

Научная статья
УДК 57.044
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.003

ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ В НАКОПЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОЛИСАХАРИДОВ И ПОЛИФЕНОЛОВ У БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ *ASCOPHYLLUM NODOSUM* (L.) LE JOLIS И *FUCUS DISTICHUS* (L.) АРКТИКИ

**Анна Васильевна Даурцева^{1,2}, Елена Вячеславовна Горшенина^{1,2},
Екатерина Дмитриевна Облучинская^{1,2}**

¹Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия

²Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия

tav.mmbi@yandex.ru, gev1811@yandex.ru, okaterine@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты сравнительного анализа содержания полисахаридов, полифенолов и элементов у близкородственных видов бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* и *Fucus distichus* из Норвежского и Баренцева морей. Показаны различия в содержании этих компонентов в водорослях из разных мест обитания. Отмечена сильная корреляционная связь содержания Ва с Ас как у *A. nodosum* ($r = -0.84$, $p < 0.05$), так и у *F. distichus* ($r = 0.99$, $p < 0.05$) и обнаружены видоспецифичные взаимосвязи накопления биологически активных веществ и элементов.

Ключевые слова:

Ascophyllum nodosum, *Fucus distichus*, альгинат, фукоидан, полифенолы, элементы

Original article

SPECIFIC FEATURES OF ACCUMULATION OF ELEMENTS, POLYSACCHARIDES AND POLYPHENOLS IN BROWN ALGAE OF *ASCOPHYLLUM NODOSUM* (L.) LE JOLIS AND *FUCUS DISTICUS* (L.) OF THE ARCTIC

Anna V. Daurtseva^{1,2}, Elena V. Gorshenina^{1,2}, Ekaterina D. Obluchinskaya^{1,2}

¹Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia

²Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia

tav.mmbi@yandex.ru, gev1811@yandex.ru, okaterine@yandex.ru

Abstract

Ascophyllum nodosum and *Fucus distichus* are closely related species of brown algae that inhabit similar conditions. Their chemical composition depends on their habitat and physiological characteristics. The aim of the work is to compare the content of polysaccharides, polyphenols and elements in these species from the Norwegian and Barents seas. The article describes the differences in the content of the above components in the studied algae from different habitats. For the first time, a strong correlation was found between the content of Ba and As for both species ($r = -0.84$ for *A. nodosum* and 0.99 for *F. distichus* at $p < 0.05$), and species-specific relationships between the accumulation of biologically active substances and elements were revealed.

Keywords:

Ascophyllum nodosum, *Fucus distichus*, alginate, fucoidan, polyphenols, elements

Введение

Ascophyllum nodosum (L.) Le Jolis и *Fucus distichus* (L.) – близкородственные виды бурых водорослей из семейства Fucaceae, они широко распространены в сублиторальной и литоральной зонах северных морей и характеризуются высокой способностью накапливать полисахариды (альгинаты, фукоидан), полифенолы и связывать металлы. Однако их химический состав и способность поглощать элементы варьируют в зависимости от экологических условий и физиологических особенностей вида.

Данные фукоиды (рис. 1) отличаются в первую очередь своей морфологией. Так фукус двухрядный (двусторонний) имеет среднюю жилку и не имеет воздушных пузырей, однако иногда встречаются воздушные полости (вздутия), расположенные часто попарно по обе стороны срединной жилки. Кусты *F. distichus* в длину обычно до 50 см, ветви узкие или широкие, плоские (Шошина, Капков, 2014).

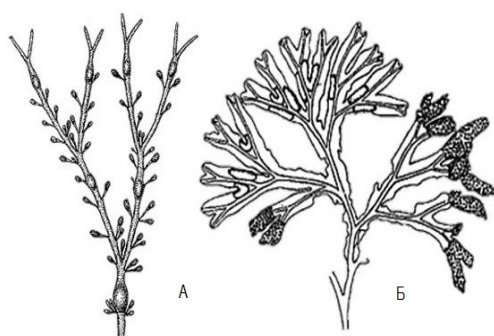


Рис. 1. *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (А) и *Fucus distichus* (L.) (Б) (Кузнецов, 1960)

Fig. 1. *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (A) and *Fucus distichus* (L.) (B) (Kuznetsov, 1960)

Аскофиллум узловатый – раздельнополый двудомный фукоид, имеющий крупное слоевище, до 1.5 м в длину, со сдавленно цилиндрическими, дихотомически и неправильно разветвленными мясистыми ветвями, без срединной жилки, с крупными одиночными пузырями.

Развитие воздушных полостей у *F. distichus* происходит как метаморфоз кончиков ранее недифференцированных ветвей. Возможно, не случайно воздушные полости у *F. distichus* парные по обе стороны от срединной жилки, так что транспорт питательных веществ, нарастающий в направлении от вершины к основанию, не затрудняется. Отсутствие средней жилки и равномерно расположенные воздушные пузыри у *A. nodosum* предполагают, что передвижение веществ происходит медленнее, каждый сегмент таллома должен быть фотосинтетически самостоятельным. Допускают, что транспорт веществ у *A. nodosum* апопластический (Penot, Penot, 1977) и не осуществляется на большие расстояния по таллосу (Kim, Garbary, 2009).

У рассматриваемых видов водорослей присутствуют две существенно отличающиеся физиологические стратегии. Для *A. nodosum* характерны медленный рост и размножение, жизненный цикл составляет 10–15 лет (Кузнецов, 1960; Eckersley, Garbary 2007), ткани остаются фотосинтетически активными в течение многих лет (Kim, Garbary, 2009). Этот вид формирует густые заросли, которые служат убежищем для множества морских организмов. *Fucus distichus* растет и размножается быстрее, средняя продолжительность жизни 3 года (Кашутин, 2021), устойчив к сильным волнам благодаря плоской и жесткой структуре. Рецептакулы аскофиллума развиваются по бокам ветвей на специальных коротких веточках, у фукуса они вытянутые, уплощенные, развиваются на концах ветвей.

Бурые водоросли являются продуцентами биологически активных веществ (БАВ), качественные и количественные характеристики которых изменяются в зависимости от видовой принадлежности, условий произрастания (таблица).

Содержание БАВ в водорослях из различных местообитаний, % от а.с.м.
Content of biologically active substances in *Ascophyllum nodosum* and *Fucus distichus*
from different habitats, % dry weight (DW)

Вещество	<i>Ascophyllum nodosum</i>	<i>Fucus distichus</i>	Литературный источник
Фукоидан	10.0–14.8	14.6–21.5	Клиндух, Облучинская, 2013; Облучинская, Рыжик, 2014; Catarino et al., 2018
Альгинат	11.2–33.0	9.6–23.6	Репина, 2005; Облучинская, Рыжик, 2014; Catarino et al., 2018
Полифенолы	1.3–14.8	1.6–7.1	Клиндух, Облучинская, 2013; Ткач, Облучинская, 2017
Общая зола	15.6–25.0	15.0–25.0	Облучинская, Рыжик, 2014; Лобус, Удалов, 2021
Йод	0.03–0.11	0.06–0.16	Репина, 2005; Облучинская, 2005; Облучинская, Рыжик, 2014
Маннит	5.0–12.0	8.7–11.6	Клиндух, Облучинская, 2013; Облучинская, Рыжик, 2014; Arctic ..., 2023
Азотсодержащие вещества	4.7–9.0	5.9–9.8	Клиндух, Облучинская, 2013; Лобус, Удалов, 2021
Липиды	0.4–2.9	1.6–3.2	Репина, 2005; Khotimchenko et al., 2002; Лобус, Удалов, 2021

Минеральный состав бурых водорослей зависит от экологических, географических и физиологических факторов. Кроме йода, водоросли содержат Se, Zn, Mn и Cu, которые являются компонентами некоторых антиоксидантных ферментов и могут усиливать их действие (Moenne et al., 2016), т. е. играют эссенциальную роль. Помимо этого, водоросли аккумулируют и токсичные элементы, такие как Pb, Cd, Hg, As, длительное воздействие которых может привести к метаболическим повреждениям, особенно в темпах роста и эффективности фотосинтеза водорослей. Эти изменения можно объяснить перенаправлением энергии на защитные пути, уменьшением органелл и синтеза структурных веществ, а также окислением фотосинтетических пигментов (Heavy ..., 2003; Photoacclimation ..., 2014; Marine ..., 2017).

На клеточном уровне морские водоросли обладают множеством механизмов для удержания потенциально токсичных ионов металлов загрязняющих веществ из морской воды. Общеизвестно, что первой линией защиты от токсичности металлов служит клеточная стенка (Salgado et al., 2005). Основными компонентами клеточных стенок бурых водорослей являются альгинат и фукоидан. Эти полисахариды, благодаря своим уникальным свойствам, широко используются в промышленности (Облучинская, 2005). Морские водоросли с большим количеством отрицательно заряженных групп (сульфатные группы фукоидана и карбоксильные группы альгината) в клеточной стенке накапливают больше металлов (Andrade et al., 2010). В ответ на токсичность элементов морские водоросли могут увеличивать количество биомолекул с отрицательным зарядом, что является выгодным свойством для промышленности при условии отсутствия превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) элементов. Также было показано, что альгинат возможно использовать для удаления из потоков сточных вод загрязняющих веществ, связанных с металлами, включая Pb, Cu²⁺, Cd²⁺. Кроме этого, данные металлы могут быть извлечены из получаемого альгинатного геля путем прокалывания при повышенных температурах, в результате чего образуется нанопорошок оксида металла (Quantitative ..., 2024). Особую группу составляют комплексы полисахаридов и металлов, которые используются в медицине в качестве лекарственных веществ, нашли применение в рентгенологии, а также применяются для создания мембран (Сибикина и др., 2009).

Известно, что фукоиды для защиты от повреждающего действия токсичных элементов выделяют полифенольные соединения, которые хелатируют металлы, тем самым уменьшая накопление и поглощение их клетками. Установлено, что природные полифенольные соединения обладают противовоспалительным действием, которое в значительной степени обусловлено их антиоксидантными свойствами. Комплексование с ионами металлов водорослевых полисахаридов существенно усиливает противовоспалительную активность полифенолов. Металлокомплексы полифенолов являются перспективными соединениями для создания новых средств профилактики и терапии свободнорадикальных патологий разной этиологии и локализации (Комплексы ..., 2016).

Следует отметить, что в настоящее время во многих исследовательских работах обсуждается мультиметаллическая биосорбция, описывающая механизм одновременного связывания широкого набора элементов с клеточной стенкой водорослей. Предложено много моделей оценки способности водорослей к биосорбции, но универсальная модель до сих пор не разработана (Особенности ..., 2023).

Ранее нами были обнаружены взаимосвязи накопления некоторых БАВ с аккумуляцией 12 элементов в талломах бурых водорослей *F. distichus* из морей Баффина, Норвежского и Баренцева (Облучинская и др., 2023) и *A. nodosum* из морей Ирмингера, Норвежского и Баренцева (Даурцева и др., 2024).

Цель данной работы – определение и сравнение содержания полисахаридов (альгината и фукоидана), полифенолов и элементов у *A. nodosum* и *F. distichus* из Норвежского и Баренцева морей.

Материал и методы

Образцы бурых водорослей *F. distichus* и *A. nodosum* были собраны в прибрежных зонах Норвежского и Баренцева морей.

Содержание альгината определяли путем проведения реакции с 3,5-диметилфенолом и серной кислотой, оптическая плотность измерялась при 400 и 450 нм (Usov et al., 1995). В качестве стандартного образца применяли альгинат натрия (Sigma-Aldrich, Китай).

Для обнаружения фукоидана образцы морских водорослей обрабатывали по методике (Usov et al., 2001) с использованием цистеин-серноокислотного метода (Dische, Shettles, 1948); стандартом служила L-фукоза (Sigma-Aldrich, США).

Полифенолы в экстрактах водорослей определяли спектрофотометрически при 750 нм с применением реагента Фолина-Чокальтеу согласно общепринятой методике (Van Alstyne, 1995). В качестве стандарта использовали флороглюцин (Sigma-Aldrich, Германия).

Для проведения элементного анализа образцы бурых водорослей были обработаны по методу (Phytochemical ..., 2018). Элементы анализировали на оптико-эмиссионном спектрофотометре с индуктивно связанной плазмой PerkinElmer® Optima™8000 (ICP-OES) (PerkinElmer, Inc., Шелтон, Коннектикут, США). Подробности методики описаны ранее (The biochemical ..., 2022; Ascophyllum ..., 2024).

Все измерения проведены в трехкратной повторности, а результаты выражены в миллиграммах на 1 г абсолютного сухого вещества водорослей (а.с.м.).

Данные были логарифмически преобразованы и проверены с использованием теста нормальности Шапиро-Уилка. О наличии связей между содержанием соединений судили при критическом уровне достоверности $p < 0.05$. Статистический анализ и линейный коэффициент корреляции Пирсона r вычисляли с использованием программного обеспечения Statistica. Для расчетов и построения графиков использовали программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Сведения о количестве в *A. nodosum* альгината, фукоидана и полифенолов, а также корреляции различных элементов с этими БАВ в *F. distichus* и *A. nodosum* представлены в работах (Облучинская и др., 2023; Ascophyllum ..., 2024; Даурцева и др., 2024). Среднее содержание БАВ в *F. distichus* и *A. nodosum* из двух арктических морей показано на диаграммах (рис. 2).

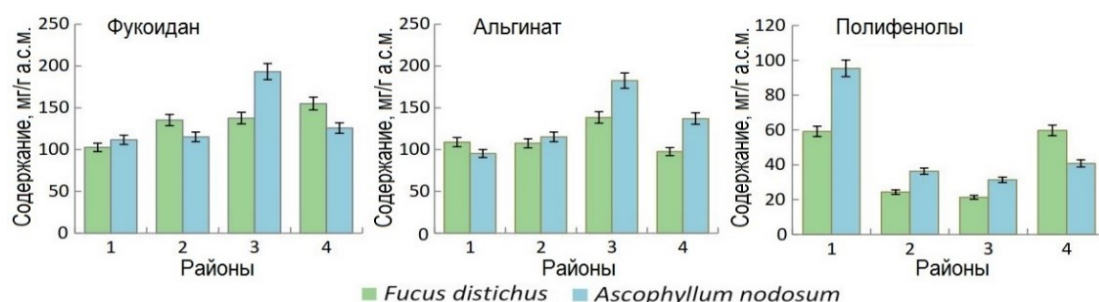


Рис. 2. Среднее содержание БАВ в образцах *A. nodosum* и *F. distichus* из разных районов Арктики:

1 – о. Рингвайсёйя (Норвежское море), 2 – бухта Корабельная (Баренцево море), 3 – бухта Завалишина (Баренцево море), 4 – губа Зеленецкая (Баренцево море)

Fig. 2. Average content of biologically active substances in *A. nodosum* and *F. distichus* samples from different regions of the Arctic:

1 – Ringvaysøya Island (Norwegian Sea), 2 – Korabelnaya Bay (Barents Sea), 3 – Zavalishina Bay (Barents Sea), 4 – Zelenetskaya Bay (Barents Sea)

Полученные данные показывают, что по содержанию фукоидана оба представителя бурых водорослей отличаются незначительно, исключением являются образцы из бухты Завалишина, где *A. nodosum* содержит в 1.4 раза больше данного соединения, чем *F. distichus*. В образцах водорослей из Норвежского моря содержание фукоидана ниже (100–110 мг/г а.с.м.), чем из Баренцева моря (110–190 мг/г а.с.м.).

Количество альгината у *A. nodosum*, обитающего в районах Баренцева моря в среднем в 1.5 раза выше, чем у *F. distichus* из тех же местообитаний. Фукоиды Норвежского моря содержат меньше альгинатов (95–108 мг/г а.с.м.), чем из бухт Корабельная и Завалишина (107–182 мг/г а.с.м.).

Общее содержание полифенолов в *A. nodosum* выше в среднем в 1.4 раза, за исключением водорослей из губы Зеленецкая – там полифенолов больше в 1.7 раза у *F. distichus*. В водорослях Норвежского моря отмечено более высокое содержание полифенолов (59–95 мг/г а.с.м.), чем у фукоидов Баренцева моря (21–59 мг/г а.с.м.). Относительно накопления элементов отметим, что *F. distichus* в среднем содержит больше Sr (в 1.3 раза), Fe (в 2.2 раза), Ba (в 1.5 раза) и Mn (в 3.4 раза), чем *A. nodosum* (рис. 3).

Полученные результаты показывают, что для исследуемых водорослей доминирующими элементами являются Ca и Mg – эссенциальные металлы. Магний входит в состав хлорофилла, участвует в фотосинтезе, активации ферментов и стабилизации мембран. Кальций важен для структуры клеточных стенок, является неотъемлемым звеном молекул альгинатов.

Содержание токсичных элементов, таких как As, Ba и Al, в талломах исследуемых водорослей не превышало нормативные требования к токсикологическому профилю водорослей.

При построении корреляционных матриц для двух видов макрофитов (рис. 4) и отдельным данным для каждого вида (рисунки 5 и 6) выявлены статистически значимые корреляции.

Можно отметить, что для всех образцов единым является наличие значимой корреляции между As и Ba ($r = 0.61$ для двух видов, $r = 0.99$ для *F. distichus*, $r = -0.84$ для *A. nodosum* при $p < 0.05$). Эти два элемента могут одновременно присутствовать в морской воде и водорослях, но данных об их специфическом взаимодействии и механизмах накопления мало. В водорослях механизмы их поглощения различны: мышьяк чаще усваивается в виде анионов, а барий – в виде катионов, поэтому конкуренции между ними, вероятно, нет.

Мышьяк обычно поглощается аналогично фосфору и может преобразовываться в различные химические соединения (Speciation ..., 2024; Sadee et al., 2024). Бурые водоросли легко поглощают арсенат, принимая его за структурный аналог фосфата, особенно в морской воде, где фосфата мало (Taş, Ak, 2024).

Барий в малых количествах присутствует практически во всех организмах, причем в разных тканях его содержание может быть различным (Леин, Кравчишина, 2020). Поглощение этого элемента связано как с конвективным переносом, так и с обменной диффузией. Его потребление во многом зависит от реакции среды: с подкислением этот процесс возрастает, а подщелачивание, наоборот, ограничивает его. В процессах метаболизма барий ведет себя подобно кальцию (Агрохимии ..., 2020).

Различия в вариациях корреляций могут быть вызваны физиологическими различиями у видов макроводорослей, которые включают фотосинтез, скорость роста и усвоение питательных веществ (Villares et al., 2017).

Для *F. distichus* видоспецифичными оказались корреляции содержания фукоидана с Mg ($r = -0.98$), альгината с Ca ($r = 0.99$), полифенолов с Zn ($r = -0.99$ при $p < 0.05$), Mg с Cu ($r = 0.98$ при $p < 0.05$), Fe с Al ($r = 0.99$ при $p < 0.05$), Co с Zn ($r = 0.95$ при $p < 0.05$). Для *A. nodosum* выявлены корреляции содержания полифенолов с альгинатом, фукоиданом, Ca, Al, As ($r = -0.87$, $r = -0.72$, $r = 0.75$, $r = 0.92$, $r = 0.84$ соответственно при $p < 0.05$); альгината с фукоиданом, Al, As, Ba, Co ($r = 0.92$, $r = -0.82$, $r = -0.93$, $r = 0.91$, $r = -0.79$ соответственно при $p < 0.05$); фукоидана с As, Ba, Sr ($r = -0.85$, $r = 0.97$, $r = 0.75$ соответственно при $p < 0.05$); Ba, Co и Rb коррелируют друг с другом попарно ($r = 0.76$ для Ba и Rb, $r = -0.75$ для Ba и Co, $r = -0.87$ для Rb и Co при $p < 0.05$).

Обеспеченность растений тем или иным элементом зависит не только от его содержания в окружающей среде, но и от взаимоотношений с другими элементами (Спицына и др., 2014). В литературе есть данные, свидетельствующие о взаимосвязи элементов друг с другом и с БАВ (Seasonal ..., 2021; Todorov et al., 2022; Wegeberg et al., 2023; Особенности ..., 2023). Одновременное воздействие нескольких металлов может изменять сорбцию и накопление определенных элементов (Variation ..., 2012). Причины различных моделей накопления до конца не ясны, но, вероятно, связаны с некоторыми физико-химическими и биологическими факторами.

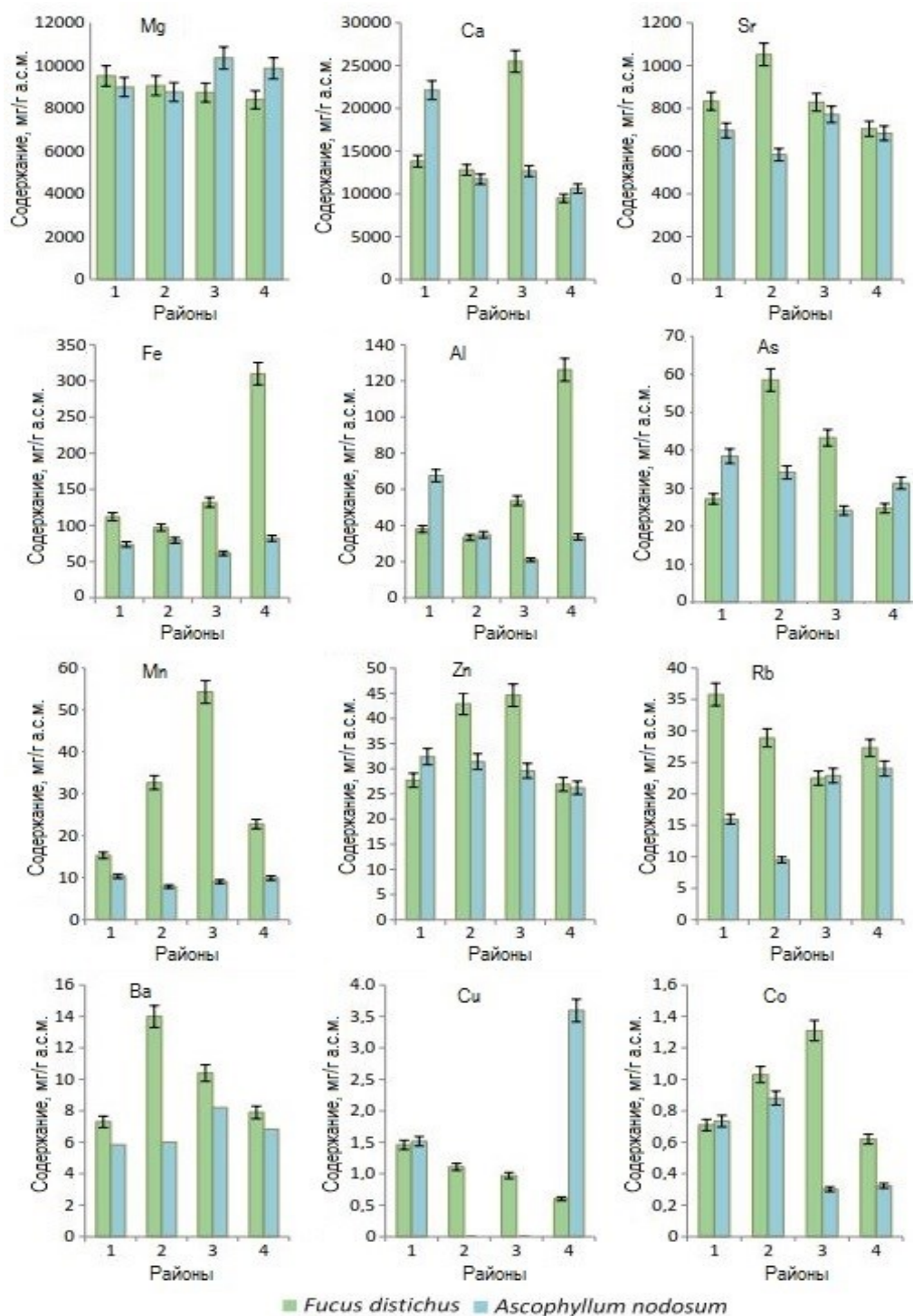


Рис. 3. Среднее содержание элементов в образцах *A. nodosum* и *F. distichus* из разных районов Арктики: 1 – о. Рингвайсёя (Норвежское море), 2 – бухта Корабельная (Баренцево море), 3 – бухта Завалишина (Баренцево море), 4 – губа Зеленецкая (Баренцево море)
Fig. 3. Average content of elements in *A. nodosum* and *F. distichus* samples from different regions of the Arctic: 1 – Ringvaysøya Island (Norwegian Sea), 2 – Korabelnaya Bay (Barents Sea), 3 – Zavalishina Bay (Barents Sea), 4 – Zelenetskaya Bay (Barents Sea)

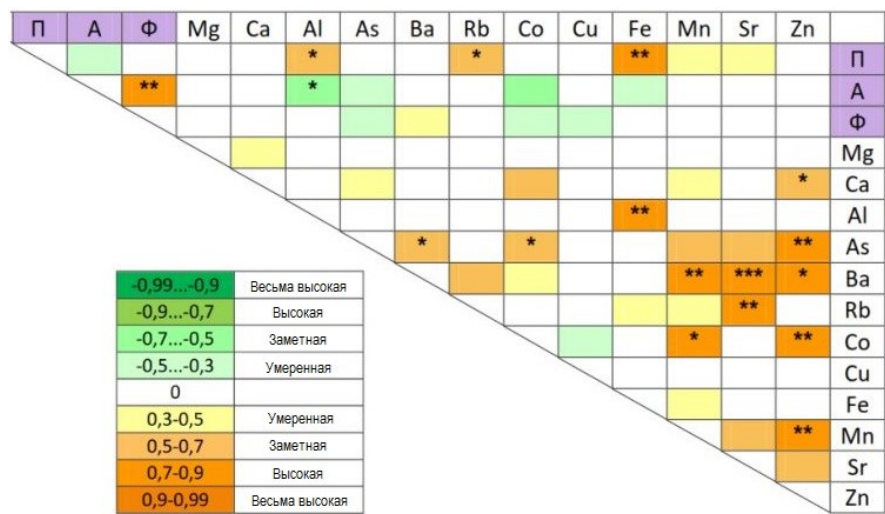


Рис. 4. Матрица, показывающая коэффициенты корреляции Пирсона между элементами и БАВ (П – полифенолы, А – альгинат, Ф – фукоидан) во всех образцах *F. distichus* и *A. nodosum*
Fig. 4. Correlation matrix showing the Pearson correlation coefficients between elements and biologically active substances (П – polyphenols, А – alginate, Ф – fucoidan) in all samples of *F. distichus* and *A. nodosum*

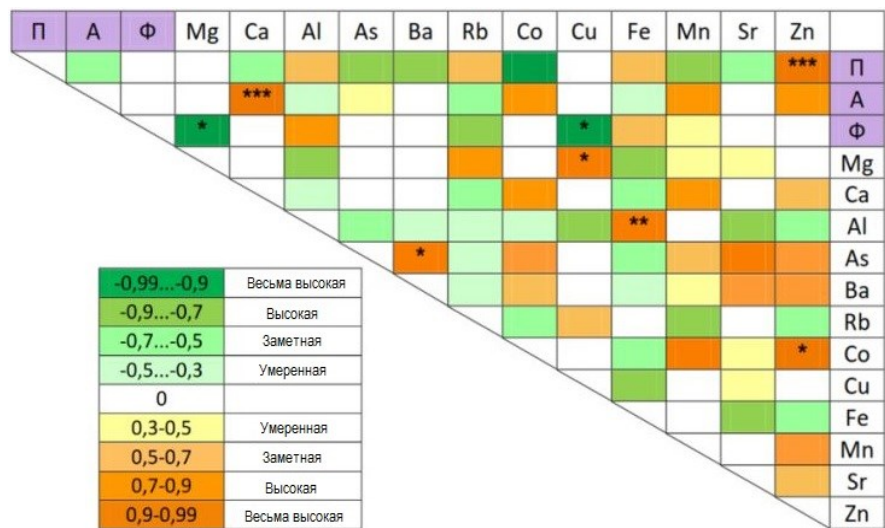


Рис. 5. Матрица, показывающая коэффициенты корреляции Пирсона между элементами и БАВ (П – полифенолы, А – альгинат, Ф – фукоидан) во всех образцах *F. distichus*
Fig. 5. Correlation matrix showing the Pearson correlation coefficients between elements and biologically active substances (П – polyphenols, А – alginate, Ф – fucoidan) in all *F. distichus* samples

Как видно из данных рис. 3, *F. distichus* в среднем накапливает больше металлов и элементов. Не исключено, что межвидовые различия в аккумуляции элементов связаны с относительной скоростью роста рассматриваемых фукоидов (Villares et al., 2017). *Fucus distichus* характеризуется более быстрым ростом, что может приводить к более интенсивному поглощению элементов из воды за короткий период (Лобус, Удалов, 2021). Продолжительность жизни *A. nodosum* составляет до 10–15 лет, что способствует длительному накоплению элементов в его тканях. Так, в сравнительном исследовании разных видов бурых водорослей Баренцева моря (Rapova et al., 2024) установлено, что *A. nodosum* является лидером среди других фукоидов по накоплению редкоземельных металлов.

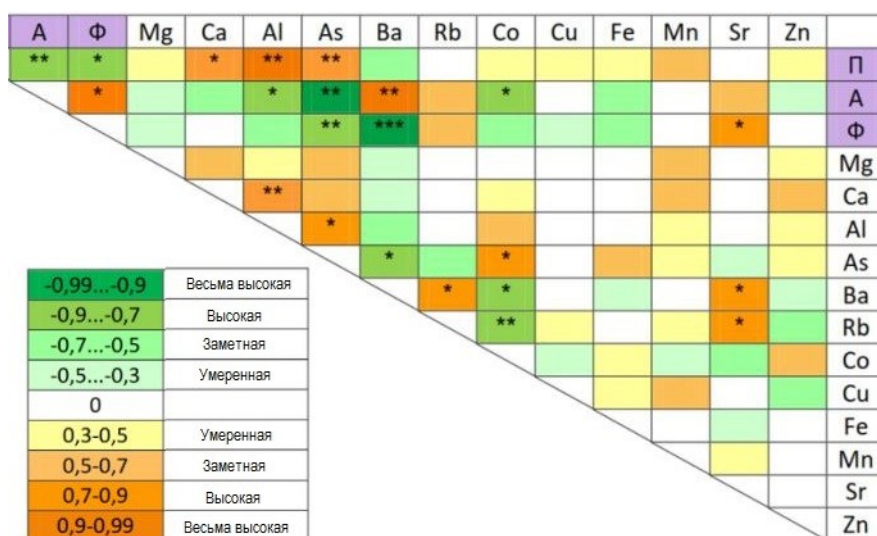


Рис. 6. Матрица, показывающая коэффициенты корреляции Пирсона между элементами и БАВ (П – полифенолы, А – альгинат, Ф – фукоидан) во всех образцах *A. nodosum*

Fig. 6. Correlation matrix showing the Pearson correlation coefficients between elements and biologically active substances (П – polyphenols, А – alginate, Ф – fucoidan) in all *A. nodosum* samples

Бурые водоросли способны избирательно накапливать металлы и микроэлементы, которые необходимы для их метаболизма (например, железо, цинк), но также пассивно адсорбировать токсичные элементы (Щукин, 2024). Одним из наиболее токсичных элементов является мышьяк (Таş, Ак, 2024). Бурые водоросли поглощают мышьяк из морской воды за счет эффективных механизмов абсорбции, что приводит к более высоким его концентрациям, чем в наземных растениях и других классах водорослей (Total ..., 2018). Эта способность в первую очередь связана с такими соединениями как альгинаты (Muñoz, Díaz, 2022), а также со схожестью ионов арсената и фосфата, в результате чего накопление мышьяка происходит по тому же механизму, как и усвоение соединений фосфора (Особенности ..., 2023). При этом известно, что *A. nodosum* очень часто живет в постоянном симбиозе с эндофитным грибом *Mycophycias ascophyllii* (Deckert, Garbary, 2005). Предполагается, что микобионт стимулирует поглощение минеральных элементов, в частности фосфора (Тараховская, Маслов, 2010).

Учитывая корреляционные связи элементов с другими компонентами в бурых водорослях, можно предположить местоположение металлов в клетке. Знание о том, связаны ли металлы внеклеточно (обратимо) или иммобилизованы внутри клеток, может быть важно, например, при биомониторинге с применением водорослей (Do we know ..., 2023). Известно, что внеклеточная фракция состоит из элементов, связанных с отрицательно заряженными функциональными группами в клеточной стенке и/или на внешней поверхности плазматической мембраны. Эти группы можно найти в полисахаридах, которые преобладают на поверхности клеток водорослей, таких как альгинаты и фукоиданы (Salgado et al., 2005). Внутри клетки металл может быть прикреплен к внутренней стороне плазматической мембраны, растворен в цитоплазме или находиться в органеллах. В бурых водорослях металлы часто обнаруживаются в физодах, в определенном типе вакуолей, где также накапливаются фенольные соединения (Salgado et al., 2005).

Есть исследования, доказывающие соответствие разницы содержания полифенолов и тяжелых металлов, а также селективность полифенолов к цинку (Myklestad et al., 1978). Известно, что изменения в молекулярной конформации альгиновой кислоты происходят из-за различия в их сродстве к металлам. Так А. Хауг (Haug, 1967) обнаружил, что альгинаты, богатые гулуриновой кислотой, имеют большее сродство к двухвалентным металлам в реакциях ионного обмена кальций–натрий, медь–натрий и барий–натрий, чем альгинаты, богатые маннуроновой кислотой.

Процессы, в ходе которых металлы накапливаются в водорослях, все еще недостаточно изучены. Поглощение металлов водорослями, вероятно, зависит от их формы в окружающей среде и имеет видовые различия.

Морские водоросли быстро растут, поглощая элементы из воды. У разных видов водорослей биологическая потребность в элементах различна, им свойственны разные механизмы абсорбции из морской воды и уникальные способы аккумуляции в тканях, влияние может оказывать и стадия репродуктивного цикла водорослей (Даурцева и др., 2024).

Взаимосвязь накопления БАВ и элементов в бурых водорослях, таких как *A. nodosum* и *F. distichus*, является сложной и многогранной. Эти водоросли обладают уникальной способностью накапливать как полезные, так и потенциально токсичные элементы, а также синтезировать ценные полисахариды (альгинаты, фукоиданы). Накопление металлов и БАВ взаимосвязано через физиологические процессы, такие как защита от окислительного стресса, регуляция метаболизма и адаптация к условиям окружающей среды.

Выводы

Установлено, что в Баренцевом море у *A. nodosum* содержание альгината в среднем в 1.5 раза выше, чем у *F. distichus*, фукоидана – практически не отличается (исключение *A. nodosum* из бухты Завалишина – в 1.4 раза выше), полифенолов – в среднем выше в 1.4 раза (исключение *F. distichus* из губы Зеленецкая – в 1.7 раза больше).

У водорослей *F. distichus*, по сравнению с *A. nodosum*, в среднем выше концентрация Sr – в 1.3 раза, Fe – в 2.2 раза, Ba – в 1.5 раза и Mn – в 3.4 раза.

Впервые выявлена сильная корреляционная связь содержания Ba с As у обоих видов ($r = -0.84$ для *A. nodosum* и $r = 0.99$ для *F. distichus* при $p < 0.05$), фукоидана с Mg и Cu для *F. distichus* ($r = -0.98$ и $r = -0.97$ соответственно при $p < 0.05$) и с As, Ba, Sr для *A. nodosum* ($r = -0.85$, $r = 0.97$, $r = 0.75$ соответственно при $p < 0.05$), альгината с Ca ($r = -0.99$ при $p < 0.05$) для *F. distichus* и с фукоиданом, Al, As, Ba, Co для *A. nodosum* ($r = 0.92$, $r = -0.82$, $r = -0.93$, $r = 0.91$, $r = -0.79$ соответственно при $p < 0.05$), полифенолов с Zn для *F. distichus* ($r = 0.71$ при $p < 0.05$) и с альгинатом, фукоиданом, Ca, Al, As для *A. nodosum* ($r = -0.87$, $r = -0.72$, $r = 0.75$, $r = 0.92$, $r = 0.84$ соответственно при $p < 0.05$).

Взаимосвязь накопления полисахаридов, полифенолов и элементов в бурых водорослях является сложной и многогранной. *Fucus distichus* характеризуется более быстрым ростом и транспортом питательных веществ (способствует наличие средней жилки) по сравнению с имеющим более длительный жизненный цикл *A. nodosum*. Это может приводить к более интенсивному поглощению некоторых элементов, влияющих на синтез полифенолов и полисахаридов.

Знание корреляционных взаимосвязей металлов и биоактивных веществ в бурых водорослях может стать основой для разработки инновационных решений в экологии, медицине, пищевой промышленности и других областях.

Работа выполнена по теме «Природоподобные технологии в извлечении биологически активных веществ водорослей и беспозвоночных Арктики, фундаментальные и практические аспекты» (№ госрегистрации 124013000732-7) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. *Агрохимия* биогенных элементов: учеб. пособие / А. Х. Шеуджен, Т. Н. Бондарева, И. А. Лебедевский, М. А. Осипов. Краснодар: КубГАУ, 2020. 223 с.
2. Даурцева А. В., Горшенина Е. В., Облучинская Е. Д. Сравнительное исследование элементов и биохимических компонентов стерильных и фертильных бурых водорослей *Ascophyllum nodosum* // Тр. Кольского науч. центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2024. Т. 3, № 3. С. 47–60.
3. Кашутин А. Н. Биология развития и экология бурой водоросли *Fucus distichus* в прибрежных водах Камчатки: Дис. ... канд. биол. наук. Петропавловск-Камчатский, 2021. 206 с.

4. Клиндох М. П., Облучинская Е. Д. Сравнительное исследование химического состава бурых водорослей *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum* // Вестн. МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 466–471.
5. Комплексы полифенолов с ионами металлов как потенциальные средства профилактики и лечения свободно-радикальных патологий / В. А. Костюк, А. И. Потапович, Г. С. Полухович, Т. В. Костюк, А. К. Будько // Кислород и свободные радикалы: Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 19–20 мая 2016 г. Гродно: Гродненский гос. мед. ун-т, 2016. С. 88–90.
6. Кузнецов В.В. Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 256 с.
7. Леин А. Ю., Кравчишина М. Д. Барий в океане: малые концентрации, но сильные эффекты // Природа. 2020. № 11(1263). С. 46–55.
8. Лобус Н. В., Удалов А. А. Химический состав бурых водорослей *Laminaria digitata* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813 и *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) из заливов архипелага Новая Земля (Карское море) // Биол. моря. 2021. Т. 47, № 5. С. 359–364.
9. Облучинская Е. Д. Технологии лекарственных и лечебно-профилактических средств из бурых водорослей. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. 164 с.
10. Облучинская Е. Д., Рыжик И. В. Изучение слоевищ фукусовых водорослей // Фармация. 2014. № 2. С. 19–21.
11. Облучинская Е. Д., Горшенина Е. В., Пожарицкая О. Н. Влияние географического положения мест сбора арктического *Fucus distichus* L. на накопление металлов и полисахаридов // Фундаментальная гликобиология – 2023: Матер. VI Всерос. конф., Мурманск, 11–15 сентября 2023 г. Мурманск: Изд-во МАУ, 2023. С. 92.
12. Особенности элементного состава ламинарии слоевищ (*Laminariae thalli*) различного происхождения / В. М. Щукин, Е. А. Хорольская, Н. Е. Кузьмина, И. П. Ремезова, В. В. Косенко // Ведомости Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. 2023. Т. 13, № 2. С. 154–172.
13. Ретина О. И. Обоснование и разработка технологии биологически активных веществ из фукусовых водорослей Белого моря: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 24 с.
14. Сибикина О. В., Иозеп А. А., Москвин А. В. Комплексы полисахаридов с катионами металлов: применение и строение (обзор) // Химико-фармацевтический журн. 2009. Т. 43, № 6. С. 35–39.
15. Спицына С. Ф., Томаровский А. А., Оствальд Г. В. Проявление синергизма и антагонизма между ионами меди, цинка и марганца при поступлении их в растения // Вестн. Алтайского гос. аграр. ун-та. 2014. Т. 120, № 10. С. 29–32.
16. Тараховская Е. Р., Маслов Ю. И. Специфика усвоения маннита у *Fucus vesiculosus* L. и *Ascophyllum nodosum* (L.) le Jolis (*Phaeophyta*) // Biol. Commun. 2010. № 2. С. 75–81.
17. Ткач А. В., Облучинская Е. Д. Стерины и полифенолы фукоидов Мурманского побережья Баренцева моря // Вестн. МГТУ. 2017. Т. 20, № 2. С. 326–335.
18. Шошина Е. В., Капков В. И. Экологические особенности промысловых фукусовых водорослей Мурманского побережья Баренцева моря // Вестн. МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 180–189.
19. Щукин В. М. Особенности накопления элементарных токсикантов в слоевищах ламинарии *Laminariae thalli* различного происхождения и продуктах на их основе: Автореф. дис. ... канд. фарм. наук. Пермь, 2024. 24 с.
20. Andrade S., Pulido M. J., Correa J. A. The effect of organic ligands exuded by intertidal seaweeds on copper complexation // Chemosphere. 2010. Vol. 78(4). P. 397–401.
21. Arctic edible brown alga *Fucus distichus* L.: biochemical composition, antiradical potential and human health risk / E. D. Obluchinskaya, O. N. Pozharitskaya, E. V. Gorshenina et al. // Plants. 2023. Vol. 12, № 12. P. 1–18.
22. *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis from Arctic: Its biochemical composition, antiradical potential, and human health risk / E. D. Obluchinskaya, O. N. Pozharitskaya, E. V. Gorshenina, A. V. Daurtseva, E. V. Flisyuk, Y. E. Generalova, I. I. Terninko, A. N. Shikov // Mar. Drugs. 2024. Vol. 22, № 48. P. 1–22.

23. Catarino M. D., Silva A. M. S., Cardoso S. M. Phycochemical constituents and biological activities of *Fucus* spp. // Mar. Drugs. 2018. Vol. 16. P. 249.
24. Deckert R. J., Garbary D. J. *Ascophyllum* and its symbionts. VI. Microscopic characterization of the *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae), *Mycophycias ascophylli* (Ascomycetes) symbiotum // Algae. 2005. Vol. 20. P. 225–232.
25. Dische Z., Shettles L. B. A specific color reaction of methylpentoses and a spectrophotometric micromethod for their determination // J. Biol. Chem. 1948. Vol. 175. P. 595–603.
26. Do we know the cellular location of heavy metals in seaweed? An up-to-date review of the techniques / A. Vázquez-Arias, C. Pacín, Á. Ares, J. Á. Fernández, J. R. Aboal // Sci. Total Environ. 2023. Vol. 856, part 2, Article: 159215. P. 1–7.
27. Eckersley L., Garbary D. Developmental and environmental sources of variation on annual growth increments of *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae) // Algae. 2007. Vol. 22. P. 107–116.
28. Haug A. The affinity of some divalent metals to different types of alginates // Acta Chem. Scand. 1967. Vol. 15. P. 1794–1795.
29. Heavy metal-induced oxidative stress in algae / E. Pinto, T. C. S. Sigaud-Kutner, M. A. S. Leitão, O. K. Okamoto, D. Morse, P. Colepicolo // J. Phycol. 2003. Vol. 39. P. 1008–1018.
30. Khotimchenko S. V., Vaskovsky V. E., Titlyanova T. V. Fatty acids of marine algae from the pacific coast of North California // Bot. Mar. 2002. Vol. 45. P. 17–22.
31. Kim K. Y., Garbary D. J. Form, function and longevity in fucoid thalli: chlorophyll a fluorescence differentiation of *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *F. distichus* (Phaeophyceae) // Algae. 2009. Vol. 24(2). P. 93–104.
32. Marine metal pollution and effects on seaweed species / L. Contreras-Porcia, A. Meynard, C. López-Cristoffanini, N. Latorre, M. Kumar // Systems biology of marine ecosystems / M. Kumar, P. Ralph (Eds.). Springer, Cham, 2017. P. 35–48.
33. Moenne A., González A., Sáez C. A. Mechanisms of metal tolerance in marine macroalgae, with emphasis on copper tolerance in Chlorophyta and Rhodophyta // Aquat. Toxicol. 2016. Vol. 176. P. 30–37.
34. Muñoz I. L., Díaz N. D. Minerals in edible seaweed: Health benefits and food safety issues // Crit. Rev. Food Sci. Nut. 2022. Vol. 62(6). P. 1592–1607.
35. Myklestad S. M., Eide I., Melsom S. Exchange of heavy metals in *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. *in situ* by means of transplanting experiments // Environ. Pollut. 1978. Vol. 16. P. 277–284.
36. Panova E., Voskoboinikov G., Matishov G. Rare earth elements in fucus algae of the Barents Sea // Dokl. Earth Sci. 2024. Vol. 515, part 1. P. 490–493.
37. Penot M., Penot M. Quelques aspects originaux des transports à longue distance dans le thalle de *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (Phaeophyceae, Fucales) // Phycologia. 1977. Vol. 16. P. 339–347.
38. Photoacclimation responses of the brown macroalga *Sargassum cymosum* to the combined influence of UV radiation and salinity: cytochemical and ultrastructural organization and photosynthetic performance / L. K. Polo, M. R. L. Felix, M. Kreusch, D. T. Pereira, G. B. Costa, C. Simioni, L. C. Ouriques, F. Chow, F. Ramlov, M. Maraschin, Z. L. Bouzon, E. C. Schmidt // J. Photochem. Photobiol. 2014. Vol. 90(3). P. 560–573.
39. Phytochemical components and amino acid profile of brown seaweed *Durvillaea antarctica* as affected by air drying temperature / E. Uribe, A. Vega-Gálvez, N. Vargas, A. Pasten, K. Rodríguez, K. S. Ah-Hen // J. Food Sci. Technol. 2018. Vol. 55. P. 4792–4801.
40. Quantitative and qualitative saccharide analysis of North Atlantic brown seaweed by gas chromatography/mass spectrometry and infrared spectroscopy / C. Niemi, J. Takahashi, A. Gorzsás, F. G. Gentili // Int. J. Biol. Macromol. 2024. Vol. 254, part 3. Article: 127870. P. 1–8.
41. Sadee B. A., Galali Y., Zebari S. M. Recent developments in speciation and determination of arsenic in marine organisms using different analytical techniques. A review // RSC Adv. 2024. Vol. 14(30). P. 21563–21589.

42. Salgado L. T., Andrade L. R., Amado G. M. Localization of specific monosaccharides in cells of the brown alga *Padina gymnospora* and the relation to heavy-metal accumulation // *Protoplasma*. 2005. Vol. 225. P. 123–128.
43. Seasonal variation of the proximate composition, mineral content, fatty acid profiles and other phytochemical constituents of selected brown macroalgae / M. Garcia-Vaquero, G. Rajauria, M. Miranda, T. Sweeney, M. Lopez-Alonso, J. O'Doherty // *Mar. Drugs*. 2021. Vol. 19, № 204. P. 1–16.
44. Speciation analysis and toxicity evaluation of arsenolipids—an overview focusing on sea food / C. Li, J. Chen, Z. Wang, B. Song, K.-L. Cheung, J. Chen, R. Li, X. Liu, X. Jia, S.-Y. Zhong // *Arch. Toxicol.* 2024. Vol. 98(2). P. 409–424.
45. Taş E., Ak İ. Chapter 1. Arsenic in brown seaweeds: bioaccumulation, speciation, and health implications // *Marine and freshwater advances: ecology, nutrition, and technology*. Ankara: Iksad, 2024. P. 3–29.
46. The biochemical composition and antioxidant properties of *Fucus vesiculosus* from the Arctic region / E. D. Obluchinskaya, O. N. Pozharitskaya, D. V. Zakharov, E. V. Flisyuk, I. I. Terninko, Y. E. Generalova, I. E. Smekhova, A. N. Shikov // *Mar. Drugs*. 2022. Vol. 20, № 193. P. 1–19.
47. Todorov T. I., Wolle M. M., Conklin S. D. Distribution of 26 major and trace elements in edible seaweeds from the US market // *Chemosphere*. 2022. Vol. 294. P. 133651.
48. Total and inorganic arsenic contents in seaweeds: Absorption, accumulation, transformation and toxicity / Z. Ma, L. Lin, M. Wu, H. Yu, T. Shang, T. Zhang, M. Zhao // *Aquaculture*. 2018. Vol. 497. P. 49–55.
49. Usov A. I., Bilan M. I., Klochkova N. G. Polysaccharides of algae: 48. Polysaccharide composition of several calcareous red algae: Isolation of alginate from *Corallina pilulifera* P. et R. (Rhodophyta, Corallinaceae) // *Bot. Mar.* 1995. Vol. 38. P. 43–51.
50. Usov A. I., Smirnova G. P., Klochkova N. G. Polysaccharides of algae: 55. Polysaccharide composition of several brown algae from Kamchatka // *Russ. J. Bioorg. Chem.* 2001. Vol. 27. P. 395–399.
51. Van Alstyne K. L. A comparison of three methods for quantifying brown algal polyphenolic compounds // *J. Chem. Ecol.* 1995. Vol. 21. P. 45–58.
52. Variation in patterns of metal accumulation in thallus parts of *Lessonia trabeculata* (Laminariales; Phaeophyceae): implications for biomonitoring // C. A. Sáez, M. G. Lobos, E. C. Macaya, D. Oliva, W. Quiroz, M. T. Brown // *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7(11). P. 1–10.
53. Villares R., Carral E., Carballeira C. Differences in metal accumulation in the growing shoot tips and remaining shoot tissue in three species of brown seaweeds // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. Vol. 99. P. 372–379.
54. Wegeberg S., Søndergaard J., Geertz-Hansen O. Elements and sugars in kelp and fucoid species in Greenland, correlation and seasonality // *Algal Res.* 2023. Vol. 75. Article: 103240. P. 1–15.

References

1. Shpeudzen A. H., Bondareva T. N., Lebedovskiy I. A., Osipov M. A. *Agrokimiya biogennykh elementov* [Agrochemistry of biogenic elements: textbook. manual]. Krasnodar, Publ. KubGAU, 2020, 223 p. (In Russ.).
2. Daurtseva A. V., Gorshenina E. V., Obluchinskaya E. D. Sravnitel'noe issledovanie elementov i biokhimicheskikh komponentov steril'nykh i fertil'nykh burykh vodorosley *Ascophyllum nodosum* [Comparative study of the elements and biochemical components of sterile and fertile brown algae *Ascophyllum nodosum*]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Estestvennye i humanitarnye nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities], 2024, Vol. 3, No. 3, pp. 47–60 (In Russ.).
3. Kashutin A. N. *Biologiya razvitiya i ekologiya buroy vodorosli Fucus distichus v pribrezhnykh vodakh Kamchatki*. Diss. kand. biol. nauk [Development biology and ecology of the brown algae *Fucus distichus* in the coastal waters of Kamchatka. PhD (Biology) diss.]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2021, 206 p. (In Russ.).
4. Klindukh M. P., Obluchinskaya E. D. Sravnitel'noe issledovanie khimicheskogo sostava burykh vodorosley *Fucus vesiculosus* i *Ascophyllum nodosum* [Comparative study of the chemical composition of brown algae *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2013, Vol. 16, No. 3, pp. 466–471 (In Russ.).

5. Kostyuk V. A., Potapovich A. I., Polyukhovich G. S., Kostyuk T. V., Budko A. K. Kompleksy polifenolov s ionami metallov kak potentsial'nye sredstva profilaktiki i lecheniya svobodno-radikal'nykh patologiy [Complexes of polyphenols with metal ions as potential means of prevention and treatment of free radical pathologies]. *Kislород i svobodnye radikaly. Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Grodno, 19–20 maya 2016 goda* [Oxygen and free radicals. Collection of materials of the International scientific and practical conference, Grodno, May 19–20, 2016]. Grodno, Publ. Grodno State Medical University, 2016, pp. 88–90 (In Russ.).
6. Kuznetsov V. V. *Beloe more i biologicheskie osobennosti ego flory i fauny* [The White Sea and biological features of its flora and fauna]. Moscow, Publ. USSR Academy of Sciences, 1960, 256 p. (In Russ.).
7. Lein A. Yu., Kravchishina M. D. Bariy v okeane: malye kontsentratsii, no sil'nye efekty [Barium in the ocean: low concentrations, but strong effects]. *Priroda* [Nature], 2020, No. 11(1263), pp. 46–55 (In Russ.).
8. Lobus N. V., Udalov A. A. Khimicheskii sostav burykh vodorosley *Laminaria digitata* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813 i *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) iz zalivov arhipelaga Novaya Zemlya (Karskoe more) [Chemical composition of brown algae *Laminaria digitata* (Hudson) J. V. Lamouroux, 1813 and *Fucus distichus* (Linnaeus, 1767) from the bays of the Novaya Zemlya archipelago (Kara Sea)]. *Biologiya morya* [Marine Biology], 2021, Vol. 47, No. 5, pp. 359–364 (In Russ.).
9. Obluchinskaya E. D. *Tekhnologii lekarstvennykh i lechebno-profilakticheskikh sredstv iz burykh vodorosley* [Technologies of medicinal and therapeutic and prophylactic agents from brown algae]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2005, 164 p. (In Russ.).
10. Obluchinskaya E. D., Ryzhik I. V. Izuchenie sloevishch fukusovykh vodorosley [Study of thalli of fucus algae]. *Farmatsiya* [Pharmacy], 2014, No. 2, pp. 19–21 (In Russ.).
11. Obluchinskaya E. D., Gorshenina E. V., Pozharitskaya O. N. Vliianie geograficheskogo polozheniya mest sbora arkticheskogo *Fucus distichus* L. na nakoplenie metallov i polisakharidov [Influence of the geographical location of collection sites of arctic *Fucus distichus* L. on the accumulation of metals and polysaccharides]. *Fundamental'naya glikobiologiya – 2023: Materialy VI Vserossiyskoy konferentsii, Murmansk, 11–15 sentyabrya 2023 goda* [Fundamental glycobiology – 2023: Proc. VI All-Russian conference, Murmansk, September 11–15, 2023], Murmansk, Publ. MAU, 2023, p. 92 (In Russ.).
12. Shchukin V. M., Khorol'skaya E. A., Kuz'mina N. E., Remezova I. P., Kosenko V. V. Osobennosti elementnogo sostava laminarii sloevishch (*Laminariae thalli*) razlichnogo proiskhozhdeniya [Features of the elemental composition of *Laminaria thalli* of various origins]. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniya. Regulyatornye issledovaniya i ekspertiza lekarstvennykh sredstv* [Bulletin of the Scientific Center for Expertise of Medical Products. Regulatory studies and expertise of drugs], 2023, Vol. 13, No. 2, pp. 154–172 (In Russ.).
13. Repina O. I. *Obosnovanie i razrabotka tekhnologii biologicheskii aktivnykh veshchestv iz fukusovykh vodorosley Belogo morya. Avtoreferat diss. kand. tekhnol. nauk* [Justification and development of technology for biologically active substances from fucus algae of the White Sea. PhD (Technology) diss.], Moscow, 2005, 24 p. (In Russ.).
14. Sibikina O. V., Iozep A. A., Moskvina A. V. Kompleksy polisakharidov s kationami metallov: primeneniye i stroeniye (obzor) [Polysaccharide complexes with metal cations: application and structure (review)]. *Khimiko-farmatsevticheskiy zhurnal* [Chemical-pharmaceutical J.], 2009, Vol. 43, No. 6, pp. 35–39 (In Russ.).
15. Spitsyna S. F., Tomarovskiy A. A., Ostval'd G. V. Proyavleniye sinergizma i antagonizma mezhdu ionami medi, tsinka i margantsa pri postuplenii ikh v rasteniya [Manifestation of synergism and antagonism between copper, zinc and manganese ions upon their entry into plants]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agrarian University], 2014, Vol. 120, No. 10, pp. 29–32 (In Russ.).
16. Tarakhovskaya E. R., Maslov Yu. I. Spetsifika usvoeniya mannita v *Fucus vesiculosus* L. i *Ascophyllum nodosum* (L.) le Jolis (Phaeophyta) [Specificity of mannitol assimilation in *Fucus vesiculosus* L. and *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (Phaeophyta)]. *Biol. Commun.*, 2010, No. 2, pp. 75–81 (In Russ.).

17. Tkach A. V., Obluchinskaya E. D. Steriny i polifenoly fukoidov Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya [Sterols and polyphenols of fucoids of the Murmansk coast of the Barents Sea]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2017, Vol. 20, No. 2, pp. 326–335 (In Russ.).
18. Shoshina E. V., Kapkov V. I. Ekologicheskie osobennosti promyslovykh fukusovykh vodorosley Murmanskogo poberezh'ya Barentseva morya [Ecological features of commercial fucus algae of the Murmansk coast of the Barents Sea]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University], 2014, Vol. 17, No.1, pp. 180–189 (In Russ.).
19. Shchukin V. M. *Osobennosti nakopleniya elementnykh toksikantov v sloevishchakh laminarii Laminariae thalli razlichnogo proiskhozhdeniya i produktakh na ikh osnove. Avtoreferat diss. kand. farm. nauk* [Features of accumulation of elemental toxicants in thalli of kelp *Laminariae thalli* of various origins and products based on them. PhD (Pharmacy) diss.], Perm', 2024, 24 p. (In Russ.).
20. Andrade S., Pulido M. J., Correa J. A. The effect of organic ligands exuded by intertidal seaweeds on copper complexation. *Chemosphere*, 2010, Vol. 78(4), pp. 397–401.
21. Obluchinskaya E. D., Pozharitskaya O. N., Gorshenina E. V. et al. Arctic edible brown alga *Fucus distichus* L.: biochemical composition, antiradical potential and human health risk. *Plants*, 2023, Vol. 12, No. 12, pp. 1–18.
22. Obluchinskaya E. D., Pozharitskaya O. N., Gorshenina E. V., Daurtseva A. V., Flisyuk E. V., Generalova Y. E., Terninko I. I., Shikov A. N. *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis from Arctic: Its biochemical composition, antiradical potential, and human health risk. *Mar. Drugs*, 2024, Vol. 22, No. 48, pp. 1–22.
23. Catarino M. D., Silva A. M. S., Cardoso S. M. Phycochemical constituents and biological activities of *Fucus* spp. *Mar. Drugs*, 2018, Vol. 16, pp. 249.
24. Deckert R. J., Garbary D. J. *Ascophyllum* and its symbionts. VI. Microscopic characterization of the *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae), *Mycophycias ascophylli* (Ascomycetes) symbiotum. *Algae*, 2005, Vol. 20, pp. 225–232.
25. Dische Z., Shettles L. B. A specific color reaction of methylpentoses and a spectrophotometric micromethod for their determination. *J. Biol. Chem.*, 1948, Vol. 175, pp. 595–603.
26. Vázquez-Arias A., Pacín C., Ares Á., Fernández J. Á., Aboal J. R. Do we know the cellular location of heavy metals in seaweed? An up-to-date review of the techniques. *Sci. Total Environ.*, 2023, Vol. 856, part 2, Article: 159215, pp. 1–7.
27. Eckersley L., Garbary D. Developmental and environmental sources of variation on annual growth increments of *Ascophyllum nodosum* (Phaeophyceae). *Algae*, 2007, Vol. 22, pp. 107–116.
28. Haug A. The affinity of some divalent metals to different types of alginates. *Acta Chem. Scand.*, 1967, Vol. 15, pp. 1794–1795.
29. Pinto E., Sigaud-Kutner T. C. S., Leitão M. A. S., Okamoto O. K., Morse D., Colepicolo P. Heavy metal-induced oxidative stress in algae. *J. Phycol.*, 2003, Vol. 39, pp. 1008–1018.
30. Khotimchenko S. V., Vaskovsky V. E., Titlyanova T. V. Fatty acids of marine algae from the pacific coast of North California. *Bot. Mar.*, 2002, Vol. 45, pp. 17–22.
31. Kim K. Y., Garbary D. J. Form, function and longevity in fucoid thalli: chlorophyll *a* fluorescence differentiation of *Ascophyllum nodosum*, *Fucus vesiculosus* and *F. distichus* (Phaeophyceae). *Algae*, 2009, Vol. 24(2), pp. 93–104.
32. Contreras-Porcia L., Meynard A., López-Cristoffanini C., Latorre N., Kumar M. Marine metal pollution and effects on seaweed species / M. Kumar, P. Ralph (Eds.). *Systems biology of marine ecosystems*. Springer, Cham, 2017, pp. 35–48.
33. Moenne A., González A., Sáez C. A. Mechanisms of metal tolerance in marine macroalgae, with emphasis on copper tolerance in Chlorophyta and Rhodophyta. *Aquat. Toxicol.*, 2016, Vol. 176, pp. 30–37.
34. Muñoz I. L., Díaz N. D. Minerals in edible seaweed: Health benefits and food safety issues. *Crit. Rev. Food Sci. Nut.*, 2022, Vol. 62(6), pp. 1592–1607.

35. Myklestad S. M., Eide I., Melsom S. Exchange of heavy metals in *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. *in situ* by means of transplanting experiments. Environ. Pollut., 1978, Vol. 16, P. 277–284.
36. Panova E., Voskoboynikov G., Matishov G. Rare earth elements in fucus algae of the Barents Sea. Dokl. Earth Sci., 2024, Vol. 515, part 1, pp. 490–493.
37. Penot M., Penot M. Quelques aspects originaux des transports à longue distance dans le thalle de *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis (Phaeophyceae, Fucales). Phycologia, 1977, Vol. 16, pp. 339–347.
38. Polo L. K., Felix M. R. L., Kreusch M., Pereira D. T., Costa G. B., Simioni C., Ouriques L. C., Chow F., Ramlov F., Maraschin M., Bouzon Z. L., Schmidt E. C. Photoacclimation responses of the brown macroalga *Sargassum cymosum* to the combined influence of UV radiation and salinity: cytochemical and ultrastructural organization and photosynthetic performance. J. Photochem. Photobiol., 2014, Vol. 90(3), pp. 560–573.
39. Uribe E., Vega-Gálvez A., Vargas N., Pasten A., Rodríguez K., Ah-Hen K. S. Phytochemical components and amino acid profile of brown seaweed *Durvillaea antarctica* as affected by air drying temperature. J. Food Sci. Technol., 2018, Vol. 55, pp. 4792–4801.
40. Niemi C., Takahashi J., Gorzsás A., Gentili F. G. Quantitative and qualitative saccharide analysis of North Atlantic brown seaweed by gas chromatography/mass spectrometry and infrared spectroscopy. Int. J. Biol. Macromol., 2024, Vol. 254, part 3, Article: 127870, pp. 1–8.
41. Sadee B. A., Galali Y., Zebari S. M. Recent developments in speciation and determination of arsenic in marine organisms using different analytical techniques: A review. RSC Adv., 2024, Vol. 14(30), pp. 21563–21589.
42. Salgado L. T., Andrade L. R., Amado G. M. Localization of specific monosaccharides in cells of the brown alga *Padina gymnospora* and the relation to heavy-metal accumulation. Protoplasma, 2005, Vol. 225, pp. 123–128.
43. Garcia-Vaquero M., Rajauria G., Miranda M., Sweeney T., Lopez-Alonso M., O'Doherty J. Seasonal variation of the proximate composition, mineral content, fatty acid profiles and other phytochemical constituents of selected brown macroalgae. Mar. Drugs., 2021, Vol. 19, No. 204, pp. 1–16.
44. Li C., Chen J., Wang Z., Song B., Cheung K.-L., Chen J., Li R., Liu X., Jia X., Zhong S.-Y. Speciation analysis and toxicity evaluation of arsenolipids—an overview focusing on sea food. Arch. Toxicol., 2024, Vol. 98(2), pp. 409–424.
45. Taş E., Ak İ. Chapter 1. Arsenic in brown seaweeds: bioaccumulation, speciation, and health implications. Marine and freshwater advances: ecology, nutrition, and technology, Ankara, Iksad, 2024, pp. 3–29.
46. Obluchinskaya E. D., Pozharitskaya O. N., Zakharov D. V., Flisyuk E. V., Terninko I. I., Generalova Y. E., Smekhova I. E., Shikov A. N. The biochemical composition and antioxidant properties of *Fucus vesiculosus* from the Arctic region. Mar. Drugs, 2022, Vol. 20, No. 193, pp. 1–19.
47. Todorov T. I., Wolle M. M., Conklin S. D. Distribution of 26 major and trace elements in edible seaweeds from the US market. Chemosphere, 2022, Vol. 294, p. 133651.
48. Ma Z., Lin L., Wu M., Yu H., Shang T., Zhang T., Zhao M. Total and inorganic arsenic contents in seaweeds: Absorption, accumulation, transformation and toxicity. Aquaculture, 2018, Vol. 497, pp. 49–55.
49. Usov A. I., Bilan M. I., Klochkova N. G. Polysaccharides of algae: 48. Polysaccharide composition of several calcareous red algae: Isolation of alginate from *Corallina pilulifera* P. et R. (Rhodophyta, Corallinaceae). Bot. Mar., 1995, Vol. 38, pp. 43–51.
50. Usov A. I., Smirnova G. P., Klochkova N. G. Polysaccharides of algae: 55. Polysaccharide composition of several brown algae from Kamchatka. Russ. J. Bioorg. Chem., 2001, Vol. 27, pp. 395–399.
51. Van Alstyne K. L. A comparison of three methods for quantifying brown algal polyphenolic compounds. J. Chem. Ecol., 1995, Vol. 21, pp. 45–58.
52. Sáez C. A., Lobos M. G., Macaya E. C., Oliva D., Quiroz W., Brown M. T. Variation in patterns of metal accumulation in thallus parts of *Lessonia trabeculata* (Laminariales; Phaeophyceae): implications for biomonitoring. PLoS ONE, 2012, Vol. 7(11), pp. 1–10.

53. Villares R., Carral E., Carballeira C. Differences in metal accumulation in the growing shoot tips and remaining shoot tissue in three species of brown seaweeds. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2017, Vol. 99, pp. 372–379.
54. Wegeberg S., Søndergaard J., Geertz-Hansen O. Elements and sugars in kelp and fucoid species in Greenland, correlation and seasonality. *Algal Res.*, 2023, Vol. 75, Article: 103240, pp. 1–15.

Информация об авторах

Анна Васильевна Даурцева – младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6653-5452>

Елена Вячеславовна Горшенина – ведущий инженер, <https://orcid.org/0009-0000-1329-0017>

Екатерина Дмитриевна Облучинская – доктор фармацевтических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4456-656X>

Information about the authors

Anna V. Daurtseva – Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6653-5452>

Elena V. Gorshenina – Leading Engineer, <https://orcid.org/0009-0000-1329-0017>

Ekaterina D. Obluchinskaya – Dr. Sci. (Pharmacy), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4456-656X>

Статья поступила в редакцию 15.04.2025; одобрена после рецензирования 05.05.2025; принята к публикации 26.05.2025.
The article was submitted 15.04.2025; approved after reviewing 05.05.2025; accepted for publication 26.05.2025.