforme*, and its sulfated derivative // International Journal of Biological Macromolecules. 2014. Vol. 69. P. 252–259. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2014.05.056.
- 14.** Ajisaka K., Yokoyama T., Matsuo K. Structural characteristics and antioxidant activities of fucoidans from five brown seaweeds // Journal of Applied Glycoscience. 2016. Vol. 63, no. 2. P. 31–37. DOI: 10.5458/jag.jag.JAG-2015_024.
- 15.** Mak W., Hamid N., Liu T., Lu J., White W.L. Fucoidan from New Zealand *Undaria pinnatifida*: monthly variations and determination of antioxidant activities // Carbohydrate Polymers. 2013. Vol. 95, no. 1. P. 606–614. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.02.047.
- 16.** Wang J., Zhang Q., Zhang Z., Song H., Li P. Potential antioxidant and anticoagulant capacity of low molecular weight fucoidan fractions extracted from *Laminaria japonica* // International Journal of Biological Macromolecules. 2010. Vol. 46, no. 1. P. 6–12. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2009.10.015.
- 17.** Jin W., Zhang W., Wang J., Ren S., Song N., Duan D., Zhang Q. Characterization of laminaran and a highly sulfated polysaccharide from *Sargassum fusiforme* // Carbohydrate Research. 2014. Vol. 385. P. 58–64. DOI: 10.1016/j.carres.2013.12.009.
- 18.** Kadam S., O'Donnell C., Rai D., Hossain M., Burgess C., Walsh D., et al. Laminarin from Irish brown seaweeds *Ascophyllum nodosum* and *Laminaria hyperborea*: ultrasound assisted extraction, characterization and bioactivity // Marine Drugs. 2015. Vol. 13, no. 7. P. 4270–4280. DOI: 10.3390/md13074270.
- 19.** Боголицын К.Г., Дружинина А.С., Овчинников Д.В., Паршина А.Э., Шульгина Е.В., Турова П.Н. [и др.]. Полифенолы арктических бурых водорослей: выделение, полимолекулярный состав // Химия растительного сырья. 2019. N 4. С. 65–75. DOI: 10.14258/jcprm.2019045135. EDN: JVVVTN.
- 20.** Боголицын К.Г., Дружинина А.С., Каплицын П.А., Овчинников Д.В., Паршина А.Э., Шульгина Е.В. Взаимосвязь антиоксидантной активности и полимолекулярных свойств полифенолов арктических бурых водорослей // Химия и химическая технология переработки растительного сырья: материалы докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.М. Резникова (г. Минск, 10–12 октября 2018 г.). Минск: Изд-во БГТУ, 2018. С. 257–262. EDN: VKCHWS.
- 21.** Salehi B., Sharifi-Rad J., Seca A.M.L., Pinto D.C.G.A., Michalak I., Trincone A., et al. Current trends on seaweeds: looking at chemical composition, phytopharmacology, and cosmetic applications // Molecules. 2019. Vol. 24, no. 22. P. 4182. DOI: 10.3390/molecules24224182.
- 22.** Пат. № 2676271, Российская Федерация, А61К 36/03, С08В 37/00, С08В 37/18. Способ комплексной переработки бурых водорослей / К.Г. Боголицын, П.А. Каплицын, А.С. Дружинина, Д.В. Овчинников, Е.В. Шульгина, А.Э. Паршина. Заявл. 14.03.2018; опубл. 27.12.2018. Бюл. № 36.
- 23.** Пат. № 2741634, Российская Федерация, А23L 17/60. Способ получения биологически активного полифенольного комплекса из арктических бурых водорослей / К.Г. Боголицын, А.Э. Паршина, А.С. Дружинина, Д.В. Овчинников. Заявл. 24.07.2020; опубл. 28.01.2021. Бюл. № 36.
- 24.** Herrero M., Mendiola J.A., Cifuentes A., Ibáñez E. Supercritical fluid extraction: recent advances and applications // Journal of Chromatography A. 2010. Vol. 1217, no. 16. P. 2495–2511. DOI: 10.1016/j.chroma.2009.12.019.
- 25.** Herrero M., Cifuentes A., Ibáñez E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: plants, food-by-products, algae and microalgae: a review // Food Chemistry. 2006. Vol. 98, no. 1. P. 136–148. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.05.058.
- 26.** Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Dobrodeeva L.K., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Parshina A.E., et al. Fatty acid composition and biological activity of supercritical extracts from arctic brown algae *Fucus vesiculosus* // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2017. Vol. 11. P. 1144–1152. DOI: 10.1134/S1990793117070065.
- 27.** Дружинина А.С., Боголицын К.Г., Каплицын П.А., Овчинников Д.В., Паршина А.Э. Сверхкритическая флюидная экстракция арктических бурых водорослей вида *Fucus vesiculosus* // Сверхкритические флюиды (СКФ): фундаментальные основы, технологии, инновации: тезисы докл. IX науч.-практ. конф. с междунар. уч. (г. Сочи, 9–14 октября 2017 г.). М.: Изд-во ЗАО «Шаг», 2017. С. 218–220. EDN: XPEWHR.
- 28.** Каплицын П.А., Боголицын К.Г., Дружинина А.С., Овчинников Д.В., Шульгина Е.В., Паршина А.Э. Комплексная схема выделения биологически активных веществ из арктических бурых водорослей с применением метода сверхкритической флюидной экстракции // Сверхкритические флюидные технологии в решении экологических проблем: создание перспективных материалов: тезисы докл. VII Всерос. школы-конф. мол. уч. (г. Архангельск, 13–15 сентября 2016 г.). Архангельск: Белый ветер, 2016. С. 115–120. EDN: XSMGNR.
- 29.** Суховеева М.В., Подкорытова А.В. Промысловые водоросли и травы морей Дальнего Востока: биология, распространение, запасы, технология переработки: монография. Владивосток: ТИПРО-центр, 2006. 243 с. EDN: QKYIZV.
- 30.** Камнев А.Н. Структура и функции бурых водорослей: монография. М.: Изд-во МГУ, 1989. 200 с. EDN: YZHLRR.
- 31.** Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H. Carotenoids. Vol. 1A. Isolation and analysis. Basel: Birkhäuser Verlag, 1995. 328 p.
- 32.** Ozel^{M.Z.}, Gogus F., Yagci S., Hamilton J.F., Lewis A.C. Determination of volatile nitrosamines in various meat products using comprehensive gas chromatography-nitrogen chemiluminescence detection // Food and Chemical Toxicology. 2010. Vol. 48, no. 11. P. 3268–3273. DOI: 10.1016/j.fct.2010.08.036.
- 33.** Zabelina O.N., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Analysis of polychlorinated biphenyl mixtures by gas chromatography // Journal of Analytical Chemistry. 2010. Vol. 65. P. 1098–1108. DOI: 10.1134/S106193481011002X.
- 34.** Molyneux P. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity // Songklanakarin Journal of Science and Technology. 2004. Vol. 26, no. 2. P. 211–219.
- 35.** Smirnoff N., Cumbes Q.J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes // Phytochemistry. 1989. Vol. 28, no. 4. P. 1057–1060. DOI: 10.1016/0031-9422(89)80182-7.

36. Ruch R.J., Cheng S.-J., Klaunig J.E. Prevention of cytotoxicity and inhibition of intercellular communication by antioxidant catechins isolated from Chinese green tea // *Carcinogenesis*. 1989. Vol. 10, no. 6. P. 1003–1008. DOI: 10.1093/carcin/10.6.1003.
37. Patel D.S., Shah P.B., Managoli N.B. Evaluation of *in vitro* anti-oxidant and free radical scavenging activities of *Withania somnifera* and *Aloe vera* // *Asian Journal of Pharmacy and Technology*. 2012. Vol. 2, no. 4. P. 143–147.
38. Табакаева О.В., Табакаев А.В. Сверхкритический экстракт из бурой водоросли Японского моря *Undaria pinnatifida* как источник биологически активных веществ // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2023. Т. 13. № 3. С. 416–424. DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-3-416-424. EDN: JRWASG.
39. Papitha R., Selvaraj C.I., Palanichamy V., Arunachalam P., Roopan S.M. *In vitro* antioxidant and cytotoxic capacity of *Kappaphycus alvarezii* successive extracts // *Current Science*. 2020. Vol. 119, no. 5. P. 790–798. DOI: 10.18520/cs/v119/i5/790-798.
40. Sathya R., Kanaga N., Sankar P., Jeeva S. Antioxidant properties of phlorotannins from brown seaweed *Cystoseira trinodis* (Forsskål) C. Agardh // *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Vol. 10. P. S2608–S2614. DOI: 10.1016/j.arabj.2013.09.039.
41. Wang L., Oh J.Y., Hwang J., Ko J.Y., Jeon Y.-J., Ryu B. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activities of polysaccharides isolated from celluclast-assisted extract of an edible brown seaweed, *Sargassum fulvellum* // *Antioxidants*. 2019. Vol. 8, no. 10. P. 493. DOI: 10.3390/antiox8100493.
42. Gomez-Zavaglia A., Lage M.A.P., Jimenez-Lopez C., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. The potential of seaweeds as a source of functional ingredients of prebiotic and antioxidant value // *Antioxidants*. 2019. Vol. 8, no. 9. P. 406. DOI: 10.3390/antiox8090406.
43. Valdés F.A., Lobos M.G., Díaz P., Sáez C.A. Metal assessment and cellular accumulation dynamics in the green macroalga *Ulva lactuca* // *Journal of Applied Phycology*. 2018. Vol. 30. P. 663–671. DOI: 10.1007/s10811-017-1244-x.
44. Saravana P.S., Getachew A.T., Cho Y.-J., Choi J.H., Park Y.B., Woo H.C., et al. Influence of co-solvents on fucoxanthin and phlorotannin recovery from brown seaweed using supercritical CO₂ // *Journal of Supercritical Fluids*. 2017. Vol. 120. P. 295–303. DOI: 10.1016/j.supflu.2016.05.037.
45. Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V. Carotenoid profile and antiradical properties of brown seaweed *Sargassum miyabei* extracts // *Chemistry of Natural Compounds*. 2019. Vol. 55. P. 364–366. DOI: 10.1007/s10600-019-02692-w.
46. Jridi M., Mezhoudi M., Abdelhedi O., Boughriba S., Elfalleh W., Souissi N., et al. Bioactive potential and structural characterization of sulfated polysaccharides from Bullet tuna (*Auxis Rochei*) by-products // *Carbohydrate Polymers*. 2018. Vol. 194. P. 319–327. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.04.038.
47. Bogolitsyn K., Dobrodeeva L., Druzhinina A., Ovchinnikov D., Parshina A., Shulgina E. Biological activity of a polyphenolic complex of Arctic brown algae // *Journal of Applied Phycology*. 2019. Vol. 31. P. 3341–3348. DOI: 10.1007/s10811-019-01840-7.
48. Layana P., Martin Xavier K.A., Lekshmi S., Deshmukhe G., Nayak B.B., Balange A.K. Antioxidant and antimicrobial potential of hydroethanolic extracts of *Padina tetrastromatica* from North-west Coast of India // *Fishery Technology*. 2019. Vol. 56. P. 199–204.

REFERENCES

1. Lopez-Santamarina A., Cardelle-Cobas A., Mondragon A.C., Sinisterra-Loaiza L., Miranda J.M., Cepeda A. Evaluation of the potential prebiotic effect of *Himanthalia elongata*, an Atlantic brown seaweed, in an *in vitro* model of the human distal colon. *Food Research International*. 2022;156:111156. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111156.
2. Meng W., Mu T., Sun H., Garcia-Vaquero M. Evaluation of the chemical composition and nutritional potential of brown macroalgae commercialised in China. *Algal Research*. 2022;64:102683. DOI: 10.1016/j.algal.2022.102683.
3. Ghosh S., Sarkar T., Pati S., Kari Z.A., Edinur H.A., Chakraborty R. Novel bioactive compounds from marine sources as a tool for functional food development. *Frontiers in Marine Science*. 2022;9:835927. DOI: 10.3389/fmars.2022.832957.
4. Jagtap A.S., Manohar C.S., Ayyapanikutty A.M., Meena S.N. Antioxidant and antidiabetic properties of macroalgae, an underutilized blue economy bioresource in India. *Russian Journal of Marine Biology*. 2021;47:489–497. DOI: 10.1134/S1063074021060067.
5. Meresse S., Fodil M., Fleury F., Chénais B. Fucoxanthin, a marine-derived carotenoid from brown seaweeds and microalgae: a promising bioactive compound for cancer therapy. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(23):9273. DOI: 10.3390/ijms21239273.
6. Synytsya A., Kim W.-J., Kim S.-M., Pohl R., Synytsya A., Kvasnička F., et al. Structure and antitumour activity of fucoidan isolated from sporophyll of Korean brown seaweed *Undaria pinnatifida*. *Carbohydrate Polymers*. 2010;81(1):41–48. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.01.052.
7. Lee J.-B., Takeshita A., Hayashi K., Hayashi T. Structures and antiviral activities of polysaccharides from *Sargassum trichophyllum*. *Carbohydrate Polymers*. 2011;86(2):995–999. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.05.059.
8. Gager L., Connan S., Molla M., Couteau C., Arbona J.-F., Coiffard L., et al. Active phlorotannins from seven brown seaweeds commercially harvested in Brittany (France) detected by ¹H NMR and *in vitro* assays: temporal variation and potential valorization in cosmetic applications. *Journal of Applied Phycology*. 2020;32:2375–2386. DOI: 10.1007/s10811-019-02022-1.
9. Bogolitsyn K., Druzhinina A., Kaplitsin P., Ovchinnikov D., Parshina A., Kuznetsova M. Relationship between radical scavenging activity and polymolecular properties of brown algae polyphenols. *Chemical Papers*. 2019;73:2377–2385. DOI: 10.1007/s11696-019-00760-7.
10. Corsetto P.A., Montorfano G., Zava S., Colombo I., Ingadottir B., Jonsdottir R., et al. Characterization of antioxidant potential of seaweed extracts for enrichment of convenience food. *Antioxidants*. 2020;9(3):249. DOI: 10.3390/antiox9030249.
11. D'Orazio N., Gemello E., Gammone M., de Girolamo M., Ficoneri C., Riccioni G. Fucoxanthin: a treasure from the sea. *Marine Drugs*. 2012;10(12):604–616. DOI: 10.3390/md10030604.
12. Fung A., Hamid N., Lu J. Fucoxanthin content and antioxidant properties of *Undaria pinnatifida*. *Food Chemistry*. 2013;136(2):1055–1062. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.09.024.

13. Cong Q., Xiao F., Liao W., Dong Q., Ding K. Structure and biological activities of an alginate from *Sargassum fusiforme*, and its sulfated derivative. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2014;69:252-259. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2014.05.056.
14. Ajisaka K., Yokoyama T., Matsuo K. Structural characteristics and antioxidant activities of fucoidans from five brown seaweeds. *Journal of Applied Glycoscience*. 2016;63(2):31-37. DOI: 10.5458/jag.jag.JAG-2015_024.
15. Mak W., Hamid N., Liu T., Lu J., White W.L. Fucoidan from New Zealand *Undaria pinnatifida*: monthly variations and determination of antioxidant activities. *Carbohydrate Polymers*. 2013;95(1):606-614. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.02.047.
16. Wang J., Zhang Q., Zhang Z., Song H., Li P. Potential antioxidant and anticoagulant capacity of low molecular weight fucoidan fractions extracted from *Laminaria japonica*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2010;46(1):6-12. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2009.10.015.
17. Jin W., Zhang W., Wang J., Ren S., Song N., Duan D., Zhang Q. Characterization of laminaran and a highly sulfated polysaccharide from *Sargassum fusiforme*. *Carbohydrate Research*. 2014;385:58-64. DOI: 10.1016/j.carres.2013.12.009.
18. Kadam S., O'Donnell C., Rai D., Hossain M., Burgess C., Walsh D., et al. Laminarin from Irish brown seaweeds *Ascophyllum nodosum* and *Laminaria hyperborea*: ultrasound assisted extraction, characterization and bioactivity. *Marine Drugs*. 2015;13(7):4270-4280. DOI: 10.3390/md13074270.
19. Bogolitsyn K.G., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Parshina A.E., Shulgina E.V., Turova P.N., et al. Polyphenols of arctic brown algae: extraction, polymolecular composition. *Chemistry of plant raw material*. 2019;4:65-75. (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm.2019045135. EDN: JYVVTN.
20. Bogolitsyn K.G., Druzhinina A.S., Kaplitsin P.A., Ovchinnikov D.V., Parshina A.E., Shul'gina E.V. Relationship between antioxidant activity and polymolecular properties of arctic brown algae polyphenol. In: *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya: materialy dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya V.M. Reznikova = Chemistry and chemical technology for processing plant raw materials: Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. dedicated to 100th anniversary of V.M. Reznikov birth*. 10–12 October 2018, Minsk. Minsk: Belarusian State Technological University; 2018, p. 257-262. (In Russian). EDN: VKCHWS.
21. Salehi B., Sharifi-Rad J., Seca A.M.L., Pinto D.C.G.A., Michalak I., Trincon A., et al. Current trends on seaweeds: looking at chemical composition, phytopharmacology, and cosmetic applications. *Molecules*. 2019;24(22):4182. DOI: 10.3390/molecules24224182.
22. Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Shulgina E.V., Parshina A.E. *Method of complex processing of brown algae*. Patent RF, no. 2676271; 2018. (In Russian).
23. Bogolitsyn K.G., Parshina A.E., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V. *Method for producing a biologically active polyphenol complex from arctic brown algae*. Patent RF, no. 2741634; 2021. (In Russian).
24. Herrero M., Mendiola J.A., Cifuentes A., Ibáñez E. Supercritical fluid extraction: recent advances and applications. *Journal of Chromatography A*. 2010;1217(16):2495-2511. DOI: 10.1016/j.chroma.2009.12.019.
25. Herrero M., Cifuentes A., Ibáñez E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: plants, food-by-products, algae and microalgae: a review. *Food Chemistry*. 2006;98(1):136-148. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.05.058.
26. Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Dobrodeeva L.K., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Parshina A.E., et al. Fatty acid composition and biological activity of supercritical extracts from arctic brown algae *Fucus vesiculosus*. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2017;11:1144-1152. DOI: 10.1134/S1990793117070065.
27. Druzhinina A.S., Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Ovchinnikov D.V., Parshina A.E. Supercritical fluid extraction of arctic brown algae species *Fucus vesiculosus*. In: *Sverkhkriticheskie flyuidy (SKF): fundamental'nye osnovy, tekhnologii, innovatsii: tezisy dokl. IX nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uch. = Supercritical fluids (SCF): fundamentals, technologies, innovations: Proc. of 9th Sci.-Tech. Conf. with Int. Part*. 9–14 October 2017, Sochi. Moscow: Shag; 2017, p. 218-220. (In Russian). EDN: XPEWHR.
28. Kaplitsyn P.A., Bogolitsyn K.G., Druzhinina A.S., Ovchinnikov D.V., Shul'gina E.V., Parshina A.E. Complex scheme for the isolation of biologically active substances from Arctic brown algae using supercritical fluid extraction. In: *Sverkhkriticheskie flyuidnye tekhnologii v reshenii ekologicheskikh problem: sozdanie perspektivnykh materialov: tezisy dokl. VII Vseros. shkoly-konf. mol. uch. = Supercritical fluid technologies in solving environmental problems: creation of promising materials: Proc. of All-Russ. School-Conf. Of Yang Sci*. 13–15 September 2016, Arkhangel'sk. Arkhangel'sk: Belyi veter; 2016, p. 115-120. (In Russian). EDN: XSMGMR.
29. Sukhoveeva M.V., Podkorytova A.V. *Commercial algae and herbs of the seas of the Far East: biology, distribution, reserves, processing technology*. Vladivostok: TINRO-tsentr; 2006, 243 p. (In Russian). EDN: QKYIZV.
30. Kamnev A.N. *Structure and function of brown algae*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1989, 200 p. (In Russian). EDN: YZHLRR.
31. Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H. *Carotenoids. Vol. 1A. Isolation and analysis*. Basel: Birkhäuser Verlag; 1995, 328 p.
32. Ozel M.Z., Gogus F., Yagci S., Hamilton J.F., Lewis A.C. Determination of volatile nitrosamines in various meat products using comprehensive gas chromatography-nitrogen chemiluminescence detection. *Food and Chemical Toxicology*. 2010;48(11):3268-3273. DOI: 10.1016/j.fct.2010.08.036.
33. Zabelina O.N., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Analysis of polychlorinated biphenyl mixtures by gas chromatography. *Journal of Analytical Chemistry*. 2010;65:1098-1108. DOI: 10.1134/S106193481011002X.
34. Molyneux P. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2004;26(2):211-219.
35. Smirnoff N., Cumbes Q.J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. *Phytochemistry*. 1989;28(4):1057-1060. DOI: 10.1016/0031-9422(89)80182-7.
36. Ruch R.J., Cheng S.-J., Klaunig J.E. Prevention of cytotoxicity and inhibition of intercellular communication by antioxidant catechins isolated from Chinese green tea. *Carcinogenesis*. 1989;10(6):1003-1008. DOI: 10.1093/carcin/10.6.1003.

37. Patel D.S., Shah P.B., Managoli N.B. Evaluation of *in vitro* anti-oxidant and free radical scavenging activities of *Withania somnifera* and *Aloe vera*. *Asian Journal of Pharmacy and Technology*. 2012;2(4):143-147.
38. Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V. Supercritical extract from the Japanese sea brown algae *Undaria pinnatifida* as a source of bioactive compounds. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(3):416-424. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-3-416-424. EDN: JRWASG.
39. Papitha R., Selvaraj C.I., Palanichamy V., Arunachalam P., Roopan S.M. *In vitro* antioxidant and cytotoxic capacity of *Kappaphycus alvarezii* successive extracts. *Current Science*. 2020;119(5):790-798. DOI: 10.18520/cs/v119/i5/790-798.
40. Sathya R., Kanaga N., Sankar P., Jeeva S. Antioxidant properties of phlorotannins from brown seaweed *Cystoseira trinodis* (Forsskål) C. Agardh. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017;10:S2608-S2614. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.09.039.
41. Wang L., Oh J.Y., Hwang J., Ko J.Y., Jeon Y.-J., Ryu B. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activities of polysaccharides isolated from celluclast-assisted extract of an edible brown seaweed, *Sargassum fulvellum*. *Antioxidants*. 2019;8(10):493. DOI: 10.3390/antiox8100493.
42. Gomez-Zavaglia A., Lage M.A.P., Jimenez-Lopez C., Mejuto J.C., Simal-Gandara J. The potential of seaweeds as a source of functional ingredients of prebiotic and antioxidant value. *Antioxidants*. 2019;8(9):406. DOI: 10.3390/antiox8090406.
43. Valdés F.A., Lobos M.G., Díaz P., Sáez C.A. Metal assessment and cellular accumulation dynamics in the green macroalga *Ulva lactuca*. *Journal of Applied Phycology*. 2018;30:663-671. DOI: 10.1007/s10811-017-1244-x.
44. Saravana P.S., Getachew A.T., Cho Y.-J., Choi J.H., Park Y.B., Woo H.C., et al. Influence of co-solvents on fucosanthin and phlorotannin recovery from brown seaweed using supercritical CO₂. *Journal of Supercritical Fluids*. 2017;120:295-303. DOI: 10.1016/j.supflu.2016.05.037.
45. Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V. Carotenoid profile and antiradical properties of brown seaweed *Sargassum miyabei* extracts. *Chemistry of Natural Compounds*. 2019;55:364-366. DOI: 10.1007/s10600-019-02692-w.
46. Jridi M., Mezhoudi M., Abdelhedi O., Boughriba S., Elfalleh W., Souissi N., et al. Bioactive potential and structural characterization of sulfated polysaccharides from Bullet tuna (*Auxis Rochei*) by-products. *Carbohydrate Polymers*. 2018;194:319-327. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.04.038.
47. Bogolitsyn K., Dobrodeeva L., Druzhinina A., Ovchinnikov D., Parshina A., Shulgina E. Biological activity of a polyphenolic complex of Arctic brown algae. *Journal of Applied Phycology*. 2019;31:3341-3348. DOI: 10.1007/s10811-019-01840-7.
48. Layana P., Martin Xavier K.A., Lekshmi S., Deshmukhe G., Nayak B.B., Balange A.K. Antioxidant and antimicrobial potential of hydroethanolic extracts of *Padina tetrastromatica* from North-west Coast of India. *Fishery Technology*. 2019;56:199-204.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Табакаева Оксана Вацлавовна,

д.т.н., доцент, профессор,
заведующий лабораторией,
Институт биотехнологий,
биоинженерии и пищевых систем,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Российская Федерация,
✉ yankovskaya68@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7068-911X>

Табакаев Антон Вадимович,

к.т.н.,
доцент, научный сотрудник,
Институт биотехнологий,
биоинженерии и пищевых систем,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Российская Федерация,
научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт
эпидемиологии и микробиологии
им. Г.П. Сомова Федеральной службы
по надзору в сфере защиты прав потребителей
и благополучия человека,
690922, г. Владивосток, ул. Сельская, 10,
Российская Федерация,
tabakaev92@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5658-5069>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana V. Tabakaeva,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Head of the Laboratory,
Institute of Biotechnology,
Bioengineering and Food Systems,
Far Eastern Federal University,
10, Ajax Village, Russkii Isl., Vladivostok, 690922,
Russian Federation,
✉ yankovskaya68@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7068-911X>

Anton V. Tabakaev,

Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor, Researcher,
Institute of Biotechnology,
Bioengineering and Food Systems,
Far Eastern Federal University,
10, Ajax Village, Russkii Isl., Vladivostok, 690922,
Russian Federation,
Researcher,
Research Institute of Epidemiology
and Microbiology named after G.P. Somov
Federal Service for Supervision in the Field
of Protection of Consumer Rights
and Human Well-Being,
10, Selskaya St., Vladivostok, 690922,
Russian Federation,
tabakaev92@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5658-5069>

Силантьев Владимир Евгеньевич,
к.х.н., директор Департамента
биомедицинской химии
Школы медицины и наук и жизни,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Российская Федерация,
silantev.ve@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0365-6342>

Капуста Светлана Владимировна,
аспирант,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Российская Федерация,
kapusta.sv@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0005-8740-1249>

Вклад авторов

О.В. Табакаева – постановка целей и задач исследования, получение и анализ результатов, написание текста рукописи.
А.В. Табакаев – получение и анализ результатов, написание текста рукописи.
В.Е. Силантьев – подбор методик анализа.
С.В. Капуста – работа с литературными источниками.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 22.01.2024.
Одобрена после рецензирования 21.02.2024.
Принята к публикации 31.05.2024.

Vladimir E. Silant'ev,
Cand. Sci. (Chemistry),
Director of the Department of Biomedical
Chemistry, School of Medicine
and Sciences and Life Sciences,
Far Eastern Federal University,
10, Ajax Village, Russkii Isl., Vladivostok, 690922,
Russian Federation,
silantev.ve@dvfu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0365-6342>

Svetlana V. Kapusta,
Postgraduate Student,
Far Eastern Federal University,
10, Ajax, Russky Island, Vladivostok, 690922,
Russian Federation,
kapusta.sv@dvfu.ru
<https://orcid.org/0009-0005-8740-1249>

Contribution of the authors

Oksana V. Tabakaeva – research objectives setting, obtaining and analyzing the results, preparing the manuscript.
Anton V. Tabakaev – obtaining and analyzing the results, preparing the manuscript.
Vladimir E. Silant'ev – selection of analysis methods.
Svetlana V. Kapusta – literature sources revising.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 22.01.2024.
Approved after reviewing 21.02.2024.
Accepted for publication 31.05.2024.