

УДК 577.47:170.49

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МОРСКОЙ ТРАВЕ *ZOSTERA MARINA* LINNAEUS, 1753 В БУХТЕ ВОЕВОДА (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

© 2024 г. А. А. Рюмина¹, * (ORCID: 0000-0002-1740-6029),
П. Я. Тищенко¹ (ORCID: 0000-0002-3500-2861), Е. М. Шкирникова¹ (ORCID: 0000-0003-2380-1049),
Ю. А. Барабанщиков¹ (ORCID: 0000-0002-0922-5500)

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
(ТОИ) ДВО РАН, Владивосток 690041, Россия

*e-mail: Ryumina.aa@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 29.11.2023 г.

Принята к публикации 24.01.2024 г.

В работе были проанализированы концентрации тяжелых металлов в живых и отмерших листьях, стеблях, корневищах и корнях морской травы *Zostera marina* Linnaeus, 1753. Металлы по концентрации располагались в ряду Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd. Обнаружена разница в содержании Fe, Pb, Ni и Cd в живых и отмерших листьях. Рассчитан фактор обогащения донных осадков тяжелыми металлами из отмерших листьев, который изменялся в ряду Cu > Pb > Zn > Ni > Mn. В этом же ряду изменялся показатель произведения растворимости [-lg(ПП)] сульфидов перечисленных металлов.

Ключевые слова: *Zostera marina*, тяжелые металлы, б. Воевода, Амурский залив

DOI: 10.31857/S0134347524030055

Среди загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду, тяжелые металлы (ТМ) неизменно остаются одной из ведущих групп. В водную среду металлы попадают с атмосферными осадками, химическим выветриванием горных пород, вымыванием сорбционных форм из почв, с поверхностным стоком и со сточными (промышленными, сельскохозяйственными, хозяйственно-бытовыми) водами. Кроме того, загрязнение могут вызывать танкеры, перевозящие нефть и нефтепродукты, а также другие суда (Христофорова и др., 2015). ТМ считаются серьезными загрязнителями из-за их токсичности, устойчивости в окружающей среде и способности накапливаться в организмах.

Способность к биоаккумуляции ТМ была установлена для животных (Христофорова и др., 1994; Шулькин, 2004; Goldberg, 1986), водорослей (Христофорова, 1989; Коженкова, 2000; Чернова, Коженкова, 2016; Riosmena-Rodríguez et al., 2010), а также морских трав.

Среди последних *Zostera marina* Linnaeus, 1753 — один из объектов повышенного внимания исследователей как возможный индикатор состояния вод (Шишлова, 2002; Чернова, 2012; Brix, Lyngby, 1984; Schlacher-Hoenlinger, Schlacher, 1998; Govers et al., 2014; Bonanno, Di Martino, 2016; Hosokawa et al., 2016; Lin et al., 2016; Bonanno, Orlando-Bonaca, 2017; Bonanno, Borg, 2018; Arici, Vat, 2020).

Важное достоинство *Z. marina* состоит в том, что она является ключевым элементом экосистемы, оказывающим влияние на состояние многих живых организмов в воде, на границе вода—дно и в верхнем слое донных отложений (Larkum et al., 2006). Морские травы, как и водоросли, извлекают металлы из воды, абсорбируя их листовой пластиной, но в отличие от водорослей имеют развитую корневую систему, с помощью которой они также извлекают металлы из поровой воды, находящейся между частицами донных осадков. Одной из важных особенностей *Z. marina* является ее

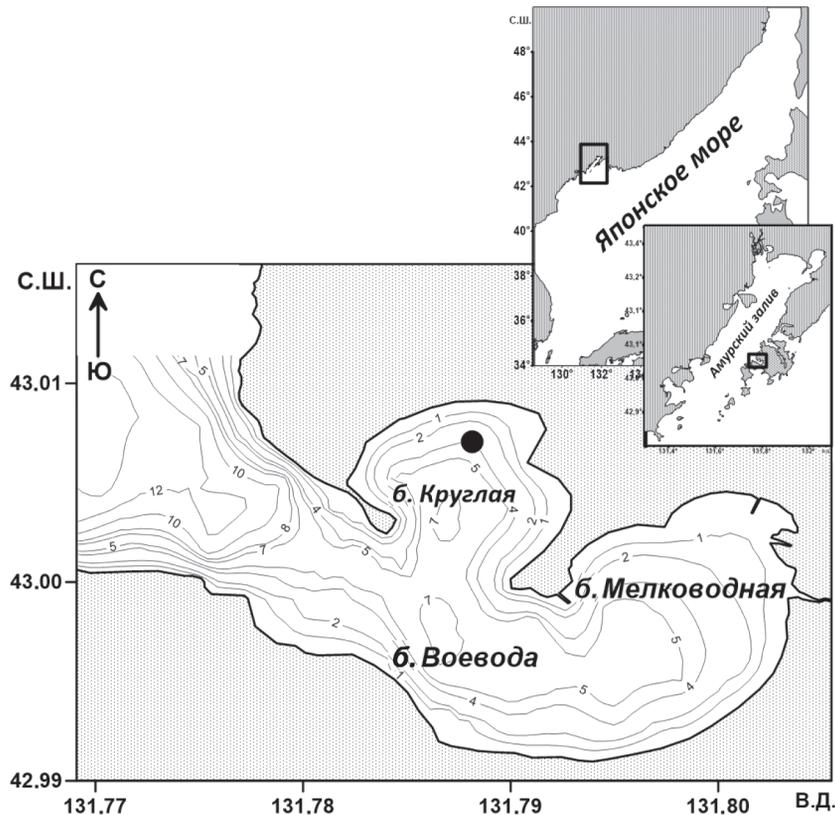


Рис. 1. Карта-схема расположения станции отбора проб в б. Воевода.

чрезвычайно высокая продуктивность (Бергер, 2011; Барабанщиков и др., 2021; McRoy, 1974), которая приводит к обогащению донных отложений органическим веществом (Тищенко и др., 2022). Очевидно, что при столь высокой продуктивности и способности к биоаккумуляции, следует ожидать накопления ТМ в донных осадках, покрытых лугами *Z. marina*. Более того, была установлена линейная зависимость между содержанием органического вещества и концентрацией некоторых ТМ в донных осадках, покрытых морской травой (Рюмина и др., 2023).

Отличительной особенностью донных осадков в б. Воевода является высокое содержание органического вещества и процесс сульфатредукции, проходящий в них (Тищенко и др., 2020; Рюмина и др., 2023).

Цели данной работы: определить концентрацию ТМ (Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Cd) и органического углерода в разных органах *Z. marina* (живые и отмершие листья, стебли, корневища, корни); оценить возможность обогащения морской травой верхнего слоя донных отложений ТМ. Для

этого были поставлены следующие задачи: отбор проб морской травы и подготовка образцов; выполнение анализов на содержание ТМ и органического углерода; расчет фактора обогащения верхнего слоя донных отложений ТМ.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Бухта Воевода располагается в восточной части мористого района Амурского залива (зал. Петра Великого, Японское море), глубоко вдаваясь в западное побережье о-ва Русский (рис. 1). Она состоит из двух мелководных бассейнов – бухт Круглая и Мелководная. Акватория б. Воевода имеет площадь около 4.0 км², Мелководной – около 2.4 км² и Круглой – около 1.6 км². С востока в бухту впадает единственная на острове небольшая р. Русская.

Образцы морской травы отбирали в сентябре 2022 г. в закрытой мелководной части б. Воевода, где были выявлены ее обширные луга (рис. 1). Ранее здесь отбирали керны донных отложений, в которых изучали содержание ТМ и органического углерода (Рюмина и др., 2023).

Водолазы отбирали морскую траву в полиэтиленовые пакеты на глубине около 4 м, промывали морской водой и в чистых полиэтиленовых пакетах доставляли в лабораторию. Траву разделяли на пять категорий: живые листья, отмершие листья, стебли, корневища и корни. Образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 60°C. Растительный материал измельчали, растирая в фарфоровой ступке. Подготовку и анализ проб на содержание ТМ осуществляли по методике, опубликованной в работе Брикса и Лингби (Brix, Lyngby, 1982). В коническую колбу объемом 100 мл помещали навеску массой 1 г измельченного растительного материала, дополнительно высушенного до постоянной массы при 105°C. Осторожно, порциями по 5 мл, не допуская сильного вспенивания и разбрызгивания, прибавляли 20 мл концентрированной HNO₃ марки ОСЧ, накрывали часовым стеклом и оставляли на ночь. На следующий день на электроплите, накрытой асбестовым покрывалом, не снимая с колб часовых стекол, осторожно нагревали образцы до осветления раствора. Затем по каплям прибавляли 1 мл H₂O₂ и повторно нагревали примерно в течение часа. Растворы упаривали до влажных солей, добавляли 1 мл дистиллированной воды и упаривали досуха, еще раз добавляли 1 мл воды и снова упаривали. Сухой остаток растворяли в 12 мл 2% азотной кислоты. Содержание ТМ (Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Cd) в разных органах морской травы определяли пламенным атомно-абсорбционным методом на аппарате AA-3600 (Shimadzu, Япония).

Органический углерод (C_{орг}) в органах *Z. marina* был измерен на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSM-5000A (Shimadzu, Япония). Принцип действия анализатора основан на измерении поглощения инфракрасного излучения двуокисью углерода, образующейся при сжигании содержащих углерод органических и неорганических соединений. Для определения содержания общего углерода сухие растертые навески осадка сжигали в потоке высокочистого кислорода (99.995%) при 900°C. Для определения содержания неорганического углерода пробы подкисляли ортофосфорной кислотой и сжигали при 200°C. Величину органического углерода рассчитывали по разности общего и неорганического углерода.

Фактор обогащения донных осадков (F_i) ТМ рассчитывали по формуле:

$$F_i = \frac{C_{i(\text{sed})} \times C_{\text{carb}(ZM)}}{C_{\text{carb}(\text{sed})} \times C_{i(ZM)}}, \quad (1)$$

где C_{i(sed)}, C_{i(ZM)} – концентрация металла i в донном осадке (мкг/г) и в отмерших листьях ZM (мкг/г); C_{carb(sed)}, C_{carb(ZM)} – концентрация органического углерода в донном осадке (гС/г) и в отмерших листьях (гС/г) (Булатов, Калинин, 1986; Aytop et al., 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные нами концентрации ТМ и органического углерода в разных органах *Z. marina* представлены в табл. 1. Здесь же приведены концентрации ТМ (мкг/г) в верхнем слое донных осадков (0–5 см) и значения фактора обогащения донных осадков (F_i) ТМ для отмерших листьев.

Отмершие листья и корни морской травы содержали наибольшее количество железа, тогда как стебли – наименьшее. В корневищах и листьях концентрации металла были сопоставимы. Наибольшее содержание марганца зафиксировано в живых и отмерших листьях, а наименьшая концентрация отмечена в стеблях и корневищах. В корнях марганца содержалось значительно меньше, чем в листьях, но больше чем в стеблях и корневищах. Наибольшее количество цинка и меди обнаружено в стеблях и корнях. Значительно меньше этих металлов было в живых и отмерших листьях. Наибольшее содержание свинца зафиксировано в корнях и отмерших листьях. В корневищах, живых листьях и стеблях его концентрация постепенно убывала. Наибольшее содержание никеля наблюдалось в отмерших листьях, в корнях и живых листьях концентрация никеля уменьшалась. Наименьшее его содержание было в стеблях и корневищах. Наибольшая концентрация кадмия зафиксирована в живых листьях (табл. 1).

Фактор обогащения верхнего слоя донных осадков токсичными металлами изменялся от 4.69 (Mn) до 163.1 (Cu) (табл. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение полученных концентраций тяжелых металлов с литературными данными

В табл. 2 представлены фоновые концентрации ТМ в донных осадках (Шулькин, 2004) и

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов и органического углерода в разных органах *Zostera marina* и в поверхностном слое донных осадков

Субстрат	Содержание металлов, мкг/г сух. массы							C _{орг} , %	n
	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd		
Живые листья	101 ± 10	285 ± 3	22.3 ± 1.1	3.0 ± 0.1	2.0 ± 0.5	1.6 ± 0.1	1.2 ± 0.3	35.03	5
Отмершие листья	742 ± 1	245 ± 4	22.7 ± 1.2	3.1 ± 0.03	4.1 ± 0.2	3.2 ± 0.2	0.4 ± 0.2	33.23	3
Стебли	70 ± 4	7.5 ± 0.3	41.3 ± 0.5	4.1 ± 0.8	1.5 ± 0.5	0.8 ± 0.1	0.5 ± 0.1	32.25	5
Корневище	119 ± 2	2.3 ± 0.1	18.0 ± 0.5	1.9 ± 0.6	2.3 ± 0.1	0.7 ± 0.3	0.3 ± 0.1	29.89	4
Корни	500 ± 20	32.8 ± 0.1	38.4 ± 1.7	4.1 ± 0.6	4.3 ± 0.4	1.4 ± 0.1	0.5 ± 0.1	34.43	2
Донные осадки	–	208 ± 3	204 ± 4	91 ± 2	37 ± 2	27 ± 1.5	–	6.01	3

Показатель

-lg[ПР(MeS)]	18.43	15.15	23.35	37.5	28.45	20.52	28.44	–	–
F _i	–	4.69	49.67	163.12	50.01	46.12	–	–	–

Примечание. Указаны средние значения содержания ТМ и стандартное отклонение от среднего. Условные обозначения: n – количество проб в выборке; -lg[ПР(MeS)] – показатель произведения растворимости сульфидов металлов, взятый из Справочника химика (1965); F_i – фактор обогащения донных осадков ТМ для отмерших листьев.

Таблица 2. Фоновые концентрации тяжелых металлов в прибрежных акваториях Японского моря

Субстрат	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd
1	3.5	350 ± 80	100 ± 10	28 ± 3	35 ± 5	45 ± 5	0.2 ± 0.1
2	1–10	2.6–20	0.5–0.8	0.3–1.2	0.05–0.1	–	0.005–0.04

Примечание. 1 – в донных осадках, где Fe в %, остальные металлы в мкг/г (Шулькин, 2004); 2 – в морской воде в мкг/л (Чернова, Шулькин, 2019).

Таблица 3. Литературные данные по содержанию тяжелых металлов в *Zostera marina* (в мкг/г сух. массы)

Части растения	Район исследования	Металлы							
		Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd	
Молодые листья Старые листья Стебли Корневище Корни	Зал. Восток, Японское море (Шишлова, 2002)	164	732	77.2	6.4	12.8	4.3	2.2	
		331	2118	28.9	4.9	8.4	5.8	3.8	
		505	288	31	5.3	9.4	3.6	1.8	
		663	64.3	21.2	4.6	8.6	2.4	1.4	
		5214	555	29	9.4	17.4	8.5	1.9	
Надземная часть	порт Посьет Мыс Шелеха Мыс Рязанова Мыс Морозова Б. Рейд Паллада Мыс Мраморный (Chernova et al., 2002)	268 ± 24	674 ± 43	31 ± 3.8	5.3 ± 2.1	9.1 ± 0.5	2.7 ± 0.3	2.3 ± 0.1	
		297 ± 81	358 ± 29	26 ± 1.4	3.8 ± 0.7	11.4 ± 4.9	3.5 ± 0.3	1.9 ± 0.1	
		235 ± 13	573 ± 88	25 ± 1.9	5.3 ± 0.1	8.2 ± 0.5	2.3 ± 0.1	1.6 ± 0.2	
		214 ± 16	240 ± 27	21 ± 0.3	2.8 ± 0.2	8.9 ± 4.5	2.3 ± 0.1	2.3 ± 0.1	
Листья	Зал. Петра Великого, Японское море (Чернова, 2012)	23–537	58–925	12.6–35.8	2.3–6.2	–	1.8–4.5	1.1–3.4	
		463–5742	16–142	12.5–40.5	3.5–9.1	–	0.4–5.3	0.5–2.6	
Надземная часть	Б. Онсан Б. Джаран Б. Коджэ, Южная Корея (Lee G et al., 2019)	100.6	198.9	53.9	20.3	1	–	0.6	
		68.9	187.9	26.1	20.8	2.1	–	0.6	
		83.1	174	20.1	17.1	1	–	0.2	
		268.3	13.5	25.6	14.4	0.8	–	0.2	
Подземная часть		291.5	15.7	13.1	12.1	1.5	–	0.5	
		176	10.3	12.9	9.9	0.9	–	0.2	
Надземная часть	Лимфьорд, Дания (Brix, Lyngby, 1984)	80–2990	480–5770	41–175	2.7–10.7	0.5–3.1	–	0.1–2.9	
		101–4080	74–1200	25–125	1.8–5.8	0.4–2.8	–	0.1–0.9	
Живые листья Мертвые листья Стебель Корневище Корни	Лимфьорд, Дания (Lyngby, Brix, 1989)	–	–	107–270	–	2.9–30.4	–	0.3–1.5	
		–	–	148	–	31.4	–	0.5	
		–	–	62	–	2.9	–	0.3	
		–	–	36–90	–	1.5–5.2	–	0.3	
		–	–	134	–	40.6	–	0.6	
Надземная часть	Черноморское побережье Турции (Agić, Vat, 2020)	1719.7	761.8	114.8	13.6	1.9	7.3	0.1	
		4151	444	115.2	14	3.7	11.5	0.03	

морской воде для прибрежных акваторий Японского моря (Чернова, Шулькин, 2019). В литературе содержание ТМ чаще всего приводится для надземной и подземной частей *Z. marina*. Во втором случае рассматриваются все органы морской травы по отдельности. Опубликованные результаты суммированы в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что концентрация железа в надземной и подземной частях *Z. marina* изменяется в широком диапазоне. Наименьшее содержание железа соответствует стеблям, а наибольшее – корням и отмершим листьям; живые листья и корневища содержат его промежуточные концентрации. Полученные нами результаты согласуются с данными из зал. Восток Шиловой (2002) не по порядку величины, а по закономерностям содержания железа в органах *Z. marina*.

Полученные нами данные по концентрации марганца также согласуются с литературными данными. Содержание марганца в надземной части *Z. marina*, как правило, выше, в сравнении с подземной частью.

Концентрации цинка и меди, полученные нами для надземной части *Z. marina*, по порядку величины сопоставимы с содержанием этих металлов в *Z. marina*, произрастающей у порта Посьет (Chernova et al., 2002). Также отмечено меньшее содержание этих металлов в корневищах по сравнению с корнями, что согласуется с ранее полученными данными (Шишлова, 2002; Lyngby, Brix, 1989).

Содержание свинца и никеля в корнях *Z. marina* почти в два раза выше, чем в корневище. Такая же картина наблюдается в зал. Восток (Шишлова, 2002). Полученные данные по содержанию свинца в *Z. marina* согласуются с результатами исследования у Черноморского побережья Турции (Arıcı, Vat, 2020), а данные по содержанию никеля – с результатами из порта Посьет (Chernova et al., 2002).

Полученные нами концентрации кадмия согласуются с данными для надземной и подземной частей *Z. marina* из Дании (Lyngby, Brix, 1989) и Южной Кореи (Lee et al., 2019).

Распределение тяжелых металлов в морской траве Zostera marina

Железо. Содержание железа в макрофитах *Z. marina* по сравнению с другими тяжелыми

металлами, как правило, наибольшее (Чернова, Шулькин, 2019). Известно, что гидроксиды железа существуют в морской воде в виде тонких взвешенных частиц (Христофорова, Кобзарь, 2012). Очевидно, что обилие тонкой взвеси, обогащенной Fe, – основная причина резкого возрастания концентрации этого элемента в листьях, особенно в отмерших.

Повышенное содержание железа в корнях (500 ± 20 мкг/г сух. массы) можно объяснить тем, что они находились в непосредственной близости с донными осадками и содержали в себе их маленькие гранулы, не вымывшиеся полностью.

Марганец. Повышенное содержание марганца в листьях может быть связано с тем, что данный элемент входит в состав целого ряда металлоферментов и участвует в процессе фотосинтеза (Шишлова, 2002). Этот факт объясняет его большое количество в живых листьях (285 ± 3 мкг/г сух. массы) и уменьшение содержания в отмерших листьях (245 ± 4 мкг/г сух. массы).

Цинк и медь. Микроэлементы участвуют практически во всех процессах, происходящих в растительной клетке: энергетическом обмене, первичном и вторичном метаболизме, гормональной регуляции и передаче сигнала. Следует также отметить, что 25–50% всех белков работают только в присутствии ионов металлов, из них наибольшее количество (более 1200) функционально связаны с цинком (Титов и др., 2014). Медь – необходимый в качестве микроэлемента участник электрон-транспортной цепи дыхания, процесса фотосинтеза, реакций окисления, метаболизма белков и углеводов (Иванищев, 2020). Наибольшее количество цинка (41.3 ± 0.5 мкг/г сух. массы) и меди (4.1 ± 0.8 мкг/г сух. массы) обнаружено в стеблях, основной функцией которых является транспортировка питательных веществ между корневой системой и листьями. В корнях также присутствует большое количество цинка (38.4 ± 1.7 мкг/г сух. массы) и меди (4.1 ± 0.6 мкг/г сух. массы). Для живых и отмерших листьев нет различий в концентрациях обсуждаемых микроэлементов. Данный факт указывает на то, что эти микроэлементы находятся в воде в основном в растворенном виде, а не во взвешенном состоянии (Христофорова, Кобзарь, 2012).

и поступают в *Z. marina* через корневую систему (Nielsen et al., 2017).

Свинец. Характер распределения свинца в органах и тканях растения сходен с распределением железа. Оба эти элемента в воде находятся во взвешенном состоянии, легко осаждаются и накапливаются в грунте, поэтому они аккумулируются преимущественно корневищами *Z. marina* и мертвыми листьями (Шишлова, 2002). Такие же результаты наблюдаются с никелем. При исследовании роли разлагающихся листьев в накоплении поверхностными донными осадками металлов было установлено, что наличие эпифитов на листьях *Z. marina* приводит к увеличению содержания свинца (Hosokawa et al., 2016). Такая же картина наблюдалась в нашем исследовании. Предполагается, что накопление свинца в разлагающихся листьях может происходить за счет их фрагментации беспозвоночными, что увеличивает площадь поверхности листьев (Schaller et al., 2010), а развитие биопленки приводит к концентрированию металлов (Schaller et al., 2011). Авторы придерживаются точки зрения, что водная толща служит источником металлов при их накоплении в разложившихся листьях.

Никель. Известно, что никель обладает способностью к адсорбции разными минералами, например, сульфидами и оксигидроксидами марганца и железа (Kaushik et al., 2021). Вследствие этого никель может соосаждаться вместе с железом и “налипать” на листья *Z. marina*. Этим мы объясняем высокое содержание этого металла в листьях, особенно в отмерших.

Кадмий. Показано, что при разложении эпифитонами листьев морской травы, содержание кадмия в листьях уменьшалось (Hosokawa et al., 2016). Уменьшение содержания кадмия в разлагающихся листьях свидетельствует о более сильном выщелачивании, чем о накоплении, несмотря на то, что эти металлы накапливаются в листьях в пресноводных условиях (Schaller et al., 2010). Кроме того, известно, что по сравнению с медью и свинцом, кадмий находится в относительно низкой концентрации в растворенных органических веществах, содержащих гуминовые кислоты (Mantoura et al., 1978; Tipping et al., 2003). Свойства гуминовых веществ могут обуславливать различные

тенденции в накоплении микроэлементов разлагающимися листьями.

Фактор обогащения донных осадков тяжелыми металлами

Микробиологическая деструкция органического вещества опавших листьев *Z. marina* приводит к увеличению отношения единицы веса металла к единице веса органического вещества, так как металл не улетучивается, а органическое вещество переходит в неорганическую форму, в основном в CO_2 . Таким образом, концентрация металла на единицу органического углерода растёт. Фактор обогащения донных осадков, представленный формулой (1), должен быть одинаков для всех металлов, если происходит единственный процесс – микробиологическая деструкция органического вещества. В действительности, фактор обогащения изменялся от 4.69 (Mn) до 163.1 (Cu) (табл. 1). На наш взгляд, при попадании металлов с остатками органического вещества в донные осадки, они начинают разделяться на две фазы: неподвижную и подвижную. Неподвижная фаза – сульфиды металлов, которые образуются в результате сульфатредукции. Этот процесс возникает при микробиологической деструкции органического вещества в донных осадках в отсутствие кислорода (Тищенко и др., 2020). Подвижная фаза – органические комплексы ТМ. Следует отметить, что фактор обогащения для исследуемых металлов изменялся в ряду $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Mn}$ (табл. 1). В этом же ряду изменялся показатель произведения растворимости $[-\lg(\text{ПР})]$, взятый из Справочника химика (1965). Очевидно, что доля неподвижной фазы для каждого металла в форме MeS тем выше, чем менее растворим сульфид (CuS). Подвижная фаза в форме органических комплексов может удаляться из донных осадков морскими организмами (детритофагами). Таким образом, в донных осадках происходит накопление одних металлов и удаление других. Очевидно, что удаление подвижной фазы металлов морскими организмами также сопровождается фракционированием.

Причиной этого, на наш взгляд, является конкуренция за место комплексообразователя между ионами металлов, которые перерабатываются морскими организмами вместе

с органическим веществом. По отношению к марганцу, ионы меди, цинка и свинца являются ингибиторами комплексообразования. Менее устойчивые комплексы выделяются морскими организмами в придонную воду (например, марганец), что приводит к вторичному загрязнению вышележащих вод (Yang et al., 2022).

Отмечено, что устойчивость металлоорганических соединений с медью выше, чем с никелем, что сопоставимо с рядом констант устойчивости Ирвинга-Уильямса ($Mn^{2+} < Fe^{2+} < Co^{2+} < Ni^{2+} < Cu^{2+} > Zn^{2+}$), который основан на комплексообразовании с простыми органическими лигандами (Zhang et al., 2019). Из этого ряда следует, что от марганца к меди образуются более устойчивые комплексы с органическими лигандами. Чем выше значение константы устойчивости, тем более прочным является образовавшийся комплекс и тем дольше он задерживается в подвижной форме донных осадков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят вед. инженера лаборатории гидрохимии ТОИ ДВО РАН Наталью Александровну Середу за всестороннюю поддержку и помощь в проведении лабораторных исследований и обработке результатов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена за счет средств бюджета Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (государственное задание № 121-021500052-9), а также при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00381-а.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барабанищikov Ю.А., Тищенко П.Я., Семкин П.Ю. и др. Особенности временной изменчивости содержания кислорода в зарослях *Zostera marina* Linnaeus,

1753 в бухте Воевода (Амурский залив, Японское море) // Морск. биол. журн. 2021. Т. 6. С. 3–16.

Бергер В.Я. О продукции zostеры *Zostera marina* Linnaeus, 1753 в Белом море // Биол. моря. 2011. Т. 37. С. 362–366.

Булатов М.И., Калинин И.П. Практическое руководство по фотометрическим методам анализа. Ленинград: Химия. 1986.

Иванищев В.В. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях // Изв. ТулГУ, Естественные науки. 2020. Вып. 1. С. 33–41.

Коженкова С.И. Мониторинг состояния прибрежно-морских вод Приморья по содержанию тяжелых металлов в бурых водорослях: Автореф. дис... канд. биол. наук. Владивосток: ИБМ. 2000.

Рюмина А.А., Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М. Тяжелые металлы и органический углерод в донных осадках мелководных бухт залива Петра Великого // Геохимия. 2023. Т. 68. doi: 10.31857/S0016752523060080

Справочник химика. М.-Л.: Химия. 1965. Т. 3.

Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Кар. НЦ РАН. 2014.

Тищенко П.Я., Медведев Е.В., Барабанищikov Ю.А. и др. Органический углерод и карбонатная система в донных отложениях мелководных бухт залива Петра Великого (Японское море) // Геохимия. 2020. Т. 65. С. 583–598.

Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М., Горячев В.А. и др. Депонированный органический углерод мелководных бухт залива Петра Великого (Японское море) // Геохимия. 2022. Т. 67. С. 1004–1012.

Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения вод тяжелыми металлами. Ленинград: Наука. 1989.

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. 2015. Т. 180. С. 179–186.

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., Шулькин В.М., Кавун В.Я. и др. Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука. 1994.

- Чернова Е.Н. Фоновые концентрации металлов в зоне берега морской из залива Петра Великого и оценка его современного экологического состояния / Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря, Владивосток: Изд. дом ДВФУ. 2012. С. 382–396.
- Чернова Е.Н., Коженкова С.И. Определение пороговых концентраций металлов в водорослях-индикаторах прибрежных вод северо-западной части Японского моря // Океанология. 2016. Т. 56. С. 393–402.
- Чернова Е.Н., Шулькин В.М. Концентрации металлов в воде и в водорослях: биоаккумуляционный фактор // Биол. моря. 2019. Т. 45. С. 177–187.
- Шишлова М.А. Зостера морская (*Zostera marina* L.) как индикатор загрязнения среды тяжелыми металлами: Автореф... дис. канд. биол. наук. Владивосток. 2002. 28 с.
- Шулькин В.М. Металлы в экосистемах морских мелководий. Владивосток: Дальнаука. 2004.
- Arici E., Bat L. Sediment-water interactions with eelgrass (*Zostera* spp.) from Sinop shores of the Black Sea // Caspian J. Environ. Sci. 2020. V. 18. № 2. P. 123–130.
- Айтоп Н., Коса Y.C., Şenol S. The importance of using soil series-based geochemical background values when calculating the enrichment factor in agricultural areas // Environ. Geochem. Health. 2023. V. 45. P. 6215–6230.
- Bonanno G., Borg J. Comparative analysis of trace element accumulation in seagrasses *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa*: Biomonitoring applications and legislative issues // Mar. Pollut. Bull. 2018. V. 128. P. 24–31.
- Bonanno G., Di Martino V. Seagrass *Cymodocea nodosa* as a trace element biomonitor: Bioaccumulation patterns and biomonitoring uses // J. Geochem. Explor. 2016. V. 169. P. 43–49.
- Bonanno G., Orlando-Bonaca M. Trace elements in Mediterranean seagrasses: Accumulation, tolerance and biomonitoring. A review // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 125. P. 8–18.
- Brix H., Lyngby J.E. The distribution of cadmium copper, lead and zinc in eelgrass (*Zostera marina* L.) // Sci. Total Environ. 1982. V. 24. P. 51–63.
- Brix H., Lyngby J.E. A survey of metallic composition of *Zostera marina* (L.) in the Limfjord, Denmark // Arch. Hydrobiol. 1984. V. 99. № 3. P. 347–359.
- Chernova E.N., Khristorofova N.K., Vyshkvartsev D.I. Heavy metals in seagrasses and algae of Pos'et Bay, Sea of Japan // Russ. J. Mar. Biol. 2002. V. 28. № 6. P. 387–392.
- Goldberg E.D. The mussel watch concept // Environ. Monit. Assess. 1986. V. 7. P. 91–103.
- Govers L., Lamers L., Bouma T. et al. Seagrasses as indicators for coastal trace metal pollution: A global meta-analysis serving as a benchmark, and a Caribbean case study // Environ. Pollut. 2014. V. 195. P. 210–217.
- Hosokawa S., Konuma S., Nakamura Y. Accumulation of trace metal elements (Cu, Zn, Cd, and Pb) in surface sediment via decomposed seagrass leaves: a mesocosm experiment using *Zostera marina* L. // PLoS One. 2016. V. 11. № 6. art. ID e0157983. doi 10.1371/journal.pone.0157983
- Kaushik H., Ranjan R., Ahmad R. et al. Assessment of trace metal contamination in the core sediment of Ramsar wetland (Kabar Tal), Begusarai, Bihar (India) // Environ. Sci. Pollut. Res. 2021. V. 28. P. 18686–18701.
- Larkum A.W.D., Orth R.J., Duarte C.M. Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation. Netherlands: Springer-Verlag. 2006.
- Lee G., Suonan Z., Kim S.H. et al. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass *Zostera marina* in the polluted bay systems // Mar. Pollut. Bull. 2019. V. 149. P. 1–12.
- Lin H., Sun T., Xue S., Jiang X. Heavy metal spatial variation, bioaccumulation, and risk assessment of *Zostera japonica* habitat in the Yellow River Estuary, China // Sci. Total Environ. 2016. V. 541. P. 435–443.
- Lyngby J.E., Brix H. Heavy metals in eelgrass (*Zostera marina* L.) during growth and decomposition // Hydrobiologia. 1989. V. 176/177. P. 189–196.
- Mantoura R.F.C., Dickson A., Riley J.P. The complexation of metals with humic materials in natural waters // Estuarine Coastal Mar. Sci. 1978. V. 6. № 4. P. 387–408.
- McRoy C.P. Seagrass productivity: carbon uptake experiments in eelgrass, *Zoster Marina* // Aquaculture. 1974. V. 4. P. 131–137.
- Nielsen S.L., Banta G.T., Khan F.R. et al. Copper in the sediment: a major stressor for eelgrass, *Zostera marina* L. // Hydrobiologia. 2017. V. 788. P. 143–155.
- Riosmena-Rodríguez R., Talavera-Sáenz A., Acosta-Vargas B., Garner S.C. Heavy metals dynamics in seaweeds and seagrasses in Bahía Magdalena, B.C.S., México // J. Appl. Phycol. 2010. V. 22. P. 283–291.
- Schaller J., Brackhage C., Mkandawire M., Dudel E.G. Metal/metalloid accumulation/remobilization during aquatic litter decomposition in freshwater: A review // Sci. Total Environ. 2011. V. 409. № 23. P. 4891–4898.
- Schaller J., Weiske A., Mkandawire M., Dudel E.G. Invertebrates control metals and arsenic sequestration

- as ecosystem engineers // *Chemosphere*. 2010. V. 79. № 2. P. 169–173.
- Schlacher-Hoenlinger M.A., Schlacher T.A.* Differential accumulation patterns of heavy metals among the dominant macrophytes of a mediterranean sea-grass meadow // *Chemosphere*. 1998. V. 37. № 8. P. 1511–1519.
- Tipping E., Rieuwerts J., Pan G. et al.* The solid–solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales // *Environ. Pollut.* 2003. V. 125. P. 213–225.
- Yang F., Tang Y., Mi Y. et al.* Mn (II) sorption on stream sediments sampled in manganese mining area: Dynamics and mechanisms // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. № 7. Art. ID 3368. doi 10.3390/app12073368
- Zhang J., Kattner G., Koch B.P.* Interactions of trace elements and organic ligands in seawater and implications for quantifying biogeochemical dynamics: A review // *Earth Sci. Rev.* 2019. V. 192. P. 631–649.

Heavy Metal Content in the Seagrass *Zostera marina* Linnaeus, 1753 in Voevoda Bay (Amur Bay, Sea of Japan)

A. A. Ryumina^a, P. Ya. Tishenko^a, E. M. Shkirknikova^a, Yu. A. Barabanshchikov^a

^a*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok 690041, Russia*

Concentrations of heavy metals in live and dead leaves, stems, rhizomes and roots of the seagrass *Zostera marina* Linnaeus, 1753 were analyzed in the study. On the basis of concentration, the metals were arranged in the following row: Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd. Differences in Fe, Pb, Ni, and Cd for live and dead leaves were revealed. The factor of sediment enrichment in heavy metals from dead leaves was calculated. The enrichment factor for the metals under study changed in the row Cu > Pb > Zn > Ni > Mn, and the value of solubility product [–lg(SP)] for sulfides of the above-listed metals changed in the same row.

Keywords: *Zostera marina*, heavy metals, Voevoda Bay, Amur Bay