

УДК 574.64(265.54)

Н.К. Христофорова^{1,2}, А.А. Емельянов¹, А.В. Ефимов^{1*}¹ Дальневосточный федеральный университет,
690091, г. Владивосток, ул. Октябрьская, 27;² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7**БИОИНДИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ ВОД
О. РУССКОГО (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)
ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

На основе данных о содержании Fe, Zn, Cu, Cd, Pb и Ni в бурых водорослях-макрофитах *Sargassum miyabei* и *S. pallidum*, собранных в июле-августе 2016 г. вдоль побережья о. Русского, расположенного в зал. Петра Великого вблизи г. Владивосток, получено первое представление о состоянии прибрежных вод острова. Установлено, что найденные концентрации тяжелых металлов в подавляющем большинстве превышают фоновые уровни содержания элементов в водорослях рода *Sargassum* в северо-западной части Японского моря. Выявлено также, что на юго-восточной стороне, обращенной к Уссурийскому заливу, отличающейся скально-валунным побережьем и произрастанием *S. pallidum*, водоросли характеризуются более низкими концентрациями микроэлементов, чем на остальных берегах острова.

Ключевые слова: о. Русский, зал. Петра Великого, биоиндикация, загрязнение, тяжелые металлы, *Sargassum miyabei*, *S. pallidum*.

DOI: 10.26428/1606-9919-2018-192-157-166.

Khristoforova N.K., Emelyanov A.A., Efimov A.V. Bioindication of pollution in the coastal marine waters at Russky Island (Peter the Great Bay, Japan Sea) by heavy metals // *Izv. TINRO*. — 2018. — Vol. 192. — P. 157–166.

First data on concentrations of Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, and Ni in brown algae *Sargassum miyabei* and *S. pallidum* in the coastal waters at Russky Island in Peter the Great Bay near Vladivostok are presented on the samples collected in July-August, 2016. *S. pallidum* that covers rocky southeastern coast (faced to the Ussuri Bay) is less polluted by the metals than the algae from other coasts of the Island. However, the elements concentrations in the algae at Russky Island, in general, mostly exceed their background levels for *Sargassum* algae in the northwestern Japan Sea.

Key words: Russky Island, Peter the Great Bay, bioindication, pollution, heavy metal, *Sargassum miyabei*, *Sargassum pallidum*.

* Христофорова Надежда Константиновна, доктор биологических наук, профессор, e-mail: marineecology@rambler.ru; Емельянов Александр Анатольевич, аспирант, e-mail: 990507@mail.ru; Ефимов Александр Владимирович, студент, e-mail: Efimoff8591@gmail.com.

Khristoforova Nadezhda K., D.Sc. professor, e-mail: marineecology@rambler.ru; Emelyanov Alexander A., postgraduate student, e-mail: 990507@mail.ru; Efimoff Alexander V., student, e-mail: Efimoff8591@gmail.com.

Введение

Развитие экономики и урбанизация территорий приводят к изменению экологической ситуации не только в отдельных регионах, но и на всей планете. Сброс сточных вод и расположение производств вблизи прибрежно-морской зоны приводит к значительным, а порой и к неизбежным катастрофическим последствиям. Тяжелые металлы, поступающие в море, в локальных участках прибрежных районов формируют высокие, не свойственные природе концентрации в среде и организмах, что требует постоянного наблюдения и экологических оценок.

Среди биологических методов контроля качества среды с начала 1970-х гг. широкое распространение получила биоиндикация с использованием водорослей-макрофитов. Применение аккумулирующих биоиндикаторов в мониторинге загрязнения Мирового океана тяжелыми металлами основано на их способности концентрировать элементы из среды в 1000–100000 раз, что упрощает, ускоряет и удешевляет процесс анализа. Также они дают усредненные уровни относительной биологической доступности металлов в каждом исследуемом районе (Fowler, 1979; Bryan, 1980; Христофорова, 1989; Strezov, Nonova, 2003; Hédouin et al., 2008; Akcali, Kucuksezgin, 2011; Brito et al., 2012; и др.). Выбор саргассовых водорослей в качестве биоиндикаторов объясняется высокой адекватностью соответствия их химического состава геохимическим условиям среды обитания. Обладая развитой удельной поверхностью контакта со средой, постоянно взаимодействуя с ней, имея высокие уровни концентраций альгинатов в своих тканях, саргассовые водоросли отличаются большим по сравнению с водорослями других типов и беспозвоночными периодом полувыведения металлов из организма. Представители данного рода бурых водорослей давно признаны «истинными отражателями» условий существования и используются в целях биомониторинга загрязнения вод тяжелыми металлами в тепловодных районах (Khristoforova, Kozhenkova, 2002; Христофорова, Чернова, 2005; Христофорова, Кобзарь, 2012; Гамаюнова и др., 2014; Кобзарь, Христофорова, 2015; и др.).

Несмотря на близость к городу, о. Русский долгое время оставался малоизученным. Этому способствовало его длительное нахождение в ведомстве военно-морского флота и закрытость для посещения гражданским населением. Хотя в самые последние годы появились публикации по микробному загрязнению и гидрохимии вод острова (Христофорова и др., 2015а, б, 2017), изучение содержания тяжелых металлов в водорослях побережья острова не проводилось.

В современных постоянно меняющихся условиях необходима достоверная, максимально полная, экономически оправданная и своевременная информация о качестве окружающей среды, а также о причинах и следствиях возникающих экологических ситуаций. Содержание тяжелых металлов в бурых водорослях является надежным способом исследования загрязнения прибрежных вод. Оно позволяет быстро выявить границы геохимических зон, обусловленных поступлением металлов с суши и связанных с формами их нахождения и миграционной способностью. Цель настоящей работы — оценить современное состояние прибрежных вод о. Русского по содержанию тяжелых металлов в бурых водорослях рода *Sargassum* — *S. miyabei* и *S. pallidum*.

Материалы и методы

Бурые водоросли-макрофиты *S. miyabei* и *S. pallidum* являются тепловодными и широко распространены в зал. Петра Великого (Перестенко, 1980). Оба вида водорослей собирались в июле — начале августа 2016 г. в прибрежных водах о. Русского (рис. 1). Сборы сделаны на 34 станциях вокруг острова, за исключением закрытой зоны на юге (рис. 1). Каждая проба, включавшая пять-семь талломонов, анализировалась в трех повторностях.

При обработке водорослей, подготовке проб к анализу и атомно-абсорбционном определении содержания микроэлементов на спектрофотометрах Shimadzu AA-6800 и Nippon Jarrell Ash AA-85, выполненном в лаборатории геохимии Тихоокеанского



Рис. 1. Остров Русский. Точками с цифрами обозначены станции отбора проб
 Fig. 1. Scheme of sampling sites (numbers) at Russky Island

Института Географии ДВО РАН, использовали известные подходы и приемы (Христофорова, 1989). Точность определения концентраций металлов контролировали, анализируя стандартные образцы (NIES 9.0 «Sargasso»). Ошибка определения не превышала 15 %. Концентрацию металлов выражали в микрограммах на грамм сухой массы. Число элемент-определений (вместе с холостыми пробами) превышало 600. Математическая обработка данных (расчет среднего из трех параллельных проб и стандартного отклонения) осуществлялась в программе Excel. Достоверность различий средних для четырех сравниваемых полигонов определяли с использованием критерия Краскела-Уоллиса в программе SPSS Statistics.

На рис. 1 показана карта о. Русского с точками отбора проб по всему периметру, который был условно разделен на четыре части (полигона): север–северо-восток острова — ст. 1–11 (обращены к прол. Босфор Восточный), восток–юго-восток — ст. 12–18 (обращены к Уссурийскому заливу), юго-запад — ст. 19–22 (обращены к прол. Старка) и запад–северо-запад — ст. 23–34 (обращены к Амурскому заливу).

Результаты и их обсуждение

Данная работа посвящена изучению загрязнения прибрежно-морских вод острова такими металлами, как железо, цинк, медь, кадмий, никель, свинец. Первый из них характеризует преимущественно терригенный сток, два вторых, если они не связаны с добычей и переработкой руд, выплавкой металлов или гальваническими цехами, — коммунально-бытовое воздействие (оба входят в число тривиальных компонентов хозяйственно-бытовых стоков). Три последних являются трассерами техногенного пресса на окружающую среду (Христофорова, 1989). Хотя все они поступают в окружающую среду при сжигании топлива, наиболее актуален из-за объемов выброса никель. Поскольку никель сопровождает все нефтепродукты, его содержание в среде будет обусловлено поступлением с судов, работающих на флотском мазуте, а также при сжигании жидкого топлива на ТЭЦ и котельных. В состав нефти входят многие

тяжелые металлы. В ее золе обнаружены Fe, Mn, Cr, Co, Ni, V, Mo, Cu, Zn, Pb, Hg, Sn и др., однако среди них выделяются такие элементы, как V, Ni, Zn и др., попавшие в нефть из живых организмов в далеком геологическом прошлом. При этом V и Ni в некоторых видах тяжелой нефти имеют такие концентрации, которые достаточны для промышленного извлечения этих металлов (Ященко, 2012; <http://neftegaz.ru/analysis/view/8121-Тузхелье-металлы-в-нефти.-Как-с-ними-боротся-и-где-применят>). Таким образом, можно думать, что концентрации никеля в окружающей среде, в том числе и в водорослях, будут прямо связаны с количеством сжигаемых нефтеуглеводородов. Кроме того, никель легко соосаждается с гидроокисью железа, в связи с этим можно ожидать, что в местах с обилием взвеси железа во взвешенной форме в воде и организмах будет повышенным и содержание никеля.

Данные анализа проб водорослей на содержание элементов представлены в табл. 1.

Железо. Согласно данным табл. 1, самые высокие из всех определений концентрации Fe в водорослях, превышающие 1000 мкг/г, обнаружены на четырех станциях: 3-я (бухта Безымянная); 24-я (мыс Средний), 30-я (бухта Бабкина, кут), 31-я (бухта Бабкина, мыс). При этом в вершине бухты Бабкина в *S. miyabei* найдено очень высокое содержание железа — более 5000 мкг/г. Здесь также выявлены высокие концентрации цинка (23,47 мкг/г), меди (3,87 мкг/г) и особенно никеля (7,65 мкг/г). В то же время содержание свинца в водорослях на этой станции было низким (0,38 мкг/г). Как выяснилось, в вершину бухты, окруженной болотистой местностью, впадает ручей, вбирающий поверхностный смыв от пос. Бабкино и прилегающей территории. Все элементы — трассеры как терригенного стока (Fe), так антропогенного (Zn, Cu) и техногенного (Cd, Ni) влияния — проявили здесь себя наиболее ярко. Этому в немалой степени способствовал кислый характер вод болотного ручья, не только переводящий в растворенное состояние железо, мигрирующее в пресных водах преимущественно во взвешенном состоянии, но и повышающий миграционную активность других элементов, поступивших в водную среду. И лишь Pb оказался в этом районе минорным элементом, свидетельствуя об отсутствии в прилегающих окрестностях значительных источников его поступления в окружающую среду.

Низкие концентрации железа наблюдались на восточной стороне острова — у мысов Ахлестышева (ст. 12, 13) и Тобизина (ст. 18), причем на последнем отмечено минимальное содержание Fe — 32 мкг/г. Этот мыс отличался пониженным содержанием в водорослях и всех остальных металлов. Таким образом, минимальные уровни содержания железа выявлены в водорослях на мысах юго-восточной части острова, обращенной к Уссурийскому заливу, что, очевидно, обусловлено ее скально-валунным побережьем и контактом с открытыми водами залива. Важно отметить, что вдоль этой стороны острова произрастал исключительно *S. pallidum*. Имея более прочную и более толстую «ножку», а также более мощные ризоиды, чем *S. miyabei*, держась за камни, он выдерживает более динамичные условия обитания между валунами. Лишь еще на одной станции на юго-западной стороне — у мыса Рогозина со стороны бухты Боярина — концентрация железа в саргассуме была также низкой — 68 мкг/г. Большие количества этого элемента обнаружены в водорослях на северо-восточном побережье (обращенном к прол. Босфор Восточный), для берегов которого характерен мягкий грунт и обилие взвеси, поступающей с поверхностным стоком и из донных отложений.

Цинк и медь являются трассерами антропогенного воздействия. Самые высокие концентрации этих элементов выявлены в водорослях на ст. 9 — в маленькой бухте Житкова, против хозяйственно-бытового канализационного стока: соответственно 98,46 и 9,11 мкг/г. Это очень большие величины среди найденных для побережья острова. За исключением данной станции, максимальное содержание Zn в *S. miyabei* достигало 26,69 мкг/г (мыс Поспелова). В то же время на ст. 9 обнаружено наименьшее количество никеля в водорослях — 4,02 мкг/г, что свидетельствует о незначительном техногенном влиянии в этом месте. Повышенное содержание Zn в водорослях, превышающее 20 мкг/г, отмечено на ст. 1, 2, 3, 4, 7 (все расположены на побережье прол. Босфор

Таблица 1

Концентрации тяжелых металлов в саргассовых водорослях из прибрежных вод о. Русского, мкг/г сух. массы ($m \pm \sigma$)

Table 1

Concentrations of heavy metals in *Sargassum* algae from the coastal waters of Russky Island, $\mu\text{g/g DW}$ ($m \pm \sigma$)

№ п/п	Место отбора	Вид	Fe	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni
Северо-восточная часть острова, прол. Босфор Восточный								
1	О. Елена	<i>S. miyabei</i>	233 ± 8	21,88 ± 0,12	3,23 ± 0,09	1,95 ± 0,03	0,15 ± 0,09	6,43 ± 0,18
2	У канала	<i>S. miyabei</i>	633 ± 11	23,22 ± 0,50	4,83 ± 0,06	2,77 ± 0,09	0,92 ± 0,53	5,93 ± 0,08
3	Бухта Безымянная	<i>S. miyabei</i>	1355 ± 53	26,62 ± 1,10	4,53 ± 0,18	1,84 ± 0,01	0,22 ± 0,12	6,54 ± 0,22
4	МысПоспелова	<i>S. miyabei</i>	652 ± 9	26,69 ± 0,37	4,10 ± 0,20	1,71 ± 0,04	0,29 ± 0,19	5,94 ± 0,21
5	Мыс Новосильского	<i>S. pallidum</i>	563 ± 12	20,32 ± 2,32	2,77 ± 0,11	1,45 ± 0,07	0,40 ± 0,18	5,58 ± 0,26
6	Бухта Аякс	<i>S. miyabei</i>	467 ± 8	15,19 ± 0,72	3,01 ± 0,13	2,41 ± 0,03	0,63 ± 0,09	6,95 ± 0,18
7	Мыс Балка (бухта Аякс)	<i>S. miyabei</i>	197 ± 4	20,49 ± 0,27	5,62 ± 0,08	1,71 ± 0,03	2,39 ± 0,36	6,88 ± 0,07
8	Мыс Балка (вершина)	<i>S. miyabei</i>	792 ± 17	19,92 ± 0,21	3,34 ± 0,07	1,75 ± 0,01	0,89 ± 0,13	5,82 ± 0,04
9	Бухта Житкова, против стока канализации	<i>S. miyabei</i>	450 ± 8	98,46 ± 2,73	9,11 ± 1,08	1,21 ± 0,08	0,57 ± 0,09	4,02 ± 0,21
10	Бухта Житкова, против поселка строителей	<i>S. miyabei</i>	464 ± 4	17,11 ± 0,21	2,75 ± 0,02	1,67 ± 0,05	1,71 ± 0,26	4,24 ± 0,09
11	Мыс Житкова, внешняя сторона	<i>S. miyabei</i>	546 ± 18	19,60 ± 1,68	5,19 ± 0,42	1,65 ± 0,04	3,73 ± 0,56	4,37 ± 0,24
Юго-восточная часть острова, Уссурийский залив								
12	Мыс Ахлестышева (вершина)	<i>S. pallidum</i>	63 ± 2	10,61 ± 0,21	2,28 ± 0,37	1,65 ± 0,02	0,41 ± 0,06	4,20 ± 0,08
13	Мыс Ахлестышева (основание)	<i>S. pallidum</i>	52 ± 1	13,19 ± 0,46	4,28 ± 0,13	2,12 ± 0,10	0,34 ± 0,05	4,31 ± 0,11
14	Бухта Богдановича, кут	<i>S. pallidum</i>	77 ± 4	11,65 ± 0,74	1,89 ± 0,07	2,11 ± 0,09	0,19 ± 0,03	4,16 ± 0,25
15	Мыс Вятлина	<i>S. pallidum</i>	88 ± 3	11,24 ± 0,74	1,59 ± 0,08	1,47 ± 0,01	0,27 ± 0,16	4,66 ± 0,10
16	Бухта Чернышева	<i>S. pallidum</i>	476 ± 11	11,63 ± 0,74	1,96 ± 0,12	1,97 ± 0,05	0,17 ± 0,08	6,17 ± 0,37
17	Бухта Карпинского	<i>S. pallidum</i>	193 ± 8	9,76 ± 0,42	2,91 ± 0,25	1,56 ± 0,06	0,11 ± 0,06	4,19 ± 0,07
18	Мыс Тобизина	<i>S. pallidum</i>	32 ± 1	9,39 ± 0,42	2,06 ± 0,25	1,57 ± 0,06	0,10 ± 0,06	4,53 ± 0,33
Юго-западная часть острова, прол. Старка								
19	Бухта Иванцова	<i>S. miyabei</i>	664 ± 26	16,18 ± 0,45	3,31 ± 0,15	1,68 ± 0,05	0,28 ± 0,16	5,60 ± 0,08
20	Мыс Иванцова	<i>S. pallidum</i>	369 ± 19	19,29 ± 0,70	3,04 ± 0,25	1,68 ± 0,03	0,28 ± 0,16	5,88 ± 0,14
21	П-ов Кондратенко	<i>S. miyabei</i>	155 ± 9	17,87 ± 0,65	3,78 ± 0,35	2,63 ± 0,05	0,21 ± 0,12	5,72 ± 0,46
22	Мыс Рогозина	<i>S. miyabei</i>	609 ± 19	19,22 ± 0,06	3,68 ± 0,06	2,12 ± 0,02	0,22 ± 0,13	5,88 ± 0,14
Северо-западная часть острова, Амурский залив								
23	Бухта Боярина, мыс Рогозина	<i>S. miyabei</i>	68,0 ± 1,4	15,11 ± 0,34	3,23 ± 0,02	2,05 ± 0,02	0,24 ± 0,14	4,63 ± 0,32
24	Мыс Средний	<i>S. pallidum</i>	1044 ± 75	16,00 ± 0,60	5,63 ± 0,20	1,80 ± 0,03	0,18 ± 0,10	5,73 ± 0,06
25	Мыс Васильева	<i>S. miyabei</i>	332 ± 22	16,49 ± 0,49	3,58 ± 0,11	2,02 ± 0,01	1,00 ± 0,15	5,80 ± 0,11
26	Мыс Половцева	<i>S. pallidum</i>	237 ± 7	14,22 ± 0,02	2,70 ± 0,17	1,98 ± 0,04	0,60 ± 0,09	5,73 ± 0,11
27	Мыс Михайловского	<i>S. miyabei</i>	250 ± 11	14,67 ± 0,75	2,03 ± 0,08	2,27 ± 0,07	0,68 ± 0,10	5,80 ± 0,08
28	Мыс Игнатьева	<i>S. pallidum</i>	224 ± 10	13,86 ± 0,28	2,88 ± 0,07	2,03 ± 0,02	0,92 ± 0,14	5,27 ± 0,16
29	Мыс Игнатьева	<i>S. miyabei</i>	239 ± 7	13,61 ± 0,31	2,08 ± 0,10	2,29 ± 0,04	1,81 ± 0,27	5,72 ± 0,10
30	Бухта Бабкина, кут	<i>S. miyabei</i>	5283 ± 565	23,47 ± 1,62	3,87 ± 0,10	2,30 ± 0,16	0,38 ± 0,22	7,65 ± 0,20
31	Бухта Бабкина, мыс	<i>S. pallidum</i>	1053 ± 63	16,01 ± 0,56	3,62 ± 0,10	1,83 ± 0,03	0,54 ± 0,08	5,45 ± 0,06
32	Мыс Чернявского	<i>S. miyabei</i>	608 ± 30	15,86 ± 0,40	3,22 ± 0,20	1,60 ± 0,32	0,22 ± 0,39	5,62 ± 0,20
33	Мыс Старицкого	<i>S. pallidum</i>	260 ± 6	15,22 ± 0,15	2,91 ± 0,15	2,21 ± 0,08	0,17 ± 0,09	6,33 ± 0,05
34	Мыс Елагина, о. Елена	<i>S. pallidum</i>	423 ± 15	17,82 ± 0,40	3,30 ± 0,14	1,88 ± 0,05	0,35 ± 0,19	5,73 ± 0,17

Примечание. Высокие концентрации элементов выделены жирным шрифтом, повышенные — полужирным курсивом, самые низкие — курсивом.

Восточный) и в кутовой части бухты Бабкина (ст. 30). Наименьшие концентрации цинка определены в водорослях на побережье Уссурийского залива: ст. 12 (оконечность мыса Ахлестышева) — 10,61 мкг/г, ст. 17 (бухта Карпинского) — 9,76, на ст. 18 (мыс Тобизина) — 9,39 мкг/г. Высокие концентрации меди в саргассумах, кроме уже отмеченной ст. 9, обнаружены у мысов Среднего, Балка, Житкова (внешняя сторона) (соответственно 5,63; 5,62; 5,19 мкг/г). Два последних мыса обращены к прол. Босфор Восточный. Наименьшее количество меди в макрофитах отмечено на ст. 15 (мыс Вялина) — 1,59 мкг/г, что свидетельствует о минимальном антропогенном воздействии на среду у этого узкого и длинного мыса, далеко выступающего в море, а также в бухтах Богдановича и Чернышева (ст. 14 и 16) и у мысов Тобизина и Михайловского (ст. 18 и 27). Согласно данным о содержании Zn и Cu в водорослях наибольший антропогенный пресс испытывает северо-восточное побережье о. Русского.

Cd, Pb, Ni — свидетели техногенного влияния на среду и организмы. Содержание Cd в водорослях (поступающего в среду в основном при сжигании дизельного топлива, а также за счет автотранспорта) на всех станциях распределено более или менее равномерно, находясь в интервале 1,21–2,77 мкг/г (табл. 1). Самое высокое количество свинца в водорослях выявлено на ст. 11 (мыс Житкова) — 3,73 и ст. 7 (мыс Балка) — 2,39; повышенное — на ст. 10 (бухта Житкова, против пос. строителей) — 1,71, ст. 29 (мыс Игнатьева) — 1,81 мкг/г; наименьшее — на ст. 17 (бухта Карпинского) — 0,11 и ст. 18 (мыс Тобизина) — 0,10 мкг/г. Как видно, разброс данных по содержанию свинца достигал порядка величин. Максимальные концентрации Pb в водорослях обнаружены на станциях, расположенных на побережье прол. Босфор Восточный. Несмотря на запрет использования тетраэтилсвинца как антидетонаторной добавки к топливу и в связи с этим резкое снижение поступления данного элемента в окружающую среду с выхлопом автотранспорта, а также прекращение изготовления наборного типографского шрифта, востребованность этого металла в ряде отраслей производства сохраняется и во многих из них он не имеет альтернативы (задержка различных опасных излучений, кислотоупорные футеровки, типографские краски и другие красители, инсектициды, пули для стрелкового оружия, взрывчатые вещества, свинцовые белила, цемент, шпатлевка и др.).

На большинстве станций концентрации никеля в водорослях составляют около 5 мкг/г. Наибольшие уровни содержания этого элемента, превышающие 6 мкг/г, выявлены на ст. 1 (о. Елены, прол. Босфор Восточный) — 6,43, ст. 3 (бухта Безымянная) — 6,54, ст. 6 (бухта Аякс) — 6,59, ст. 7 (мыс Балка) — 6,88, ст. 16 (бухта Чернышева) — 6,17, ст. 33 (мыс Старицкого) — 6,33 и ст. 30 (бухта Бабкина, кут) — 7,65; наименьшие — на обеих станциях в бухте Житкова (4,02 и 4,24), а также на ст. 11, 12, 13, 14 и 17, т.е. на большинстве станций на востоке–юго-востоке острова (от 4,16 до 4,37 мкг/г). В целом разброс концентраций никеля в водорослях был небольшим и находился в пределах от 4,0 до 7,65 мкг/г.

Таким образом, наименьшие концентрации всех элементов характерны для макрофитов, собранных вдоль побережья, обращенного к Уссурийскому заливу. В водорослях, произрастающих на северо-западе и северо-востоке острова, т.е. на сторонах, обращенных к Амурскому заливу и прол. Босфор Восточный, наблюдаются повышенные концентрации всех изученных элементов, кроме Cd, распределенного более-менее равномерно. Особенно выделяются высокими содержаниями элементов в водорослях ст. 30 (бухта Бабкина), 2 (канал), 3 (бухта Безымянная), 7 (мыс Балка) и 9 (бухта Житкова, бытовые стоки от океанариума), подверженные сильному антропогенному воздействию.

Результаты, представленные в табл. 1, позволили увидеть каждую из обследованных станций, выделив по периметру береговой линии бухты и мысы с наибольшими и наименьшими концентрациями элементов в водорослях. Интегральную картину уровней содержания металлов в саргассумах на разных сторонах побережья острова дает рис. 2. Как мы уже отмечали, юго-восточная сторона отличалась исключительным произрастанием саргассума бледного (*S. pallidum*), в то время как северо-восточное по-

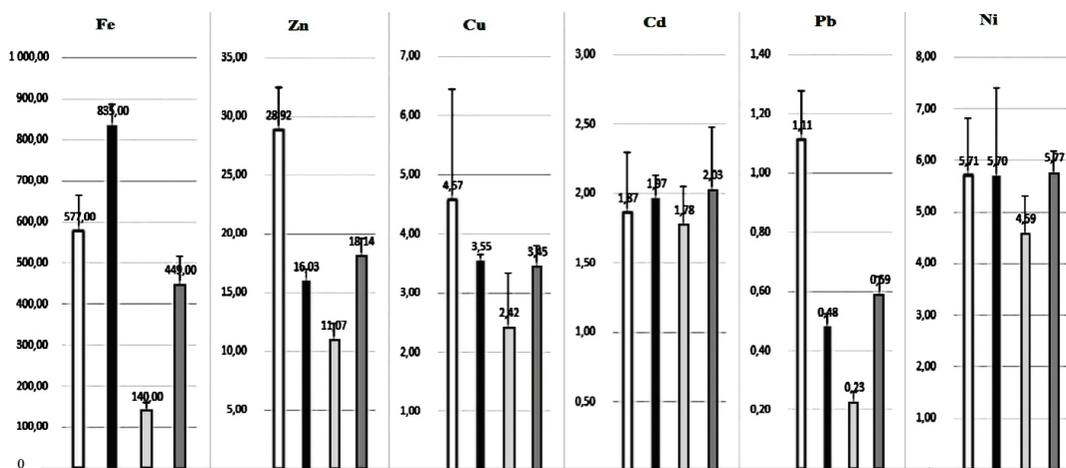


Рис. 2. Средние концентрации Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, Ni в талломах саргассумов, собранных в прибрежных водах на разных сторонах о. Русского (черный столбик — северо-запад острова; белый — северо-восток; светло-серый — юго-восток; серый — юго-запад острова), мкг/г сух. массы

Fig. 2. Average concentrations of Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, and Ni in thalli of *Sargassum* algae collected at Russky Island, by parts of the coast (black columns — NW coast, white — NE coast, lite-gray — SE coast, gray — SW coast), µg/g DW

бережье практически полностью (за исключением мыса Новосильского) было заселено саргассумом Миябе (*S. miyabei*). На юго-западе преобладал *S. miyabei*, на северо-западе оба вида колонизовали берег в равной степени. Поэтому для характеристики геохимических условий на разных побережьях острова мы сравнили средние концентрации элементов в саргассумах, не делая акцента на видах (рис. 2).

Самые высокие концентрации Fe характерны для северо-запада острова (побережье Амурского залива), хотя для этой стороны отмечается и очень высокая изменчивость концентраций данного элемента в макрофитах. Наличие мягких грунтов на стороне, обращенной к прол. Босфор Восточный, обуславливает также большое количество станций с высоким содержанием железа в водорослях на этом участке берега. Наименьшие количества железа найдены в саргассумах на скалистом юго-восточном побережье. Различия в средних для каждой стороны острова достоверны (критерий Краскела-Уоллиса для Fe = 0,013).

По антропогенному воздействию участки побережья острова четко различаются. И если для Zn наблюдается высокая изменчивость концентраций в водорослях на северо-восточной стороне острова, то для трех остальных сторон достоверность различий очевидна (критерий Краскела-Уоллиса для Zn — 0,001). По содержанию меди обитатели разных сторон побережья также заметно различаются: наибольшее среднее содержание этого металла обнаружено в саргассумах с побережья прол. Босфор Восточного, наименьшее — с побережья Уссурийского залива. Средние концентрации меди для обитателей северо-западного и юго-западного побережий практически не различаются.

Ни по кадмию, ни по никелю значимых различий между содержанием в водорослях на разных сторонах острова нет, хотя основное количество станций с минимальными концентрациями Ni в водорослях находится на его юго-востоке. Самые высокие концентрации Pb, как и Zn, отмечены на северо-востоке острова (побережье прол. Босфор Восточный), однако для данной стороны характерна очень высокая изменчивость концентраций элемента в макрофитах (как, впрочем, и Zn), обусловленная сильным и разнообразным воздействием на побережье. И хотя самые низкие концентрации свинца выявлены преимущественно в водорослях на юго-востоке, различия между средними для этой стороны и северо-запада недостоверны, их диапазоны перекрываются.

Получив представление о распределении уровней содержания элементов в макрофитах на конкретных станциях вокруг острова, об общей биогеохимической картине на его разных сторонах, контактирующих с разными водными массами, мы, наконец, можем перейти к оценке экологической ситуации в приостровных водах на основе сравнения выявленных количественных показателей с известными данными о фоновых диапазонах концентраций тяжелых металлов в саргассовых водорослях в северо-западной части Японского моря (табл. 2). Значения концентраций элементов в водорослях, выявленные для экстремальных ситуаций — в вершине бухты Бабкина и против хозяйственно-бытового канализационного стока в бухте Жидкова, — для Fe — 5283,0, Zn — 98,46, Cu — 9,10 мкг/г.

Таблица 2

Диапазоны содержания тяжелых металлов в талломах водорослей *S. miyabei* и *S. pallidum* из прибрежных вод о. Русского и диапазоны фоновых концентраций элементов для этих видов*, мкг/г сух. массы

Table 2

Minimal and maximal concentrations of heavy metals in thalli of *S. miyabei* и *S. pallidum* from the coastal waters of Russky Island compared with their background levels for the same species in the northwestern Japan Sea, µg/g DW

Вид	Fe	Zn	Cu	Cd	Ni	Pb
<i>S. miyabei</i>	68–1457	13,6–26,7	2,0–6,5	1,2–2,8	4,0–7,6	0,4–3,7
<i>S. pallidum</i>	32–1053	8,8–19,3	1,6–7,6	1,5–2,3	4,2–6,5	0,2–0,9
<i>S. miyabei</i> *	79–746	8,9–23,9	1,3–4,7	0,7–2,9	0,8–3,6	0–3,8
<i>S. pallidum</i> *	61–672	6,2–23,8	0,9–3,9	0,5–1,7	0,4–3,8	0–5,5

* Диапазоны фоновых концентраций (Чернова, Коженкова, 2016).

Сравнение диапазонов концентраций элементов в водорослях *S. pallidum* и *S. miyabei* из прибрежных вод о. Русского с фоновыми диапазонами их содержаний в саргассумах северо-западной части Японского моря показало, что минимальные концентрации железа в водорослях острова ниже, чем нижние значения фоновых диапазонов. В то же время максимальные количества этого элемента для макрофитов прибрежно-морских вод острова выше, чем верхние границы фоновых диапазонов. Как типичный терригенный элемент Fe, поступает в морскую среду преимущественно за счет поверхностного смыва, речного стока, мобилизации в раствор из донных осадков на мелководье, взмучивания и биотурбации донных отложений (Христофорова, 1989; Шулькин, 2004). Наименьшему терригенному стоку подвержены водоросли, собранные у скалистого мыса Тобизина на юго-востоке острова, что и понятно, поскольку здесь практически нет его источников.

Наименьшие величины концентраций цинка в водорослях из приостровных вод выше нижних значений фоновых диапазонов, в то же время наибольшая концентрация этого элемента в *S. pallidum* несколько ниже фонового максимума. Уровни содержания меди, как нижние, так и верхние, в водорослях у острова выше граничных фоновых показателей этого элемента. Таким образом, остров находится в зоне существенного антропогенного влияния.

Нижние границы кадмиевого диапазона в водорослях острова выше фоновых, максимальная концентрация Cd в *S. pallidum* выше верхней границы фона, для *S. miyabei* наибольшее содержание элемента практически совпало с верхней границей фона. Также это характерно и для свинца. Для островных макрофитов минимальные значения свинцового диапазона выше фонового минимума, максимальные — ниже фонового максимума, что, по-видимому, обусловлено меньшим техногенным влиянием на остров, чем на фоновые районы (или использованием данных по свинцу для фонового максимума в водорослях, полученных до 2003 г., — года запрета тетраэтилсвинцовой добавки к бензиновому топливу). Для никеля как максимальные, так и минимальные концентрации в водорослях из прибрежных вод острова выше фоновых, что свидетельствует о большем загрязнении окружающих остров вод, и это неудивительно.

Наблюдавшиеся иногда более низкие концентрации элементов в водорослях из прибрежных вод острова, чем минимальные для фонового диапазона, обусловлены, очевидно, тем, что нижняя граница фона является расчетной и довольно условной (Чернова, Коженкова, 2016).

Заключение

Остров Русский находится в пределах внешнего рейда порта Владивосток, поэтому повышенные концентрации Ni в водорослях из окружающих остров вод, причем со всех сторон, по сравнению с фоновыми уровнями его содержания в саргассумах северо-западной части Японского моря обусловлены, несомненно, движением судов и использованием нефтеуглеводородного топлива. Повышенные концентрации Zn и особенно Cu по сравнению с фоновым диапазоном этих элементов в макрофитах указывают на антропогенное влияние на окружающие остров воды. Различия в уровнях содержания элементов в водорослях, произрастающих на разных сторонах острова, обращенных к водным массам проливов Босфор Восточный и Старка, Амурского и Уссурийского заливов, связано как с разным уровнем загрязнения окружающих вод, так и с различающейся геоморфологией берегов. Самые низкие концентрации элементов в водорослях, произрастающих у скалистого и каменистого юго-восточного побережья, обращенного к выходной открытой и мористой части Уссурийского залива, по сравнению с другими сторонами острова свидетельствуют о наименьшем загрязнении тяжелыми металлами вод у этого берега о. Русского.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-50-00034).

Список литературы

- Кобзарь А.Д., Христофорова Н.К.** Мониторинг загрязнения прибрежных вод Амурского залива (Японское море) тяжелыми металлами с использованием бурой водоросли *Sargassum miyabei* Yendo, 1907 // Биол. моря. — 2015. — Т. 41, № 5. — С. 361–365.
- Перестенко Л.П.** Водоросли залива Петра Великого : моногр. — Л. : Наука, 1980. — 323 с.
- Христофорова Н.К.** Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами : моногр. — Л. : Наука, 1989. — 192 с.
- Христофорова Н.К., Бойченко Т.В., Емельянов А.А., Попова А.В.** Микробиологический контроль состояния вод бухты Новик (залив Петра Великого, Японское море) // Изв. ТИНРО. — 2017. — Т. 189. — С. 121–130.
- Христофорова Н.К., Гамаюнова О.А., Афанасьев А.П.** Состояние бухт Козьмина и Врангеля (залив Петра Великого, Японское море): динамика загрязнения тяжелыми металлами // Изв. ТИНРО. — 2015а. — Т. 180. — С. 179–186.
- Христофорова Н.К., Емельянов А.А., Бердасова К.С., Дегтева Ю.Е.** Экологическая характеристика вод пролива Босфор Восточный по кислородным показателям // Изв. ТИНРО. — 2015б. — Т. 181. — С. 161–168.
- Христофорова Н.К., Кобзарь А.Д.** Бурые водоросли-макрофиты как индикаторы загрязнения вод бухты Рудной тяжелыми металлами // Изв. ТИНРО. — 2012. — Т. 168. — С. 220–231.
- Христофорова Н.К., Чернова Е.Н.** Сравнение содержания тяжелых металлов в бурых водорослях и морских травах // Докл. РАН. — 2005. — Т. 400, № 4. — С. 571–573.
- Чернова Е.Н., Коженкова С.И.** Определение пороговых концентраций металлов в водорослях-индикаторах прибрежных вод северо-западной части Японского моря // Океанол. — 2016. — Т. 56, № 3. — С. 393–402. DOI: 10.7868/S0030157416030023.
- Чернова Е.Н., Христофорова Н.К., Вышкварцев Д.И.** Тяжелые металлы в морских травах и водорослях залива Посьета Японского моря // Биол. моря. — 2002. — Т. 28, № 6. — С. 425–430.
- Шулькин В.М.** Металлы в экосистемах морских мелководий : моногр. — Владивосток : Дальнаука, 2004. — 275 с.
- Яценко И.Г.** Тяжелые ванадиевые нефти России // Изв. ТПУ. — 2012. — Т. 321, № 1. — С. 105–111.
- Akali I., Kucuksezgin F.** A biomonitoring study: Heavy metals in macroalgae from eastern Aegean coastal areas // Mar. Pollut. Bull. — 2011. — Vol. 62, Iss. 3. — P. 637–645. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.12.021.

Brito G.B., de Souza T.L., Bressy F.C. et al. Levels and spatial distribution of trace elements in macroalgae species from the Todos of Santos Bay, Bahia, Brazil // *Mar. Pollut. Bull.* — 2012. — Vol. 64, Iss. 10. — P. 2238–2244. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.06.022.

Bryan G.W. Recent trends in research on heavy-metal contamination in the sea // *Helgoländer Meeresunters.* — 1980. — Vol. 33. — P. 6–25.

Fowler S.W. Use of macroalgae as a reference material for pollutant monitoring and specimen banking // *Monitoring environmental materials and specimen banking : Proc. Intern. Workshop.* — L., 1979. — P. 247–260.

Hédouin L., Bustamante P., Fichez R., Warnau M. The tropical brown alga *Lobophora variegata* as a bioindicator of mining contamination in the New Caledonia lagoon: a field transplantation study // *Mar. Environ. Res.* — 2008. — Vol. 66, Iss. 4. — P. 438–444. DOI: 10.1016/j.marenvres.2008.07.005.

Khristoforova N.K., Kozhenkova S.I. The use of the brown algae *Sargassum* spp. in heavy metal monitoring of marine Environment near Vladivostok, Russia // *Ocean Polar Res.* — 2002. — Vol. 24, № 4. — P. 325–329. DOI: 10.4217/OPR.2002.24.4.325.

Strezov A., Nonova T. Monitoring of Fe, Mn, Cu, Pb and Cd levels in two brown macroalgae from the Bulgarian Black Sea coast // *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* — 2003. — Vol. 83, № 12. — P. 1045–1054.

Поступила в редакцию 29.11.17 г.

Принята в печать 26.02.18 г.