

УДК 574.64; 581.6

<http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-40-48>

© Андреев В.П., Закревский Ю.Н., Мартынова Е.С., Плахотская Ж.В., 2021 г.

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЫШЬЯК В ВОДОРΟΣЛЯХ ШТОРМОВЫХ ВЫБРОСОВ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ОСТРОВА СЕВЕРНЫЙ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

¹В. П. Андреев*, ²Ю. Н. Закревский, ¹Е. С. Мартынова, ¹Ж. В. Плахотская
¹Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия
²Мурманский арктический государственный университет, г. Мурманск, Россия

Цель исследования: дать оценку потенциальной опасности по содержанию тяжелых металлов (ТМ) и мышьяка (As) употребления в пищу объектов арктической альгофлоры, представленных в штормовых выбросах в местах вероятной высадки экипажей судов и кораблей, терпящих бедствие в акватории северных морей Российской Федерации.

Материалы и методы. Определяли элементный состав образцов растений, выброшенных ветроволновым воздействием на берег о. Северный архипелага Новая Земля. Перед проведением анализа фрагменты слоевищ досушивали при 80° С до постоянного веса для определения их сухой массы с точностью до 1 мг. Минерализацию материала осуществляли с помощью СВЧ-минерализатора по стандартной методике. Элементный анализ проводили на атомном спектрометре МГА-915М. Сопоставляли полученные данные с предельно допустимыми уровнями, установленными действующими нормативными документами. По результатам измерений строили ряды убывания концентраций тяжелых металлов в образцах водорослей по местам сбора и видовой принадлежности.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что наименьшим содержанием тяжелых металлов и мышьяка в ветроволновых выбросах водорослей на о. Северный в заливе Русская гавань архипелага Новая Земля отличается *Laminaria digitata* и участки слоевищ (вегетативные части) большинства других выбрасываемых водорослей. Данные растения могут использоваться для употребления в пищу в экстремальных ситуациях экипажами судов (самолетов и др.), потерпевших бедствие.

Ключевые слова: морская медицина, Арктика, автономное существование, природные источники пищи, водоросли, штормовые выбросы, тяжелые металлы, мышьяк

*Контакт: Андреев Владимир Павлович, vpandreev@mail.ru

© Andreev V.P., Zakrevskiy Yu.N., Martynova E.S., Plakhotskaya Zh.V., 2021

HIGH-DENSITY METALS AND ARSENIC IN ALGAE OF STORM EMISSIONS FROM THE COASTAL AREA OF THE SEVERNY ISLAND OF THE NOVAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO

¹V. P. Andreev*, ²Yu. N. Zakrevskiy, ¹E. S. Martynova, ¹Zh. V. Plakhotskaya
¹Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia
²Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russia

Purpose of the Study is to assess the potential hazard in terms of the content of high-density metals (HDMs) and arsenic (As) for the consumption of objects of the Arctic algal flora presented in storm emissions in places of probable disembarkation of a crew, the ship has come in a distress or a disaster in the water area of the northern seas of the Russian Federation.

Materials and methods. The elemental composition of samples of the plants thrown by the wind-wave impact on the coastal area of the Severny island of the Novaya Zemlya archipelago. Before making the analysis, thallus fragments were dried at 80° С to constant weight to determine their dry weight with an accuracy of 1 mg. The material mineralization was carried out using a microwave mineralizer according to the standard technique. The elementary analysis was performed using MGA-915M atomic spectrometer. The data obtained were compared with the maximum permissible levels established by the current regulatory documents. According to the results of measurements, series of decreasing concentrations of HDMs in algae samples were built according to the places of collection and species.

Results and Discussion. It has been found that the lowest content of HDMs and arsenic in the wind-wave emissions of algae on the Severny Island in the Russkaya Gavan Bay of the Novaya Zemlya archipelago belongs to both *Laminaria digitata* and vegetative parts of the thallus of most of the other ejected algae. These plants can be used for food in extreme situations by the crews of a ship (an aircraft, etc.) who has come in a distress or a disaster.

Key words: marine medicine, Arctic, autonomous existence, natural food sources, algae, storm emissions, high-density metals, arsenic.

*Contact: Andreev Vladimir Pavlovich, vpandreev@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Андреев В.П., Закревский Ю.Н., Мартынова Е.С., Плахотская Ж.В. Тяжелые металлы и мышьяк в водорослях штормовых выбросов береговой зоны острова Северный архипелага Новая Земля // *Морская медицина*. 2021. Т. 7, № 4. С. 40–48, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-40-48>.

For citation: Andreev V.P., Zakrevskiy Yu.N., Martynova E.S., Plakhotskaya Zh.V. High-density metals and arsenic in algae of storm emissions from the coastal area of the Severny island of the Novaya Zemlya archipelago // *Marine Medicine*. 2021. Vol. 7, No 4. P. 40–48, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-40-48>.

Conflict of interest: the authors have declared no conflict of interest.

Введение. Морские водоросли, потенциально пригодные к употреблению в пищу, не только являются объектами промысла, но и играют важную роль в прибрежных экосистемах. Они очищают водную среду от загрязняющих веществ, аккумулируя, например, тяжелые металлы и обеспечивая тем самым безопасное существование прибрежной фауны¹. Особым ресурсом водорослевого сырья, сбор которого не нарушает экологическое равновесие в донных сообществах, являются штормовые выбросы [1, с. 88]. Они формируются из литоральных и сублиторальных макрофитов, для которых исходно характерен прикрепленный рост. Однако в ходе штормовых явлений водоросли могут быть оторваны от субстрата. Например, в результате штормов ежегодно срывается с субстрата от 10–15 до 20% агароносной *Anfelta* [2, с. 286–287]. Лишенные прикрепления водоросли формируют скопления, которые выбрасываются на берег нагонным ветроволновым воздействием неподалеку от своего исходного местообитания [3, с. 340] либо дрейфуют под влиянием течений на большие расстояния [4, с. 25]. Установлено, например, что жизнеспособные экземпляры бурых водорослей со сформированными рецептакулами обнаруживаются в штормовых выбросах не менее чем в 150 км от их ближайшей прикрепленной популяции [5, с. 114–115]. Объемы ежегодно выбрасываемого морем водорослевого материала весьма велики. Так, в течение года на берега Белого моря выбрасывается около 100 тыс. тонн донных растений. Однако в условиях арктиче-

ских архипелагов в период таяния снегов большая часть водорослевого материала смывается в море и берега на некоторое время становятся практически чистыми [6, с. 65].

Несмотря на значительную длину береговой линии островов архипелага Новая Земля и обилие присутствующих на берегах растительных выбросов, сбор местных водорослей для доставки на предприятия пищевой промышленности Мурманской области нецелесообразен. Расходы на транспортировку в условиях Севера достаточно велики и делают этот вид сырья весьма дорогостоящим [7, с. 37]. Единственным рациональным вариантом практического применения водорослей является их использование непосредственно на территориях архипелага, например, в условиях автономного существования изолированных групп людей после аварий и катастроф судов и кораблей. Отмечается [8, с. 150–157; 220–248], что риски кораблекрушений в арктических морях весьма велики. В подобных ситуациях высохшие водоросли штормовых выбросов могут быть использованы в качестве топлива, а свежие образцы употреблены в пищу после несложной предварительной обработки. Кроме того, достаточно хорошо известны способы восстановления пищевых свойств сухих водорослей путем их вторичной гидратации [9, с. 75].

Оценивая перспективы пищевого применения водорослей в условиях выживания, отметим, что таксономический состав выбросов в Арктике весьма разнообразен. Общий список видов водо-

¹ Гаврилов Е.Н. Методические особенности мониторинга запаса ламинариевых водорослей техническими средствами // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. № 6 (95). С. 51–56.

рослей Мурманского побережья Баренцева моря и архипелага Новая Земля, основанный, в том числе, на ревизии исторического гербария Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, насчитывает 223 вида. Из них: 88 — *Phaeophyta*, 46 — *Chlorophyta* и 89 — *Rhodophyta* [10, с. 7]. По данным современных натурных исследований флора Баренцева моря включает 178 видов, из них 74 — *Rhodophyta*, 70 — *Phaeophyta* и 34 — *Chlorophyta*. Наиболее разнообразен общий видовой состав водорослей мурманского побережья (153 вида); значительно беднее побережья арктических районов: юго-восточной части (64 вида), архипелагов Земля Франца-Иосифа (60 видов) и Новая Земля (41 вид) [4, с. 343–347]. Можно видеть, что Новая Земля по числу представленных видов уступает не только мурманскому побережью, но и расположенной севернее Земле Франца-Иосифа. Тем не менее водоросли в штормовых выбросах встречаются даже на Карском берегу о. Северный, литораль которого лишена собственной флоры и фауны. Например, на побережье залива Ледяная гавань обнаружено 28 видов выброшенных прибоем sublиторальных макрофитов: 15 видов бурых водорослей, 11 видов красных и 2 — зеленых [11, с. 533]. Что касается баренцево-морского побережья Новой Земли, то здесь можно наблюдать расположенные вдоль уреза воды и тянущиеся на многие километры полосы штормовых выбросов, в которых представлены как сухие экземпляры, так и вполне жизнеспособные объекты.

Обсуждая возможность использования водорослей в качестве пищи экстремальных ситуаций, обратим особое внимание на бурные водоросли, которые являются наиболее значительной частью штормовых выбросов не только по видовому представительству, но и по массовой составляющей. Высказывается мнение, что биомассу водорослей можно в экстремальных ситуациях включать в пищевой рацион благодаря присутствию в их составе полисахаридов, некоторых белков, жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов. Для бурых водорослей характерно и более высокое содержание минеральных элементов в сухом веществе, по сравнению с высшими растениями. Они необходимы макрофитам для поддержания в морской воде клеточного и тканевого осмотического давления, фор-

мирования буферных систем организма и выполнения ряда других функций [12, с. 61]. В результате содержание незаменимых для человека веществ в бурых водорослях часто выше, чем в овощах и вообще наземных растениях [13, с. 42]. Однако роль водорослевых полисахаридов, как нутриентной составляющей в питании, неоднозначна. Во-первых, эти биополимеры почти не усваиваются из-за отсутствия в организме человека соответствующих гидролитических ферментов. Во-вторых, благодаря им водоросли являются концентраторами тяжелых металлов (ТМ) и мышьяка, что обуславливает риск отравления человека сорбированными токсикантами после их освобождения в пищеварительной системе [14, с. 36; 16, с. 255]. Способность к кумуляции ТМ сообщает бурным водорослям свойство биоиндикаторов загрязнений воды и субстратов, на которых они обитают [13, с. 42]. Руководства по выживанию на морском побережье в Арктике содержат описания макрофитов, которые могут употребляться в пищу людьми, оказавшимися в условиях автономного существования и вынужденными питаться исключительно природным материалом. Однако в таких руководствах отсутствуют данные о загрязненности природного пищевого сырья поллютантами промышленности и ТМ, что делает вопрос о потенциальной опасности употребления в пищу местной альгофлоры весьма актуальным.

Цель исследования: дать оценку потенциальной опасности, по содержанию ТМ, употребления в пищу объектов арктической альгофлоры, представленных в штормовых выбросах в местах вероятной высадки экипажей судов и кораблей, терпящих бедствие в акватории северных морей Российской Федерации. Решались задачи определения содержания ТМ в свежих образцах растений, выброшенных ветроволновым воздействием на берег о. Северный, сопоставления полученных данных с предельно допустимыми уровнями (ПДУ), установленными действующими нормативными документами, оценки соотношений между ТМ в образцах водорослей по местам сбора и видовой принадлежности. Работа проводилась в плане реализации п. 14 а, «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года»¹, предусматривающей наращивание деятельности

¹ Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года».

по проведению фундаментальных и прикладных научных исследований в интересах освоения Арктики.

Материалы и методы. Работу проводили в ходе третьего этапа комплексной экспедиции Северного флота «Новая Земля-2018» с 30 июля по 11 сентября 2018 года. Сбор образцов водорослей осуществляли на территории острова Северный в полосе штормовых выбросов на четырех станциях: губа Крестовая (1), залив Русская Гавань (2), залив Наталии (3), губа Митюшиха (4).

Собранные водоросли ополаскивали пресной водой, помещали между листами обеззоленной фильтровальной бумаги и высушивали в гербарном прессе. Перед проведением элементного анализа фрагменты слоевищ досушивали при 80° С до постоянной массы для определения их сухой массы с точностью до 1 мг.

Минерализацию материала осуществляли с помощью СВЧ-минерализатора МС-6 (производитель фирма «Вольта», Россия) по стандартной методике [16, с. 97]. Анализ проводили на атомном спектрометре МГА-915М («Люмэкс», Россия). Содержание всех элементов определяли в параллельных измерениях одних и тех же минерализованных образцов.

Результаты измерений обрабатывали с помощью пакета прикладных программ Statistica for Windows 7. Выборки случайных величин сформированы в результате объединения образцов водорослей по видовой принадлежности и по местам их сбора. Число членов выборки (от 4 до 7) определялось количеством экземпляров водорослей, найденных в конкретном месте сбора. Нормальный тип распределения членов большинства выборок подтвержден с помощью теста Шапиро–Уилка. В таблице приведены средние значения с указанием величин доверительных интервалов ($\bar{x} \pm \Delta \bar{x}$) для уровня значимости $p=0,05$. Для выборок, принадлеж-

ность которых к нормальному распределению подтвердить не удалось, приведены только средние значения (\bar{x}). Нормируемые гигиенические показатели по ТМ и As сопоставляли с величинами их предельно допустимых уровней (ПДУ), установленными СанПиН 2.3.2.1078-01¹, с учетом изменений No. 2 по Сан-ПиН 2.3.2.1280-03². Гигиенические показатели по эссенциальным элементам (Cu, Mn, Zn) оценивали путем сопоставления с МР 2.3.1.2432-08³, ориентируясь на обоснованные в этом документе верхние допустимые уровни (ВДУ). Величины ПДУ пересчитали на сухую массу, принимая во внимание, что содержание воды в нативных пластинах ламинариевых по данным [12, с. 60] составляет 90% от их сырой массы, а в слоевищах фукуса, как это следует из отчета по выполненной НИР⁴,— 70%. Таким образом, ПДУ As, Cd и Pb для фукусов составил 17; 3,3 и 1,7 мг/кг сухой массы, а для ламинариевых 50; 10 и 5 мг/кг сухой массы соответственно.

Результаты и их обсуждение. Наибольшее содержание ТМ (см. таблицу) отмечено у ламинариевых водорослей. В пластине *Sacharina latissima*, L. зарегистрированы максимальные концентрации Cu и Zn, а в спорофиллах *Alaria esculenta*, L. больше чем в других объектах Cd и As. Больше всего Pb выявлено в вегетативной пластине *A. esculenta*. Вторая позиция по данному элементу принадлежит *S. latissima*.

Fucus distichus, L. занимает первую и вторую позиции по содержанию Mn и вторую — по Cu. Однако эти показатели относятся к рецептакулам и расположенным ниже их вегетативным частям слоевища. Краевые части веточек данного вида водорослей не обнаруживают высоких концентраций ТМ. Данный факт отчасти можно объяснить разным возрастом тех или иных частей таллома и, следовательно, разной продолжительностью накопления в них токсикантов.

¹ Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 06.11.2001 г., с 1 сентября 2002 года.

² Санитарно-эпидемиологические правила СанПиН 2.3.2.1280-03 «Дополнения и изменения No 2 к СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 09.04.2003 г., с 25 июня 2003 года.

³ Методические рекомендации МР 2.3.1.2432-08 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 18.12.2008 г., с момента утверждения.

⁴ Отчет по научно-исследовательской работе кафедры Общей и военной гигиены (военно-морской и радиационной гигиены) Военно-медицинской академии имени С.М.Кирова за 2019 г.

Содержание элементов в объектах штормовых выбросов ($\bar{x} \pm \Delta \bar{x}$), мкг/гThe content of elements in samples which has been thrown out by a storm ($\bar{x} \pm \Delta \bar{x}$)

Объект анализа	Станция / число образцов	Mn	Cu	Cd	Zn	As	Pb
<i>S.latissima</i> , пластина	1/5	5,82±0,85	11,3±1,97	1,86±0,49	99,3±15,3	23,0±4,2	0,70±0,19
<i>S.latissima</i> , пластина	2/6	1,42±0,24	0,50±0,14	1,62±0,34	33,7±3,9	0,16±0,05	0,011±0,003
<i>S.latissima</i> , пластина	3/5	3,23±0,57	1,06±0,28	4,04±0,31	2,32±0,28	46,7±4,4	0,09*
<i>F.distichus</i> , края ветвей	1/5	32,51±3,0	2,89*	1,22±0,27	1,90±0,46	18,9±4,3	0,21±0,02
<i>F.distichus</i> , края ветвей	2/7	14,5±0,91	0,26±0,09	0,26±0,01	37,4±2,7	10,4±1,15	0,02±0,002
<i>F.inflatus</i> , края ветвей	2/7	5,47±0,99	1,01*	0,76±0,11	41,1±5,5	6,6±1,0	0,07±0,01
<i>F.distichus</i> , рецептакулы	1/5	40±6,73	5,58±0,73	3,31*	45,1±10,4	27,0±2,7	0,52±0,04
<i>F.distichus</i> , под рецептакулами	1/6	209,1±24,0	0,53*	1,58*	58,2±15,7	0,08±0,02	0,003*
<i>L.digitata</i> , пластина	2/6	5,45±0,39	0,33±0,07	0,012±0,003	53,0±5,0	13,3±3,4	0,23±0,04
<i>L.digitata</i> , пластина	3/5	3,56*	0,93*	0,74*	2,80*	35,9±9,7	0,06*
<i>L.digitata</i> , пластина	4/5	5,30±0,10	0,20±0,09	0,20*	56,5±7,7	30,0±5,7	0,14±0,03
<i>L.fissilis</i> , пластина	4/5	13,5±1,7	1,41±0,12	0,26*	53,3±2,4	0,10±0,02	0,011±0,003
<i>A.esculenta</i> , вегетативная пластина	3/4	12,0*	4,95±0,51	4,87*	55,0*	23,4*	0,72*
<i>A.esculenta</i> , вегетативная пластина	4/4	3,58±0,41	0,37±0,03	0,062±0,017	72,5±23,3	0,07±0,01	Не обнаруж.
<i>A.esculenta</i> , спорофиллы	3/5	2,95±0,2	1,39±0,36	9,24*	3,60*	77±25	0,05*
<i>A.esculenta</i> , спорофиллы	4/4	3,51±0,67	0,49±0,05	4,55±0,18	37,5±8,2	38,0±1,6	0,12±0,01
<i>Palmaria</i> , пластина	1/5	9,59±0,64	2,67±0,76	0,25±0,06	2,27±0,28	17,2±0,82	0,12±0,03
<i>Ph.rossica</i> , пластина	3/5	22,3*	1,98±0,56	0,49±0,09	32,4±7,4	0,73*	0,29*

Примечания: приуроченность станций к географическим объектам и обозначение их цифрами оговорены в разделе «Материалы и методы исследования»; знаком * помечены средние значения (\bar{x}) членов выборки, принадлежность которых к нормальному распределению не подтверждена.

Notes: the proximity of stations to geographical objects and their designation by numbers are specified in the section «Materials and methods of research»; the * sign marks the average values (\bar{x}) of sample members whose affiliation to the normal distribution has not been confirmed.

Laminaria digitata, Huds., независимо от места сбора, отличается низкими концентрациями исследуемых элементов и представляет, таким образом, определенное исключение в кругу ламинариевых водорослей. Такая особенность вида согласуется с тезисом о более выраженной взаимосвязи накопления элементов бурыми водорослями в зависимости от так-

сономической группы, чем от условий произрастания [17, с. 248]. В этом же ключе [18, с. 318, 321] можно обсуждать относительно невысокие концентрации ТМ, отмеченные нами в красных водорослях, где лишь *Phycodris rossica*, *A. Zinova* занимает третью позицию по Mn. Очевидно оба вида водорослей не имеют ограничений по ТМ для употребления их в пищу.

Превышение допустимого содержания As отмечено у двух образцов фукусов и одного ламинариевых водорослей. При этом наибольшее превышение зарегистрировано в частях слоевищ, ответственных за размножение, — рецептакулах *F. vesiculosus*, и спорофиллах *A. esculenta*. Эти части талломов не пригодны для пищевых целей. Ни по одному из остальных исследованных элементов превышения ПДУ отмечено не было.

Сравнение результатов по местам сбора показало, что в водорослях, собранных в заливе Русская Гавань, содержание ТМ и As не достигают критически высоких значений, независимо от таксономической принадлежности фикобионтов. Данный залив характеризуется максимальной пищевой безопасностью фикобионтов, собранных в зоне штормовых выбросов.

Практически повсеместно соотношения между элементами в образцах водорослей весьма разнятся, что может быть обусловлено присутствием в сборах не только местных образцов, но и экземпляров, принесенных течением, а также их разным состоянием. Между тем выявлены некоторые тенденции, характеризующие как биологические особенности самих водорослей, так и химическую обстановку в районах их произрастания. Из восемнадцати обследованных образцов в одиннадцати Zn является элементом, присутствующим в наибольших концентрациях. Причем во всех собранных водорослях залива Русская Гавань концентрация $Zn > Mn$. В пяти образцах преобладает As и в двух — Mn. В 13 образцах As занимает различные промежуточные позиции, за исключением последней, на которой всегда располагается Pb. Если As исключить из внимания, то на большой группе объектов можно наблюдать один устойчиво воспроизводящийся ряд, в котором элементы расположены сходным образом в порядке убывания их концентраций. Так, большинству образцов *Fucus* и *L. digitata*, а также *Ph. rossica* соответствует ряд: $Zn > Mn > Cu > Cd > Pb$. Эти данные не совпадают с последовательностью, которая отражает, как

принято считать, наиболее типичные по мировому океану соотношения между ТМ у водорослей ($Mn > Zn > Cu > Pb > Cd$) [14, с. 34]. Кроме того, соотношение между Mn и Zn не соответствует выявленному нами для *F. vesiculosus* на пяти станциях губы Чупа Кандалакшского залива Белого моря в 2013 году: $Mn > Zn > Cu > Cd > Pb$. Можно видеть, что в беломорских пробах преобладал Mn, а не Zn, как это обнаружено в образцах, собранных вдоль побережья Новой Земли. Взаиморасположение элементов, соответствующее беломорскому, характерно лишь для *L. digitata* из залива Наталии (бассейн Карского моря). Причины преобладания Zn не вполне ясны, хотя известна точка зрения, что его высокое содержание для гидробионтов менее токсично, чем присутствие других металлов, при этом бурые водоросли способны к его избирательному накоплению [14, с. 34].

Различия в рядах убывания концентраций элементов, как и различные позиции, занимаемые в этих рядах As, могут объясняться неодинаковым происхождением выброшенных проб образцов водорослей и разным экологическим состоянием мест их исходного произрастания [13, с. 44; 19, с. 39]. Кроме того, для водорослей, произрастающих в условиях естественного природного фона ТМ характерен и весьма обычен определенный естественный разброс в показателях их содержания в талломах, как и вообще для широкого спектра токсичных или потенциально вредных компонентов, сорбируемых водорослями [20, с. 966–968]. Поскольку в вегетативных частях собранных нами образцов не было отмечено превышения ПДУ по содержанию ТМ и мышьяка, можно предполагать также низкий уровень токсикантов в морской воде и грунтах во всех районах произрастания водорослей. Предположение подкрепляется данными, полученными в экспедиции «Трансарктика-2019», в ходе которой вода и донные грунты вблизи берегов о. Северный были охарактеризованы по ТМ как чистые [21, с. 231].

Заключение. Наиболее значимыми результатами любой работы, посвященной решению проблемы безопасного питания растительным материалом в условиях Арктики, являются данные, указывающие на безопасность конкретных потенциально пищевых объектов и приуроченность их к определенным географическим ориентирам. В ходе данного исследования установлено, что независимо от видовой принадлежности внутри каждого из обследованных таксонов

наименьшим содержанием Cu, Cd и As характеризуются водоросли, собранные на берегу залива Русская Гавань. Сравнение элементного состава различных водорослей выявило особенность *L. digitata*, которая отличается от остальных изученных фикобионтов отсутствием экстремально высоких концентраций ТМ и As во всех местах сбора. Также констатируется, что вегетативные части талломов всех изученных

водорослей, найденных в штормовых выбросах на о. Северный, пригодны для использования в пищу в условиях автономного существования. В связи с установленным фактом неравномерного распределения ТМ и As в разных частях талломов рекомендуем в инструкциях по выживанию приводить информацию, позволяющую исключить использование в пищу частей слоевищ, избирательно накапливающих токсиканты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Стародубцева А.А., Степанян Л.С., Успенская А.В., Марковская Е.Ф. Штормовые выбросы на западном побережье Белого моря и их использование // *Карелия глазами ученых: основные результаты экспедиционной деятельности-2019. Материалы республиканской с международным участием научной конференции* / отв. ред. И.М.Суворова. 2020. С. 82–91. [Starodubtseva A.A., Stepanyan L.S., Uspenskaya A.V., Markovskaya E.F. Storm emissions on the western coast of the White Sea and their use. *In the collection: Karelia through the eyes of scientists: the main results of the expedition activity-2019. Materials of the republican scientific conference with international participation.* Editor-in-chief I.M. Suvorov, 2020, pp. 82–91 (In Russ.).]
2. Березина М.О., Новоселов А.П., Левицкий А.Л. Состояние поселений анфельции складчатой (*Anfelta plicata*, Huds) в прибрежной зоне Онежского Берега (Онежский залив Белого моря) // *Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования. Материалы II Национальной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры экологии моря ФГБОУ ВО «КГМТУ»*. 2019. С. 281–287. [Berezina M.O., Novoselov A.P., Levitsky A.L. The state of settlements of *Anfelta plicata* (Huds) in the coastal zone of the Onega Coast (Onega Bay of the White Sea). *Actual problems of biodiversity and nature management. Materials of the II National Scientific and Practical Conference dedicated to the 20 th anniversary of the Department of Marine Ecology of the KSMTU*. 2019, pp. 281–287 (In Russ.).]
3. Малавенда С.В., Шошина Е.В., Капков В.И. Видовое разнообразие макроводорослей в различных районах Баренцева моря // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2017. Т. 20. № 2. С. 336–351. [Malavenda S.V., Shoshina E.V., Kapkov V.I. Species diversity of macroalgae in various regions of the Barents Sea. *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2017, Vol. 20, No. 2, pp. 336–351 (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-2-336-351.
4. Горбунова Ю.А., Есюкова Е.Е. Выбросы макроводорослей и морских трав на российской части юго-восточного побережья Балтийского моря // *Известия КГТУ*. 2020. № 59. С. 24–34. [Gorbunova Yu.A., Esyukova E. E. Emissions of macroalgae and seagrasses on the Russian part of the south-eastern coast of the Baltic Sea. *Izvestiya KSTU*, 2020, No. 59, pp. 24–34 (In Russ.). doi: 10.46845/1997-3071-2020-59-24-34.
5. Степанян О.В. Бурые водоросли рода *Cystoseira* в Азовском море: вселение или расширение ареала? // *Российский журнал биологических инвазий*. 2020. Т. 13, № 2. С. 112–119. [Stepanyan O.V. Brown algae of the genus *Cystoseira* in the Sea of Azov: introduction or expansion of the area? *Russian Journal of Biological Invasions*, 2020, Vol. 13, No. 2, pp. 112–119 (In Russ.).]
6. Щербак А.П., Тишков С.В. Водоросли Белого моря и перспективы их использования // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2015. № 4. С. 60–67. [Shcherbak A.P., Tishkov S.V. Algae of the White Sea and prospects for their use. *Bulletin of the Peoples ' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*, 2015, No. 4, pp. 60–67 (In Russ.).]
7. Бахмет И.Н., Тишков С.В. Водоросли Белого моря: перспективы использования // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2014. Т. 6, № 43. С. 36–38. [Bakhmet I. N., Tishkov S. V. Algae of the White Sea: prospects for use. *The North and the market: the formation of an economic order*, 2014, Vol. 6, No 43, pp. 36–38 (In Russ.).]
8. Молчанов В.П., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Риски чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации. Москва, 2011. 300 с. [Molchanov V.P., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Risks of emergency situations in the Arctic zone of the Russian Federation*. Moscow, 2011, 300 p. (In Russ.).]
9. Чмыхалова В.Б. Перспективные направления использования бурых водорослей в пищевой промышленности // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2012. № 21. С. 66–78. [Chmykhalova V.B. Promising directions of using brown algae in the food industry. *Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, 2012, No. 21, pp. 66–78 (In Russ.).]

10. Евсеева Н.В. Видовой состав морских водорослей прибрежной зоны мурманского побережья и архипелага Новая Земля // *Труды ВНИРО*. 2018. Т. 171. С. 7–25. [Evseeva N.V. Species composition of marine algae of the coastal zone of the Murmansk coast and the Novaya Zemlya archipelago. *Proceedings of VNIRO*, 2018, Vol. 171, pp. 7–25 (In Russ.)].
11. Шошина Е.В., Анисимова Н.А. Макроводоросли из района бухты Ледяная Гавань (Новая Земля, о. Северный, Карское море) // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2013. Т. 16, № 3. С. 530–535. [Shoshina E.V., Anisimova N.A. Macroalgae from the area of the Ice Harbor Bay (Novaya Zemlya, Severny Island, Kara Sea). *Bulletin of the Murmansk State Technical University*, 2013, Vol. 16, No. 3, pp. 530–535 (In Russ.)].
12. Королёва Т.Н. Влагоудерживающая способность бурой водоросли *Saccharina Bongardiana* // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2009. № 9. С. 60–66. [Koroleva T. N. Moisture-retaining ability of brown algae *Saccharina Bongardiana*. *Bulletin of the Kamchatka State Technical University*, 2009, No. 9, pp. 60–66 (In Russ.)].
13. Боголицын К.Г., Каплицин П.А., Иванченко Н.Л., Амосова А.С., Овчинников Д.В., Николайчик А.Е., Паршина А.Э. Арктические бурые водоросли как биоиндикатор загрязнения акваторий Белого и Баренцева морей тяжелыми металлами // *Комплексные научные исследования и сотрудничество в Арктике: взаимодействие вузов с академическими и отраслевыми научными организациями: материалы Всероссийской конференции с международным участием / сост. С.В. Рябченко; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Электронные текстовые данные. Архангельск: ИДСАФУ, 2015. С. 42–45. [Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Ivanchenko N.L., Amosova A.S., Ovchinnikov D.V., Nikolaychik A.E., Parshina A.E. Arctic brown algae as a bioindicator of pollution of the waters of the White and Barents Seas with heavy metals. *Complex scientific research and cooperation in the Arctic: interaction of universities with academic and branch scientific organizations: materials of the All-Russian conference with international participation / comp. S.V. Ryabchenko; Sev. (Arctic) Lomonosov State University. Electronic text data. Arkhangelsk: SAFU Publishing House, 2015, 419 p. 42–45 (In Russ.)].**
14. Подкорытова А.В., Вафина Л.Х., Муравьева Е.А., Шарина З.Н. Санитарно-гигиеническая оценка бурых водорослей Белого и Баренцева морей // *Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. 2009. № 4. С. 33–39. [Podkorytova A.V., Vafina L. H., Muravyeva E. A., Sharina Z. N. Sanitary and hygienic assessment of brown algae of the White and Barents seas. *Rybprom: technologies and equipment for processing aquatic biological resources*, 2009, No. 4, pp. 33–39 (In Russ.)].
15. Андреев В.П., Андриянов А.И., Плахотская Ж.В. Риски металлотоксикозов у населения береговой зоны северных морей // *Гигиена и санитария*. 2018. Т. 97, № 3. С. 254–258. [Andreev V.P., Andrianov A.I., Plakhotskaya Zh.V. Risks of metal toxicosis in the population of the coastal zone of the northern seas. *Hygiene and sanitation*, 2018, Vol. 97, No. 3, pp. 254–258 (In Russ.)]. doi: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-254-258>.
16. Андреев В.П., Плахотская Ж.В. Сравнительный анализ накопления меди и кадмия макрофитами губы Чупа Кандакшского залива Белого моря // *Биология внутренних вод*. 2019. № 1. С. 96–99 [Andreev V.P., Plakhotskaya Zh.V. Comparative analysis of the accumulation of copper and cadmium by macrophytes of the Chupa Bay of the Kandalaksha Bay of the White Sea. *Biology of Internal Waters*, 2019, No. 1, pp. 96–99 (In Russ.)]. doi: 10.1134/S0320 965219 010029.
17. Боголицын К.Г., Каплицин П.А., Кашина Е.М., Иванченко Н.Л., Кокрятская Н.М., Овчинников Д.В. Особенности минерального состава бурых водорослей Белого и Баренцева морей // *Химия растительного сырья*. 2014. № 1. С. 243–250. [Bogolitsyn K.G., Kaplitsin P.A., Kashina E.M., Ivanchenko N.L., Kokryatskaya N.M., Ovchinnikov D.V. Features of the mineral composition of brown algae of the White and Barents Seas. *Chemistry of plant raw materials*, 2014, No. 1, pp. 243–250 (In Russ.)]. doi: 10.14258/jcprm.1401243.
18. Benkdad A. et al. Trace metals and radionuclides in macroalgae from Moroccan coastal waters // *Environ. Monit. and Assess.* 2011. Vol. 182, No. 1–4, pp. 317–324. doi: 10.1007/s10661-011-1878-0.
19. Воскобойников Г.М., Никулина А.Л., Салахов Д.О., Шахвердов В.А. Содержание тяжелых металлов в бурой водоросли *Saccharina latissima* Баренцева и Гренландского морей // *Наука Юга России*. 2019. Т. 15, № 2. С. 39–44. [Voskoboynikov G.M., Nikulina A.L., Salakhov D.O., Shakhverdov V.A. The content of heavy metals in the brown alga *Saccharina latissima* of the Barents and Greenland seas. *Science of the South of Russia*, 2019, Vol. 15, No. 2, pp. 39–44 (In Russ.)]. doi: 10.7868/S25000640190205.
20. Wells M.L., Brawley S.H., Potin P., Craigie J.S., Raven J.A., Merchant S.S., Helliwell K.E., Smith A.G., Camire M.E. Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding // *Journal of Applied Phycology*. 2017. Vol. 29, No. 2. P. 949–982. doi: 10.1007/s10811-016-0974-5.
21. Балакина О.И., Шунин М.В., Фоменко В.Л., Окулова Л.А., Зимина И.А., Яковлев Е.Ю. Краткие итоги экспедиции «Трансарктика-2019» на НЭС «Михаил Сомов» // *Труды Архангельского центра Русского географического общества: сборник научных статей / Архангельский центр Русского географического общества. Архангельск, 2019.*

Вып. 7. С. 421–428. [Balakina O.I., Shunin M.V., Fomenko V.L., Okulova L.A., Zimina I.A., Yakovlev E.Yu. Brief results of the Transarctic-2019 expedition to the Mikhail Somov NPP. *Proceedings of the Arkhangelsk Center of the Russian Geographical Society: Collection of scientific articles / Arkhangelsk Center of the Russian Geographical Society. Arkhangelsk, 2019, Iss. 7, pp. 421–428 (In Russ.)*].

Поступила в редакцию / Received by the Editor: 11.10.2021 г.

Авторство:

Вклад в концепцию и план исследования — *В.П.Андреев, Ю.Н.Закревский*. Вклад в анализ и выводы — *В.П.Андреев, Е.С.Мартынова, Ж.В.Плахотская*. Вклад в подготовку рукописи — *В.П.Андреев, Ю.Н.Закревский, Е.С.Мартынова, Ж.В.Плахотская*.

Сведения об авторах:

Андреев Владимир Павлович — кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (войскового и рационального питания) научно-исследовательского отдела (питания и водоснабжения) научно-исследовательского центра федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: vpandreev@mail.ru;

Закревский Юрий Николаевич — доктор медицинских наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, руководитель направления обучения по специальности «Лечебное дело» Мурманского Арктического государственного университета; 184606, г. Мурманск, ул. Капитана Егорова, д. 16; e-mail: zakrev.sever@bk.ru;

Мартынова Елена Сергеевна — младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (экспертизы воды и продовольствия) научно-исследовательского отдела (питания и водоснабжения) научно-исследовательского центра федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6;

Плахотская Жанна Вячеславовна — научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (войскового и рационального питания) научно-исследовательского отдела (питания и водоснабжения) научно-исследовательского центра федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6.