

Научная статья

УДК 661.123

EDN: JRWASG

DOI: 10.21285/2227-2925-2023-13-3-416-424



Сверхкритический экстракт из бурой водоросли Японского моря *Undaria pinnatifida* как источник биологически активных веществ

О.В. Табакаева✉, А.В. Табакаев

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. Биологически активные вещества водорослей имеют практическое применение в фармацевтической отрасли, производстве продуктов питания для человека и кормов для животных и в других сферах. Получение химически безопасных экстрактов высокого качества из бурых водорослей, характеризующихся широким спектром биологически активных веществ, является актуальной задачей. Целью представленного исследования являлась характеристика сверхкритического экстракта из бурой водоросли *U. pinnatifida*, идентификация и оценка содержания биологически активных веществ. Содержание каротиноидов, фенольных соединений, маннита определяли спектрофотометрическим методом, жирнокислотный анализ проводили с помощью газо-жидкостной хроматографии, качественный состав каротиноидов и фенольных соединений анализировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Сверхкритическая экстракция CO₂ с использованием в качестве полярного модификатора этилового спирта бурой водоросли *U. pinnatifida* характеризуется высокой эффективностью в части извлечения жирных кислот, каротиноидов и фенольных соединений. Каротиноидный профиль полученного сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* характеризуется присутствием 14 представителей, максимально представлены фукоксантин (58,1% от суммы), зеаксантин (12,6% от суммы) и фукоксантинол (14,5% от суммы). Жирнокислотный состав сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* определяется присутствием 20 представителей, основными из которых являются пальмитиновая, олеиновая, арахидоновая и эйкозопентаеновая кислоты. Класс полиненасыщенных жирных кислот является преобладающим, содержание жирных кислот семейств ω-6 и ω-3 несущественно различается. Установлено, что общее содержание фенольных соединений составляет 13,45±0,43 мг галловой кислоты/г, наиболее представлены эпикатехин, галлатэпигаллокатехин, сиринговая, кумаровая, феруловая и салициловая кислоты.

Ключевые слова: сверхкритические экстракты, бурая водоросль *U. pinnatifida*, биологически активные вещества, ксантофиллы, жирные кислоты, фенолы

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект 23-26-00197).

Для цитирования: 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. N 3. С. 416–424. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-3-416-424>. EDN: JRWASG.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Supercritical extract from the Japanese sea brown algae *Undaria pinnatifida* as a source of bioactive compounds

Oksana V. Tabakaeva✉, Anton V. Tabakaev

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Abstract. Bioactive compounds contained in algae have practical applications in the pharmaceutical industry, production of human food and animal feed, and other fields. Since brown algae contain a wide range of bioactive substances, producing high-quality and chemically safe extracts on their basis is an urgent task. This study was aimed at characterization of supercritical extract from the corresponding algae, as well as the identification and evaluation of the content of bioactive compounds. The content of carotenoids, phenolic compounds and mannitol was determined by UV-Vis spectroscopy; a fatty acid analysis was carried out by GLPC; the qualitative composition of carotenoids and phenolic compounds was analyzed by HPLC. Supercritical CO₂ extraction of the brown alga *U. pinnatifida* with EtOH as a polar modifier is characterized by high ejection efficiency of fatty acids, phenolic compounds and carotenoids.

© Табакаева О.В., Табакаев А.В., 2023

The latter profile of the collected supercritical extract consists of 14 representatives. In particular, fucoxanthin (58.1% of the sum), zeaxanthin (12.6% of the sum), and fucoxanthinol (14.5% of the sum) are the most abundant compounds. Palmitic acid, oleic acid, arachidonic acid, and eicosapentaenoic acids are the main of the 20 fatty acids found in the corresponding extract. However, the class of polyunsaturated fatty acids is predominant, which content of the ω -6 and ω -3 groups does not differ significantly. The total content of phenolic compounds is 13.45±0.43 mg/g of gallic acid equivalent. For instance, the most represented phenolic substances are epicatechin, epigallocatechin gallate, syringic acid, coumaric acid, ferulic acid and salicylic acid.

Keywords: supercritical extracts, brown algae *U. rinnatifida*, bioactive substances, xanthophylls, fatty acids, phenols

Funding. The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project 23-26-00197).

For citation: Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V. Supercritical extract from the Japanese sea brown algae *Undaria pinnatifida* as a source of bioactive compounds. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(3):416–424. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-3-416-424>. EDN: JRWASG.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на долгую историю использования водорослей в различных сферах жизни человека, их биогенный и биотехнологический потенциал все еще остается в значительной степени неизученным, что обуславливает активное исследование состава и содержания биологически активных веществ (БАВ) с целью дальнейшего практического использования [1]. Морские водоросли (бурые, зеленые, красные) известны как богатый источник биологически активных соединений, включая белки, минералы, витамины, полисахариды, полифенолы, флоротанины, пигменты, ненасыщенные жирные кислоты, стерины и фитогормоны [2–4]. БАВ морских водорослей характеризуются свойствами различной направленности – антиоксидантными [5], антибактериальными, противовоспалительными и антиканцерогенными [6, 7]. БАВ водорослей имеют практическое применение в фармацевтической отрасли, производстве продуктов питания для человека и кормов для животных, а также интегрированных систем выращивания растений [1, 8, 9].

Наиболее приемлемыми и часто используемыми способами применения БАВ водорослей как компонентов для обогащения пищевых систем или в качестве фармацевтических компонентов является добавление водорослей в нативном виде или в виде экстракта. При получении экстрактов для более эффективного извлечения БАВ из измельченной биомассы водорослей следует выбирать подходящий растворитель (например, воду и органические растворители). Применение традиционных методов экстракции, в частности экстракции в аппарате Сокслета, твердожидкостной экстракции и жидкостно-жидкостной экстракции, имеет некоторые недостатки, например, использование больших объемов растворителей и сложное разделение экстрагируемых веществ [10]. В качестве альтернативы традиционным процедурам экстракции предлагается применение сверхкритической технологии, позволяющей получать химически безопасные экстракты высокого качества [11].

Сверхкритическая CO₂-экстракция, использующая высокие давления, является отличной техникой для получения натуральных термолабильных соединений. Кроме того, в получаемых экстрактах не имеется остатков органических растворителей, что происходит при обычных методах экстракции, растворители могут быть токсичными, например, в случае метанола и гексана. Легкое удаление растворителя из конечного продукта, высокая селективность и использование умеренных температур в процессе экстракции являются главными привлека-

тельными факторами сверхкритической экстракции, приводя к значительному увеличению исследований для применения получаемых экстрактов в пищевой и фармакологической промышленности [12]. Сверхкритический углекислый газ, в частности, является привлекательным сверхкритическим растворителем из-за низких критических температур использования (30–40 °C), его нетоксичности и инертности.

Также необходимо учитывать, что с помощью спиртовых и водных экстрактов получается извлечь не все типы соединений, присутствующих в сырье. На современном этапе необходимо извлечение из растительной матрицы не только основных компонентов, но и минорных соединений. Сверхкритическая CO₂-экстракция с использованием соразвителя этанола позволяет экстрагировать из растительной матрицы более расширенный спектр биологически активных веществ по сравнению с обычными методами экстракции, в том числе и термолабильные соединения [13, 14]. Использование сверхкритических флюидов как растворителей является интересной альтернативой для получения натуральных продуктов высокого качества без создания токсичных остатков. Внедрение технологии сверхкритической экстракции возрастает благодаря новым техническим достижениям [10].

Целью работы являлась характеристика сверхкритического экстракта из бурой водоросли *Undaria pinnatifida*, идентификация и оценка содержания БАВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты исследований. В качестве растительной матрицы для получения сверхкритического экстракта были использованы талломы бурой водоросли *Undaria pinnatifida* (Harv.) Sur. Данная водоросль является однолетней. Слоевище состоит из пластины, стволика и ризоидов. Пластина тонкая, перепончатая, перисторассеченная, темно-зеленого или оливкового цвета, длиной 40–80 см, шириной 25–45 см. В молодом возрасте пластина овальная. Стволик 8–12 см, внизу округлый или слабосдавленный, вверху уплощенный, постепенно переходит в широкое плоское ребро пластины. Данный вид бурых водорослей произрастает в водах Китая, Японии, Кореи, а также США, Великобритании, Франции, Италии, Испании, Аргентины, Австралии и Новой Зеландии. Растет на литорали и в сублиторали на глубинах 0,5–6,0 м, на скалистом и каменистом фунтах у открытых прибойных участков побережья. Образует небольшие заросли между крупными камнями

и валунами. Встречается в сообществах с бурыми водорослями и морскими травами, является объектом культивирования в странах Юго-Восточной Азии. Биомасса составляет до 2 кг/м², плотность поселения – 1–10 экз/м², масса одного слоевища – до 0,4 кг [15].

Получение сверхкритического экстракта. Экстракцию CO₂ в сверхкритическом состоянии проводили с использованием системы TharSCF SFE-500 (Waters, Pittsburgh, США). Скорость потока составляла 10 мл/мин для жидкого CO₂ и 1,0 мл/мин для этанола. Для экстракции использовали образцы 28 г сухого таллома бурой водоросли *U. pinnatifida*. Используемое давление – 300 бар, время экстракции – 60 мин, температура процесса – 60 °С.

Содержание каротиноидов определяли спектрофотометрическим методом. Пигментный комплекс выделяли 100%-м ацетоном. Гомогенат фильтровали через фильтр Шотта при помощи водоструйного насоса. Для полноты извлечения каротиноидов остаток с фильтра переносили в ступку для повторной экстракции еще 5 мл ацетона. Остаток на фильтре промывали ацетоном до обесцвечивания растворителя. Каротиноиды переводили в гексан, смешивая в делительной воронке объединенные ацетоновые экстракты с 5 мл гексана и осторожно добавляя 150 мл 5%-го водного раствора NaCl для разделения гексанового и водного слоев. Экстракт промывали небольшим количеством дистиллированной воды (20–30 мл) для удаления следов ацетона, после чего сушили в течение суток безводным сульфатом натрия. К аликвоте спиртового раствора приливали равное количество 5%-го раствора NaOH в этаноле и ставили в темное место на 12 ч. Каротиноиды реэкстрагировали гексаном, который промывали водой для удаления следов щелочи и высушивали безводным сульфатом натрия. Количественное содержание каротиноидов определяли спектрофотометрически на сканирующем спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в ацетоновой вытяжке при длине волны 450 нм [16].

Качественный состав каротиноидов анализировали методом ВЭЖХ с использованием жидкостного хроматографа высокого давления LC-20A (Shimadzu, Япония), снабженного колонкой Zorbax ODS (4,6×250 мм), скорость подачи элюента – 0,8 мл/мин. Количественная оценка содержания пигментов проводилась с использованием спектров поглощения в потоке, полученных на детекторе SPD-M20A (Shimadzu, Япония) со встроенной фотодиодной матрицей. Для анализа полярных свободных каротиноидов была использована следующая система: вода–ацетонитрил 50–50, 0–30 мин – линейный градиент до 100% ацетонитрила; 30–50 мин – 100% ацетонитрил.

Жирнокислотный анализ проводили с помощью ГЖХ-масс-спектрометра (Hewlett-Packard, США). Липиды из образца экстрагировали смесью хлороформ–метанол (2:1). Хлороформенную фазу упаривали и обрабатывали 1%-м метилом натрия при температуре 56 °С в течение 20 мин. Метиловые эфиры жирных кислот экстрагировали хлороформом и анализировали [17, 18].

Содержание фенольных веществ и маннита. Для определения суммарного содержания фенольных соединений использован спектрофотометрический метод с реактивом Фолина-Чокалтеу. Метод основан на восстановлении смеси фосфорновольфрамовой и

фосфорномолибденовой кислот в щелочной среде и является основным методом для определения общего содержания фенолов в лекарственном растительном сырье и пищевых продуктах¹. Использовался сканирующий спектрофотометр UV-1800 (Shimadzu, Япония). Количественное определение суммы фенольных соединений проведено в пересчете на галловую кислоту.

Определение содержания маннита проводили спектрофотометрическим методом, основанным на образовании медных комплексов при периодатном окислении².

Идентификация фенольных соединений проводилась с использованием ВЭЖХ на жидкостном хроматографе высокого давления LC-20A (Shimadzu, Япония) при температуре 30 °С на обратнофазной колонке Phenomenex RPC18 250×4,6 мм, 5 мкм (Phenomenex, США). Экстракты пропускали через фильтр 0,45 мкм (Millipore, США) перед инъекцией в ВЭЖХ. Общее время выполнения составило около 50 мин при скорости потока 0,6 мл/мин. Подвижной фазой был метанол (б): вода (а) с 0,2%-й уксусной кислотой (65:35, в/в). Градиентное элюирование проводили следующим образом: 0–2 мин, 5% б изократический; 2–10 мин, линейный градиент 5–25% б; 10–20 мин, линейный градиент 25–40% В; 20–30 мин, линейный градиент 40–50% В; 30–40 мин, линейный градиент 50–100% В; 40–45 мин, 100% В изократический и 45–55 мин, линейный градиент 100–5% В. Индивидуальные фенольные соединения идентифицировали путем сравнения их времени удерживания с тем же для подлинных стандартов (Sigma, США) с использованием тех же условий. Одновременный контроль длины волны обнаружения был установлен на 324 нм для хлорогеновой, кофейной, 2,5-дигидроксибензойной, кумаровой, феруловой и салициловой кислот и 277 нм для галлата эпигалокатехина (ЭГКГ), эпикатехина (ЭК), галлата эпикатехина (ЭКГ) и сингловой кислоты. Количественная оценка каждого соединения была определена на основании измерений пиковой площади с использованием градуировочного графика для каждого соединения.

Все исследования проводили в 3-кратной повторности. Экспериментальные данные представлены в виде $M \pm m$. Статистическую обработку проводили с использованием пакетов прикладных статистических программ Excel. Достоверность различий оценивали по критерию Стьюдента при 95%-м уровне значимости.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первоначально полученный сверхкритический экстракт бурой водоросли *U. pinnatifida* был проанализирован на предмет содержания основных соединений и групп соединений, характерных для состава бурых водорослей. Полученные данные представлены в табл. 1. Содержание биологически активных веществ в бурой водоросли *U. pinnatifida* представлено в мг/г сухого веса водоросли по результатам экстракции традиционными органическими растворителями [4, 19]. Выход CO₂-экстракта составил 0,77%. Выход от исходного содержания в водоросли, % отн., рассчитан как соотношение содержания в исходной водоросли, мг/г сухого веса водоросли, к содержанию в экстракте, пересчитанном в мг/г сухого веса водоросли.

Представленные в табл. 1 данные демонстрируют,

Таблица 1. Содержание биологически активных веществ в бурой водоросли *U. pinnatifida* и сверхкритическом экстракте

Table 1. Content of biologically active substances in brown algae *U. pinnatifida* and supercritical extract

Группа соединений, соединения	Содержание в исходной водоросли, мг/г сухого веса	Содержание в экстракте, мг/г сухого веса CO ₂ -экстракта	Выход от исходного содержания в водоросли, % отн.
Жирные кислоты	12,30±0,52	22,41±0,98	68,70±3,10
Полифенолы	140,62±6,17	25,31±1,09	8,3±0,31
Маннит	53,75±2,40	6,50±0,25	5,61±0,20
Хлорофилл	0,30±0,01	0,01±0,00	1,55±0,03
Каротиноиды	0,08±0,03	0,05±0,00	28,99±1,26

что применение сверхкритической CO₂-экстракции позволяет достаточно эффективно извлекать жирные кислоты, каротиноиды, фенольные соединения и маннит. Необходимо отметить существенно высокий выход жирных кислот (около 70% отн.), что, вероятно, объясняется более эффективной растворимостью данных соединений в CO₂, чем в традиционных органических растворителях. Выход других липофильных соединений – каротиноидов – также является достаточно высоким (около 30% отн.), что позволяет утверждать о перспективности использования сверхкритической экстракции в качестве метода для получения экстрактов с высоким содержанием каротиноидов.

Исследование каротиноидного профиля полученного сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* позволило установить, что он характеризуется присутствием 14 представителей: α - и β -каротины, фукоксантин, фукоксантинол, зеаксантин, неоксантин, 9-цис-неоксантин, виолаксантин, лютеин, диатоксантин, диадитоксантин, кантаксантин, антероксантин, астаксантин. По количественному содержанию исследованные каротиноиды можно разделить на 2 группы – минорные (содержание менее 1%) и мажорные (более 1%). Количественный состав минорных каротиноидов сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* представлен на рис. 1.

Представленные на рис. 1 данные демонстрируют, что максимально представленными минорными каротиноидами являются β -каротин и кантаксантин, минимальное содержание определено для антероксантина. Лютеин, α -каротин, 9-цис-неоксантин и астаксантин характеризуются промежуточным содержанием.

Количественный состав мажорных каротиноидов сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* представлен на рис. 2.

Максимально представленными в исследованном сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida* мажорными каротиноидами являются фукоксантин (58,1% от суммы каротиноидов), зеаксантин (12,6% от суммы каротиноидов) и производное фукоксантина – фукоксантинол (14,5% от суммы каротиноидов). Содержание диатоксантина и диадитоксантина является минимальным (1,8 и 1,3% от суммы каротиноидов соответственно). Виолаксантин и неоксантин характеризуются невысоким содержанием (4,6 и 6,5% от суммы каротиноидов соответственно). Содержание неидентифицированных каротиноидов составило 1,8% от суммы каротиноидов.

Полученные данные согласовываются с результатами

исследования каротиноидного состава других бурых водорослей [20, 21].

Кроме каротиноидов, в сверхкритическом экстракте присутствуют различные жирные кислоты. Содержание минорных (менее 1% от суммы) жирных кислот в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida* представлено на рис. 3.

Согласно представленным на рис. 3 данным, жирнокислотный профиль сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* определяется присутствием 10 минорных представителей: пентадециловой, цис-9-гексадеценовой (ω 5 и ω 7), гептадеценовой, цис-, цис-, цис-9,12,15-октадекатриеновой (α -линолевой), эйкозановой (арахиновой), эйкозодиеновой, эйкозотетраеновой, генэйкозотетраеновой, генэйкозопентаеновой кислот. Максимальным содержанием характеризуются 3 минорных жирных кислоты – 16:1, 20:2, 20:4, минимальным – 15:0 и 16:1 (ω 5). Содержание жирных кислот 17:1, 18:3, 20:0, 21:4 и 21:5 можно охарактеризовать как среднее среди минорных кислот.

Содержание мажорных жирных кислот (более 1% от суммы всех жирных кислот) в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida* представлено на рис. 4.

Среди мажорных жирных кислот, согласно данным рис. 4, выделяются следующие кислоты: гексадекановая (пальмитиновая), цис-9-октадеценовая (олеиновая), цис-, цис-, цис-8,11,14-эйкозотетраеновая (арахидиновая), цис-, цис-, цис-8,11,14,17-эйкозатетраеновая и 5,8,11,14,17-эйкозопентаеновая, их содержание не менее 10% от суммы всех жирных кислот. Максимальное содержание определено для олеиновой и пальмитиновой кислот, однако необходимо отметить существенно высокое содержание (13,1%) эйкозопентаеновой кислоты. Гораздо меньшим содержанием характеризуются цис-, цис-, цис-11,14,17-эйкозатриеновая, цис-, цис-, цис-6,9,12-октадекатриеновая (гамма линоленовая), цис-, цис-9,12-октадекадиеновая (линолевая), стеариновая и миристиновая кислоты.

Немаловажной характеристикой жирнокислотного профиля объекта является не только количественное содержание отдельных жирных кислот, но и содержание отдельных групп и семейств жирных кислот (насыщенных – НЖК, мононенасыщенных – МНЖК, полиненасыщенных – ПНЖК). На рис. 5 представлено соотношение НЖК, МНЖК и ПНЖК, а также омега-3 и омега-6 жирных кислот в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*.

Визуализированные на рис. 5 данные демон-

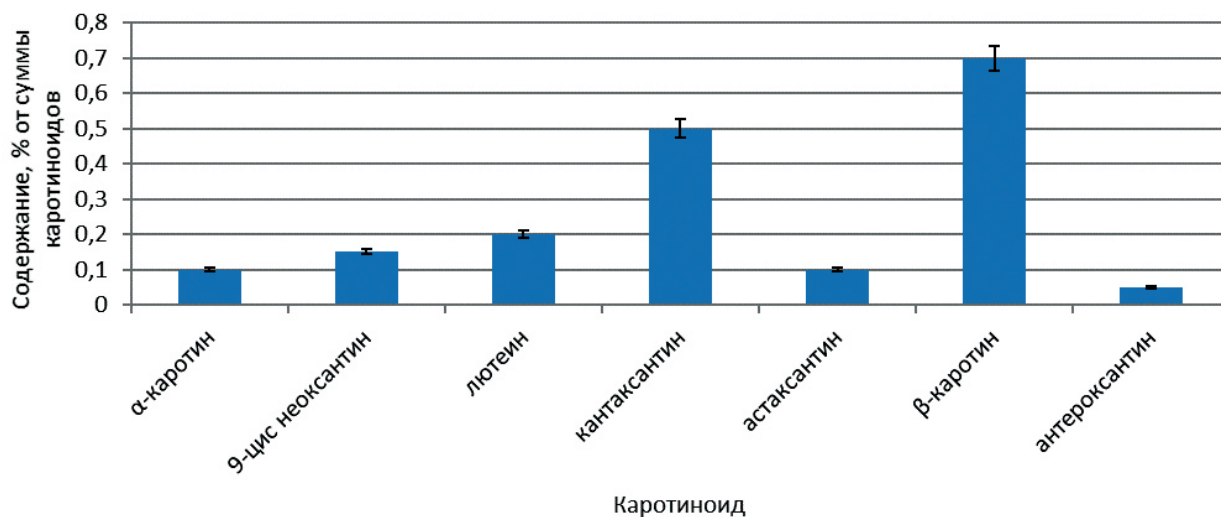


Рис. 1. Содержание минорных каротиноидов в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*

Fig. 1. Minor carotenoids content in the brown algae *U. pinnatifida* supercritical extract

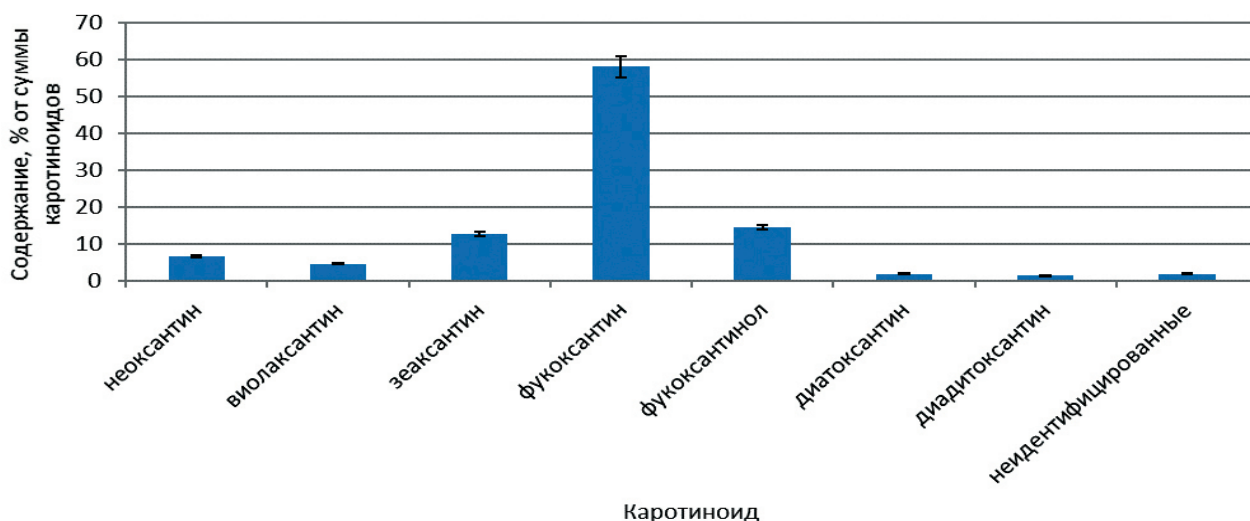


Рис. 2. Содержание мажорных каротиноидов в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*

Fig. 2. Major carotenoids content in the brown algae *U. pinnatifida* supercritical extract

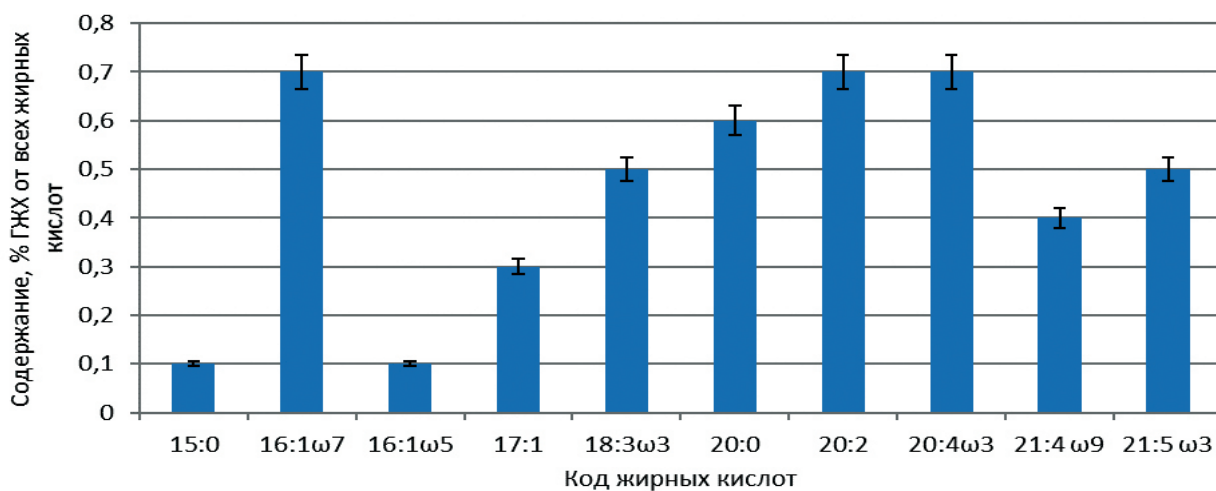


Рис. 3. Содержание минорных жирных кислот в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*

Fig. 3. Minor FAs content in the brown algae *U. pinnatifida* supercritical extract

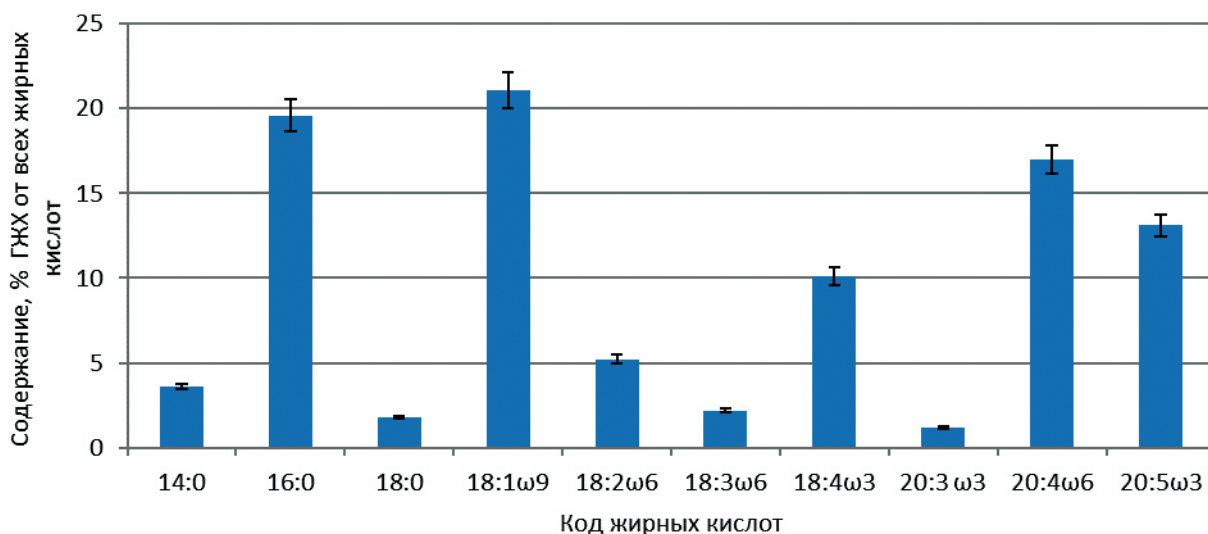


Рис. 4. Содержание мажорных жирных кислот в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*

Fig. 4. Major FAs content in the brown algae *U. pinnatifida* supercritical extract

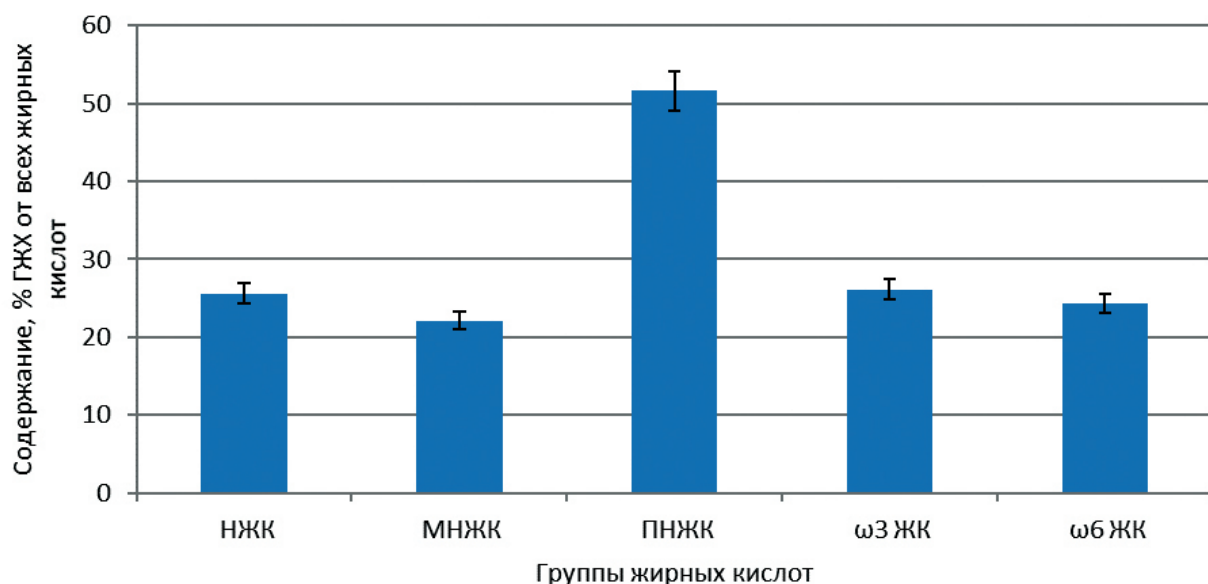


Рис. 5. Содержание отдельных групп и семейств жирных кислот в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*

Fig. 5. Content of individual groups and families of FAs in the brown algae *U. pinnatifida* supercritical extract

стрируют, что класс ПНЖК является преобладающим в составе сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida*. Содержание НЖК и МНЖК несущественно отличается друг от друга. Отдельно необходимо отметить практически одинаковое содержание жирных кислот семейств ω-6 и ω-3, что характеризует исследуемый экстракт как перспективный с точки зрения биологической активности, проявляемой эссенциальными жирными кислотами.

Кроме исследованных липофильных соединений, в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida* определено общее содержание фенольных соединений, которое составило 13,45±0,43 мг галловой кислоты/г. Содержание основных фенольных соединений, идентифицированных в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*, представлено в табл. 2.

Представленные в табл. 2 данные демонстрируют,

что в составе сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* присутствует 9 фенольных соединений. Первым из фенольных соединений элюирует галлат эпигаллокатехина. Мажорными фенольными соединениями в экстракте являются эпикатехин, галлат эпигаллокатехина, сириговая, кумаровая, феруловая и салициловая кислоты. Минимальное содержание определено для галлат эпикатехина и 2,5-дигидроксibenзойной кислоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы: сверхкритическая экстракция CO₂ с полярным модификатором этанолом бурой водоросли *U. pinnatifida* характеризуется высокой эффективностью в части извлечения жирных кислот, каротиноидов и фенольных соединений. Каротиноидный профиль полученного сверхкритического экстракта бурой

Таблица 2. Содержание основных фенольных соединений, идентифицированных в сверхкритическом экстракте бурой водоросли *U. pinnatifida*

Table 2. Content of the main phenolic compounds identified in the brown alga *U. pinnatifida* supercritical extract

Соединение	Длина волны, нм	Rt, мин	Содержание, мг/г
Кофейная кислота	324	10,49	2,30±0,11
2,5-дигидроксibenзойная кислота		17,43	0,89±0,03
Кумаровая кислота		20,56	8,04±0,31
Феруловая кислота		24,19	14,88±0,53
Салициловая кислота		44,92	4,90±0,22
Галлат эпигаллокатехина	277	8,13	7,02±0,28
Эпикатехин		10,11	36,40±1,61
Галлат эпикатехина		13,00	0,52±0,01
Сиринговая кислота		14,78	41,28±2,06

водоросли *U. pinnatifida* характеризуется присутствием 14 представителей, максимально представлены фукоксантин (58,1% от суммы каротиноидов), зеаксантин (12,6% от суммы каротиноидов) и фукоксантинол (14,5% от суммы каротиноидов). Жирнокислотный состав сверхкритического экстракта бурой водоросли *U. pinnatifida* определяется присутствием 20 представителей, основными из которых являются пальмитиновая, олеиновая, арахидо-

новая и эйкозопентаеновая жирные кислоты. Класс ПНЖК является преобладающим, содержание жирных кислот семейств ω-6 и ω-3 различается несущественно. Установлено, что общее содержание фенольных соединений составляет 13,45±0,43 мг/г в перерасчете на галловую кислоту, наиболее представлены эпикатехин, галлат эпигаллокатехина, сиринговая, кумаровая, феруловая и салициловая кислоты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Craigie J.S. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture // *Journal of Applied Phycology*. 2011. Vol. 23, no. 3. P. 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>.
2. Gerasimenko N.I., Martyas E.A., Busarova N.G. Composition of lipids and biological activity of lipids and photosynthetic pigments from algae of the families Lamnariaceae and Alariaceae // *Chemistry of Natural Compounds*. 2012. Vol. 48, no. 5. P. 737–741. <https://doi.org/10.1007/s10600-012-0371-5>. EDN: RGD LHZ.
3. 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.
4. Табакаева О.В., Табакаев А.В. Биологически активные вещества потенциально промысловых бурых водорослей Дальневосточного региона // *Вопросы питания*. 2016. Т. 85. N 3. С. 126–133. EDN: WFGBEV.
5. Rajauria G. In-vitro antioxidant properties of lipophilic antioxidant compounds from 3 brown seaweed // *Antioxidants*. 2019. Vol. 8, no. 12. P. 596–599. <https://doi.org/10.3390/antiox8120596>.
6. Meresse S., Fodil M., Fleury F. 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. 9273–9278. <https://doi.org/10.3390/ijms21239273>.
7. Jesumani V., Du H., Aslam M. Potential use of seaweed bioactive compounds in skincare // *Marine Drugs*. 2019. Vol. 17, no. 12. P. 688–694. <https://doi.org/10.3390/md17120688>.
8. Gupta S., Abu-Ghannam N. Recent developments in the application of seaweeds or seaweed extracts as a means for enhancing the safety and quality attributes of foods // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2011. Vol. 12, no. 4. P. 600–609. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.07.004>.
9. 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. <https://doi.org/10.3390/molecules24224182>.
10. Herrero M., Mendiola J.A., Cifuentes A., Ibañez E. Supercritical fluid extraction: recent advances and applications // *Journal of Chromatography A*. 2010. Vol. 1217, no. 16. P. 2495–2511. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.019>.
11. Herrero M., Cifuentes A., Ibañez E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: plants, food-by-products, algae and microalgae // *Food Chemistry*. 2006. Vol. 98, no. 1. P. 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058>.
12. Valderrama J.O., Perrut M., Majewski W. Extraction of astaxanthine and phycocyanine from microalgae with supercritical carbon dioxide // *Journal of Chemical and Engineering*. 2003. Vol. 48, no. 4. P. 827–830. <https://doi.org/10.1021/jc020128r>.
13. Razgonova M.P., Tekutyeva L.A., Podvolotskaya A.B., Zakharenko A.M., Golokhvast K. *Zostera marina* L.: supercritical CO₂-extraction and mass spectrometric characterization of chemical constituents recovered from seagrass // *Separations*. 2022. Vol. 9, no. 7. P. 182. <https://doi.org/10.3390/separations9070182>.
14. Razgonova M.P., Cherevach E.I., Tekutyeva L.A., Kirilenko N.S., Golokhvast K. *Maackia amurensis* Rupr. et Maxim.: supercritical CO₂-extraction and mass spectrometric characterization of chemical constituents // *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 5. P. 2026. <https://doi.org/10.3390/molecules28052026>.
15. Дизюров В.Д., Кулепанов В.Н., Шапош-

никова Т.В. Атлас массовых видов водорослей и морских трав российского Дальнего Востока: монография. Владивосток: ТИПРО-центр, 2008. 328 с. EDN: QKTKOP.

16. Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H. Carotenoids. Isolation and analysis. Basel: Birkhäuser Verlag, 1995. Vol. 1A. 328 p.

17. Новак И.С. Количественный анализ методом газовой хроматографии. М.: Мир, 1978. 180 с.

18. Carreau J.P., Dubacq J.P. Adaptation of a macro-scale method to the micro-scale for fatty acid methyl transesterification of biological lipid extracts // *Journal of Chromatography A*. 1978. Vol. 151. P. 384–390. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)88356-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)88356-9).

19. Табакаева О.В., Семилетова Е.В. Фитохими-

ческий состав потенциально промысловых бурых водорослей Дальневосточного региона // *Химия природных соединений*. 2015. N 4. С. 529–531.

20. Pereira A.G., Otero P., Echave J., Carreira-Casais A., Chamorro F., Collazo N., et al. Xanthophylls from the sea: algae as source of bioactive carotenoids // *Marine Drugs*. 2021. Vol. 19, no. 4. P. 188. <https://doi.org/10.3390/md19040188>.

21. Heffernan N., Smyth T., FitzGerald R.J., Vila-Soler A., Mendiola J., Ibáñez E., et al. Comparison of extraction methods for selected carotenoids from macroalgae and the assessment of their seasonal/spatial variation // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016. Vol. 37. P. 221–228. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.004>.

REFERENCES

1. Craigie J.S. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*. 2011;23(3):371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>.

2. Gerasimenko N.I., Martyyas E.A., Busarova N.G. Composition of lipids and biological activity of lipids and photosynthetic pigments from algae of the families Laminariaceae and Alariaceae. *Chemistry of Natural Compounds*. 2012;48(5):737–741. <https://doi.org/10.1007/s10600-012-0371-5>. EDN: RGDHZZ.

3. Suhoveeva M.V., Podkorytova A.V. *Commercial algae and grasses of the seas of the Far East: biology, distribution, reserves, processing technology: monograph*. Vladivostok: TINRO-centr; 2006. 243 p. (In Russian). EDN: QKYIZV.

4. Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V. Biologically active agents of potential trade brown seaweed of the Far East Region. *Voprosy pitaniya = Problems of Nutrition*. 2016;85(3):126–133. (In Russian). EDN: WFGBEB.

5. Rajauria G. In-vitro antioxidant properties of lipophilic antioxidant compounds from 3 brown seaweed. *Antioxidants*. 2019;8(12):596–599. <https://doi.org/10.3390/antiox8120596>.

6. Meresse S., Fodil M., Fleury F. 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):9273–9278. <https://doi.org/10.3390/ijms21239273>.

7. Jesumani V., Du H., Aslam M. Potential use of seaweed bioactive compounds in skincare. *Marine Drugs*. 2019;17(12):688–694. <https://doi.org/10.3390/md17120688>.

8. Gupta S., Abu-Ghannam N. Recent developments in the application of seaweeds or seaweed extracts as a means for enhancing the safety and quality attributes of foods. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2011;12(4):600–609. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.07.004>.

9. 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;24(22):4182. <https://doi.org/10.3390/molecules24224182>.

10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.019>.

11. 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. *Food Chemistry*. 2006;98(1):136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058>.

12. Valderrama J.O., Perrut M., Majewski W. Extraction of astaxanthin and phycocyanine from microalgae with supercritical carbon dioxide. *Journal of Chemical and Engineering*. 2003;48(4):827–830. <https://doi.org/10.1021/jc020128r>.

13. Razgonova M.P., Tekutyeva L.A., Podvolotskaya A.B., Zakharenko A.M., Golokhvast K. *Zostera marina* L.: supercritical CO₂-extraction and mass spectrometric characterization of chemical constituents recovered from seagrass. *Separations*. 2022;9(7):182. <https://doi.org/10.3390/separations9070182>.

14. Razgonova M.P., Cherevach E.I., Tekutyeva L.A., Kirilenko N.S., Golokhvast K. *Maackia amurensis* Rupr. et Maxim.: supercritical CO₂-extraction and mass spectrometric characterization of chemical constituents. *Molecules*. 2023;28(5):2026. <https://doi.org/10.3390/molecules28052026>.

15. Dizjurov V.D., Kulepanov V.N., Shaposhnikova T.V. *Atlas of mass species of algae and sea grasses of the Russian Far East: monograph*. Vladivostok: TINRO-centr; 2008. 328 p. (In Russian). EDN: QKTKOP.

16. Britton G., Liaaen-Jensen S., Pfander H. *Carotenoids. Isolation and analysis*. Basel: Birkhäuser Verlag; 1995, vol. 1A. 328 p.

17. Novak I.S. *Quantitative analysis by gas chromatography*. Moscow: Mir; 1978. 180 p. (In Russian).

18. Carreau J.P., Dubacq J.P. Adaptation of a macro-scale method to the micro-scale for fatty acid methyl transesterification of biological lipid extracts. *Journal of Chromatography A*. 1978;151:384–390. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)88356-9](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)88356-9)

19. Tabakaeva O.V., Semiletova E.V. Phytochemical composition of potentially commercial brown algae of the Far Eastern region. *Himija prirodnih soedinenij = Chemistry of Natural Compounds*. 2015;(4):529–531. (In Russian).

20. Pereira A.G., Otero P., Echave J., Carreira-Casais A., Chamorro F., Collazo N., et al. Xanthophylls from the

sea: algae as source of bioactive carotenoids. *Marine Drugs*. 2021;19(4):188.
<https://doi.org/10.3390/md19040188>.

21. Heffernan N., Smyth T., FitzGerald R.J., Vila-Soler A., Mendiola J., Ibáñez E., et al. Comparison of

extraction methods for selected carotenoids from macroalgae and the assessment of their seasonal/spatial variation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016;37:221-228.

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.004>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Табакаева Оксана Вацлавовна,
д.т.н., доцент, профессор базовой кафедры
пищевой и клеточной инженерии,
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 базовой кафедры пищевой
и клеточной инженерии,
Дальневосточный федеральный университет,
690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10,
Российская Федерация,
tabakaev92@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5658-5069>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.04.2023.
Одобрена после рецензирования 08.06.2023.
Принята к публикации 31.08.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oksana V. Tabakaeva,
Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Professor,
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,
Far Eastern Federal University,
10, Ajax Village, Russkii Isl., Vladivostok, 690922,
Russian Federation,
tabakaev92@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5658-5069>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

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 15.04.2023.
Approved after reviewing 08.06.2023.
Accepted for publication 31.08.2023.