

УДК 550.47:504.054:582.272

БУРАЯ ВОДРОСЛЬ *FUCUS DISTICHUS* SUBSP. *EVANESCENS* (С. AGARDH) Н.Т. POWELL КАК ИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

© 2025 г. С. И. Коженкова (ORCID: 0000-0002-8503-2006)

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, 690041 Россия
e-mail: svetlana@tigdvo.ru

Поступила в редакцию 05.11.2024 г.

После доработки 18.02.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

Изучено содержание тяжелых металлов (кадмия, меди, никеля, свинца, железа, марганца и цинка) в целых талломах и отдельных фрагментах многолетней бурой водоросли *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (С. Agardh) Н.Т. Powell в фоновом и загрязненном районах северо-западной части Японского моря в 2020 г. В фоновом районе (зал. Опричник) старые части *F. distichus* и ветви с рецептакулами содержали в 1.5–2 раза больше железа, марганца и никеля, чем верхние молодые вегетативные ветви. В загрязненном районе (б. Рудная) различия между частями таллома выявлены по концентрациям цинка, кадмия, железа, марганца и никеля. Степень загрязнения б. Рудная тяжелыми металлами оценивали, сравнивая концентрации элементов в молодых вегетативных ветвях водорослей с пороговыми концентрациями. Наибольшая кратность их превышения выявлена для содержания цинка – в 29–36 раз в гавани “Ковш” б. Рудная. Сопутствующими загрязняющими веществами являются медь, марганец, кадмий, железо и свинец. Обсуждаются причины долговременных изменений экологического состояния б. Рудная.

Ключевые слова: биоиндикаторы, фоновые концентрации, верхние молодые ветви, рецептакулы, загрязнение, долговременный мониторинг, Японское море

DOI: 10.31857/S0134347525030058, EDN: PUKNES

Виды рода *Fucus* Linnaeus широко распространены на литорали и в верхней сублиторали умеренных и арктических морей Северного полушария. Анализ содержания тяжелых металлов в фукусах для контроля степени загрязнения морской среды, начатый в 1950-е гг. в Великобритании и Канаде (García-Seoane et al., 2018), в настоящее время часто применяется во всем мире, в том числе в морях Российской Федерации (Малиновская, 1996; Чернова, Коженкова, 2020; Kangas, Autio, 1986; Forsberg et al., 1988; Bonanno, Orlando-Bonasa, 2018; El-Seifat et al., 2023). Макрофиты привлекли внимание исследователей способностью аккумулировать химические элементы с высоким коэффициентом накопления (до 10^4 – 10^6), относительной простотой отбора, а также меньшей вероятностью загрязнить пробы при отборе (в отличие

от проб воды). К преимуществам фукусов в качестве объектов для экологических исследований относится следующее: многолетний жизненный цикл и продолжительный период размножения, что обеспечивает стабильное произрастание популяций на одних и тех же станциях мониторинга; массовое развитие на мелководье и формирование продуктивных сообществ, что определяет относительную простоту отбора проб, а изъятие водорослей не создает угрозу сокращению биоразнообразия исследуемого района. Поскольку старые части талломов водорослей могут содержать более высокие концентрации некоторых металлов, чем их более молодые фрагменты (Barreiro et al., 1993; Stengel et al., 2005), для стандартизации проб необходимо использовать растения одинакового возраста (Христофорова, 1989), что

не всегда возможно в условиях ледового режима. Талломы фукусов, вмерзая в лед, часто отрываются от грунта (Клочкова и др., 2021), что влияет на возрастной состав популяции. Поэтому в ходе проведения мониторинга нередкой является ситуация, когда на литорали произрастают особи не всех возрастных групп. В этом случае проводят отбор тех растений, которые там встречаются. В связи с этим актуальным является установление особенностей химического состава разных возрастных групп видов-индикаторов, а также частей их талломов.

Цель работы – изучение содержания тяжелых металлов в целых талломах *F. distichus* subsp. *evanescens* (С. Agardh) Н.Т. Powell и их отдельных частях в фоновых и загрязненных условиях северо-западной части Японского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Пробы водорослей собирали в конце июля 2020 г. с трех станций вдоль северо-западного побережья Японского моря. Ст. 1 в зал. Опричник южнее Сихотэ-Алинского биосферного заповедника не была подвержена локальному загрязнению и рассматривалась в качестве фоновой. Ст. 2 и ст. 3 находились в б. Рудная, где высокая степень загрязнения морской среды тяжелыми металлами вызвана влиянием горно-рудного производства в долине р. Рудная (Коженкова и др., 2000; Кобзарь, Христофорова, 2019). Ст. 2 располагалась в 100 м от входа в гавань “Ковш”, а ст. 3 – к югу от ст. 2 на мористой стороне мыса Бринера. Температура воды составляла 16–19°C, температура воздуха – 23–25°C. Растения отбирали на литорали вручную, упаковывали в полиэтиленовые пакеты и доставляли в лабораторию станции мониторинга ТИГ ДВО РАН в пос. Рудная Пристань Приморского края.

Выделяли пять (G1–G5) размерно-возрастных групп растений (табл. 1). Водоросли

молодых возрастных групп G1, G2 и G3 имели по 2–4, 5–6 или 8–10 дихотомических ветвлений соответственно, все их веточки были вегетативными, оливкового цвета. В старшую возрастную группу G4 отнесены растения, несущие на концах ветвей рецептакулы разной степени зрелости, но при этом часть дихотомий оканчивались вегетативными ветвями. Наиболее старые растения (G5) имели коричневатую окраску, макушки всех ветвей были обломаны и не несли молодых дихотомий; лишь в средней части или в основании талломов присутствовали “щетки” коротких (до 0.7 см) молодых выростов. Учитывая литературные данные о размерно-возрастных характеристиках фукусов из различных районов Северного полушария (Клочкова и др., 2020, 2021; Keser, Larson, 1984; Ang, 1991), есть основания полагать, что выделенные нами группы G1 и G2 имеют возраст до одного года, группы G3 и G4 – до двух лет, группа G5 – три года и более.

Часть талломов высушивали целиком, каждый экземпляр анализировали как отдельную пробу. Растения из группы G2 отбирали целиком или делили на две равные по высоте части: основание и нижние части ветвей (O2), верхние молодые ветви (T2). Образцы растений из группы G3 сначала рассекали вертикально от основания до макушки на две равные части; одну из них анализировали как отдельную пробу, включающую и старые и молодые части таллома; у другой отсекали верхние (4 см) и нижние (4 см) участки – T3 и O3, а оставшуюся среднюю часть не включали в анализ. Для растений возрастных групп G4, как и для G3, сначала отделяли 1/2 таллома вертикальным сечением (G4) и анализировали как отдельную пробу. От другой половины отсекали следующие фрагменты: молодые ветви с макушек таллома длиной 4 см (T4); ветви с рецептакулами, длиной 4 см (R4); основание и нижние части ветвей длиной 4 см (O4).

Таблица 1. Размерные группы *Fucus distichus* subsp. *evanescens* из северо-западной части Японского моря

Группа	Высота таллома, см	Число дихотомий	Наличие рецептакулов
G1	2–5	2–4	Нет
G2	6–11	5–6	Нет
G3	10–14	8–10	Нет
G4	11–20	10–15	Есть
G5	6–13	>12	Нет

Таким образом, пробы *F. distichus* были представлены как целыми талломами (или 1/2 талломов) для групп G1, G2, G3, G4 и G5, так и различными фрагментами: старыми частями – O2, O3, O4; верхними молодыми ветвями – T2, T3, T4; ветвями с рецептакулами – R4. Каждая серия проб представлена 5–10 экз.

В день отбора пробы водорослей кратковременно (3 сек) ополаскивали дистиллированной водой, подсушивали на фильтровальной бумаге, упаковывали в бумажные пакеты и сушили при 85°C в сушильном шкафу. Дальнейший химический анализ талломов проводили в лаборатории ТИГ ДВО РАН (Владивосток). Водоросли измельчали и минерализовали азотной кислотой марки ОСЧ согласно ГОСТ 26929–94. Металлы Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd и Ni в макрофитах определяли атомно-абсорбционным методом. Результаты представлены в микрограммах на 1 г сухой массы.

Степень загрязнения вод б. Рудная оценивали путем сравнения концентраций тяжелых металлов в водорослях с верхними пороговыми значениями фоновых диапазонов элементов ($C_{\text{порог}}$), рассчитанными как медиана плюс двойная медиана абсолютных отклонений от медианы содержания элемента ($Me + 2MAO$) (Чернова, Коженкова, 2016). Кратность превышения концентрации металла в растении (C_i) над $C_{\text{порог}}$ обозначали как коэффициент опасности загрязнения водорослей металлами: $K_o = C_i / C_{\text{порог}}$ (Чернова, Коженкова, 2020). Статистические данные обработаны в программе MS Excel. Достоверность различий между содержанием металлов в талломах разных возрастных групп или отдельных фрагментах фукусов определяли с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни с использованием программного обеспечения PAST 4.02 для Windows.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание металлов в талломах Fucus distichus разного возраста и в отдельных фрагментах водорослей

Особей всех пяти размерно-возрастных групп *Fucus distichus* удалось отобрать на ст. 1. По уровню содержания металлов в целых талломах семь изученных элементов можно

разделить на две группы: Cd, Cu, Ni и Pb – до 8 мкг/г сух. массы; Fe, Mn, Zn – в пределах 23–75 мкг/г, за исключением Fe в старой возрастной группе G5 более 120 мкг/г (табл. 2).

Влияние возраста и функционального состояния частей талломов на концентрацию металлов проявлялось в более высоких значениях Fe, Mn и Ni в старых частях и в ветвях с рецептакулами (рис. 1). Если в молодых верхних вегетативных фрагментах талломов возрастных групп G2, G3 и G4 концентрации Fe и Mn составляли в среднем 27.4 ± 8.0 и 31.9 ± 5.6 , то в старых частях они достигали 61.0 ± 31.0 и 61.9 ± 10.9 мкг/г соответственно (различия достоверны при $p \leq 0.01$). В ветвях с рецептакулами содержание этих элементов было сопоставимо с таковым в старых частях талломов (рис. 1). Концентрации Ni в молодых ветвях T2, T3 и T4 были одинаковы и составляли в среднем 4.1 ± 0.3 мкг/г. Однако в старых частях значения были выше и увеличивались с возрастом: O2 = 6.2 ± 0.5 , O3 = 7.1 ± 1.4 , O4 = 8.4 ± 1.4 (различия между O2 и O4 достоверны при $p \leq 0.05$). Концентрации Ni в ветвях с рецептакулами (R4) составляли 8.9 ± 1.7 мкг/г, то есть в 2 раза выше, чем в молодых ветвях без органов размножения. По концентрациям Cd, Cu, Pb и Zn в растениях со ст. 1 не выявлено достоверной зависимости содержания элементов в талломах от возраста или функционального состояния.

Бурые водоросли *F. distichus*, собранные на ст. 2 (б. Рудная, “Ковш”), были представлены возрастными группами G3 и G4. В целых талломах выявлены максимальные концентрации Zn, они увеличивались с возрастом растений: G3 – 2077 ± 125 , G4 – 2947 ± 414 ($p \leq 0.05$). Концентрации железа изменялись от 56.3 до 72.4 мкг/г в талломах G3 и от 42.4 до 117.3 в G4; марганца – от 92.1 до 126.6 и от 103.8 до 252.9 соответственно. При этом наблюдался рост содержания элементов с возрастом (по Mn различия достоверны при $p \leq 0.05$). Уровни содержания Ni были сопоставимы со значениями по ст. 1; различия между G3 и G4 (рис. 1) достоверны ($p \leq 0.05$). Возрастных различий в содержании Cd, Cu и Pb в целых талломах *F. distichus* выявлено не было.

Химический анализ отдельных фрагментов талломов выявил возрастные и функциональные особенности микроэлементного состава

Таблица 2. Концентрации тяжелых металлов (мкг/г сух. массы) в талломах разных возрастных групп *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (n = 5–10) из северо-западной части Японского моря в 2020 г.

Возрастная группа	Cd	Cu	Ni	Pb	Fe	Mn	Zn
Ст. 1 – зал. Опричник, мыс Рифовый							
G1	1.2 ± 0.1	1.8 ± 0.2	5.2 ± 0.7	2.6 ± 0.2	42.6 ± 12.3	46.0 ± 10.7	46.3 ± 6.5
G2	1.1 ± 0.1	1.6 ± 0.6	4.5 ± 0.4	2.8 ± 0.3	36.7 ± 9.6	38.6 ± 6.8	43.0 ± 6.3
G3	1.1 ± 0.1	1.8 ± 0.2	4.6 ± 0.6	3.1 ± 0.2	41.2 ± 14.7	40.8 ± 9.1	41.5 ± 4.0
G4	1.2 ± 0.2	1.9 ± 0.1	6.3 ± 1.7	2.8 ± 0.3	37.1 ± 11.1	47.1 ± 11.1	51.0 ± 4.1
G5	1.4 ± 0.1	2.0 ± 0.3	6.9 ± 1.1	3.4 ± 0.7	179.2 ± 91.4	55.5 ± 17.1	41.3 ± 1.5
Ст. 2 – б. Рудная, рифы у “Ковша”							
G3	3.2 ± 0.2	9.1 ± 0.7	3.8 ± 0.3	5.3 ± 1.8	61.7 ± 9.3	105.5 ± 18.5	2076.8 ± 124.7
G4	3.8 ± 0.6	9.4 ± 1.1	5.5 ± 0.7	4.8 ± 0.6	84.0 ± 26.6	180.1 ± 50.5	2946.6 ± 413.9
Ст. 3 – б. Рудная, мыс Бринера							
G1	1.4 ± 0.2	4.8 ± 1.3	3.6 ± 0.4	3.3 ± 0.2	41.5 ± 11.7	74.4 ± 9.0	194.7 ± 15.0
G2	1.5 ± 0.1	4.2 ± 0.4	3.9 ± 0.3	3.3 ± 0.1	43.7 ± 6.7	66.1 ± 8.9	213.9 ± 30.3
G3	1.4 ± 0.2	3.6 ± 0.4	4.3 ± 0.5	3.1 ± 0.3	49.9 ± 38.3	65.0 ± 8.1	360.8 ± 221.4
G4	1.6 ± 0.2	3.5 ± 0.2	5.4 ± 0.8	3.0 ± 0.2	47.1 ± 0.7	78.1 ± 12.0	796.6 ± 99.7
Общемировые данные для бурых водорослей (Sanchez-Quiles et al., 2017)							
Медиана	1.0	5.7	6.0	5.5	301	67	49
Q3 (третий квартиль)	2.2	13.0	11.4	11.0	848	135	120
Максимум	31.4 ± 8.3	879 ± 1.3	60.6	878	22725 ± 622	1228 ± 611	3550

водорослей в условиях высокого загрязнения морской среды тяжелыми металлами. Если верхние вегетативные части растений G3 и G4 содержали примерно одинаковое количество этих элементов, то в старых частях возрастной группы G4 их концентрации как правило были выше, чем у G3 (для Zn и Cd различия достоверны при $p \leq 0.05$). Уровни содержания Ni в фукусах со ст. 2 существенно различались как между старыми и молодыми фрагментами талломов одной возрастной группы, так и между O3 и O4. Для Cu и Pb отмечена тенденция к увеличению концентраций металлов в старых частях талломов (рис. 2). Сравнительный анализ концентраций элементов в фрагментах T4 и R4 показал, что ветви с рецептакулами содержали в два раза больше Zn, Pb, Ni и Cd, чем вегетативные молодые ветви ($p \leq 0.01$). Отмечено накопление Fe и Mn в рецептакулах *F. distichus* и в старых частях талломов (см. рис. 2). Максимальные концентрации в фрагментах O4 составляли 129 ± 64 мкг/г железа и 466 ± 148 мкг/г марганца, что в 2 и более раз превышало содержание в фрагментах T4 и R4.

На ст. 3 – мыс Бринера, южный входной мыс б. Рудная, – были отобраны особи из возрастных групп G1, G2, G3 и G4. Металлы по уровню содержания в целых талломах, разделили на три группы: Zn от 180 до 900 мкг/г; Fe и Mn – менее 112 мкг/г; Cu, Pb, Ni и Cd – менее 7 мкг/г. Увеличение концентрации элемента с возрастом таллома выявлено для цинка: в группе G1 она достигала 195 ± 15 , в G2 – 214 ± 30 , в G3 – 361 ± 221 , а в G4 – 797 ± 100 мкг/г. При этом достоверны различия между концентрациями Zn в растениях из старшей группы G4, по сравнению с другими возрастными группами ($p \leq 0.05$). Верхние молодые ветви (T2, T3, T4) содержали гораздо меньше Fe, Mn, Zn, Ni и Cd, чем фертильные ветви и базальные части растений. Средняя концентрация металлов в молодых ветвях из групп G2, G3 и G4 составляла: Fe – 28 ± 6 , Mn – 54 ± 4 , Zn – 179 ± 21 , Ni – 3.6 ± 0.3 , Cd – 1.2 ± 0.1 мкг/г. В старых фрагментах талломов содержание этих элементов увеличивалось (рис. 3). Максимальные концентрации металлов в растениях со ст. 3 были обнаружены в фертильных ветвях с рецептакулами. Содержание Cu и Pb в различных частях

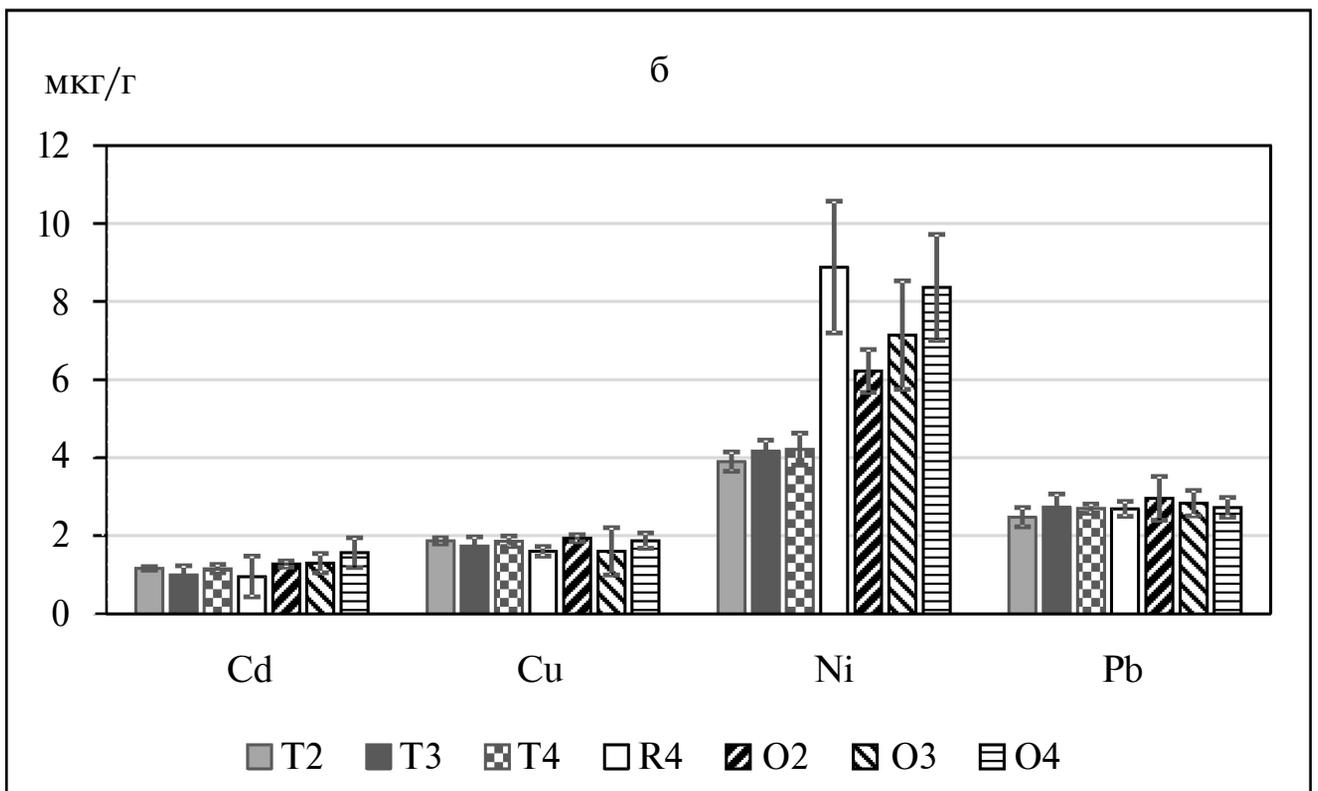
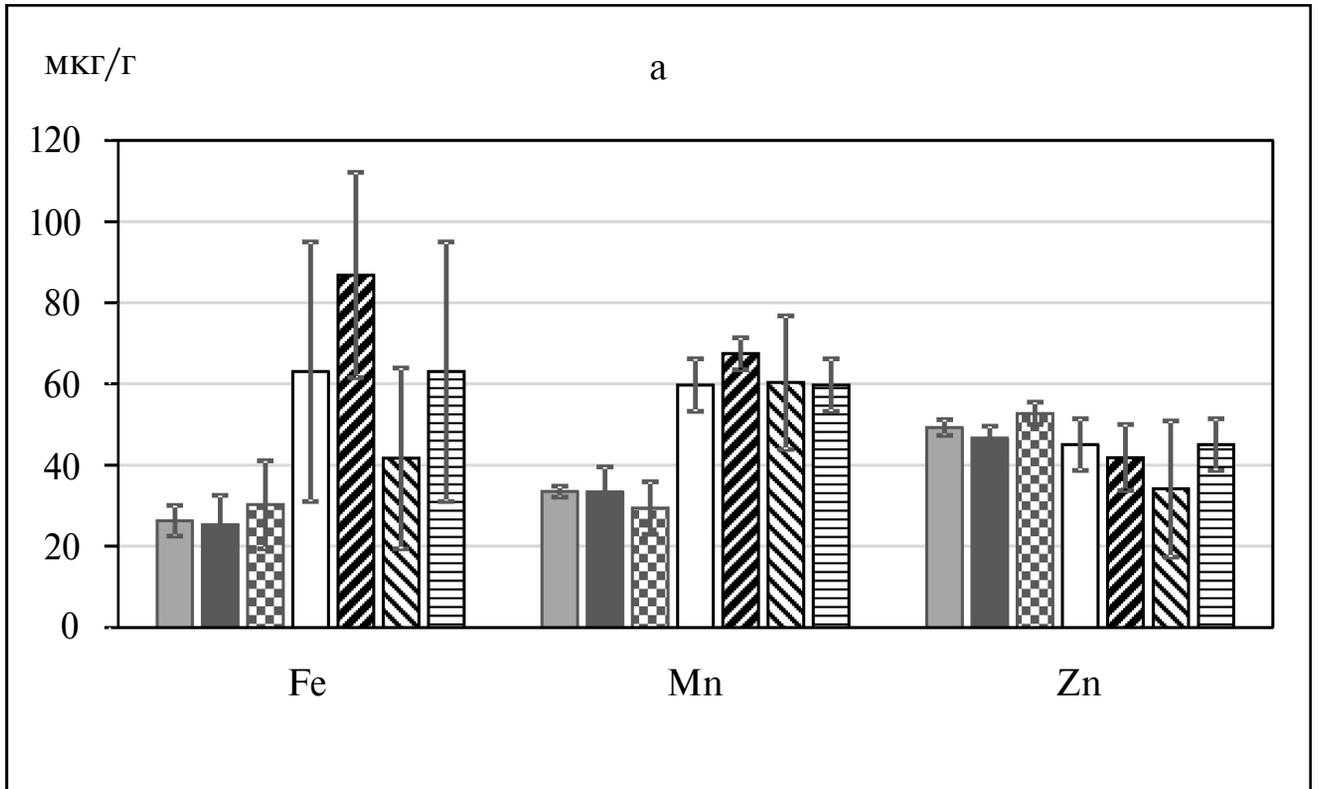


Рис. 1. Концентрации металлов в разных фрагментах талломов *F. distichus* на ст. 1 (зал. Опричник): (а) Fe, Mn, Zn; (б) Cd, Cu, Ni, Pb. Столбики – средние значения, линии – стандартное отклонение. Усл. обозначения: T2, T3, T4 – молодые вегетативные ветви возрастных групп G2, G3, G4; R4 – верхние ветви с рецептакулами; O2, O3, O4 – старые осевые части талломов возрастных групп G2, G3, G4.

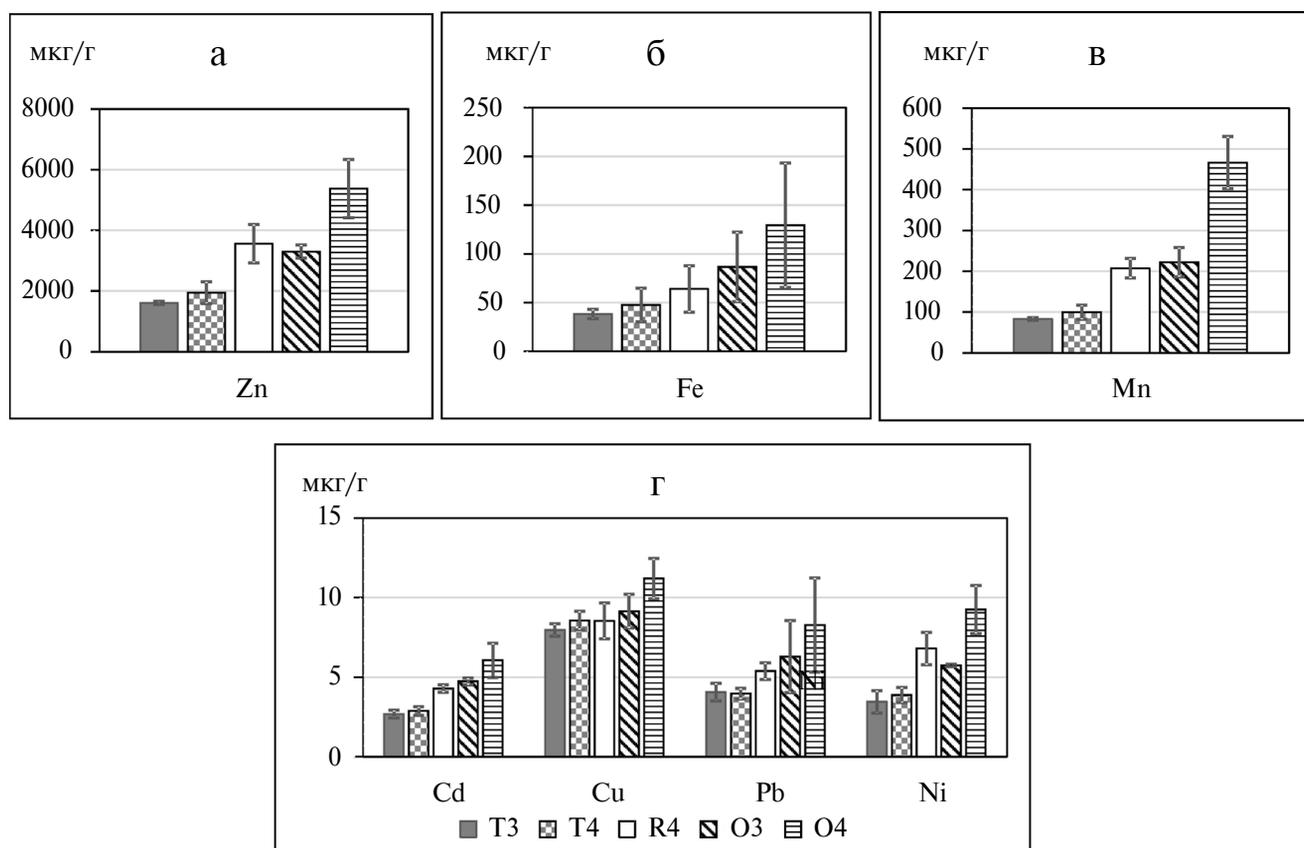


Рис. 2. Концентрации Zn (а), Fe (б), Mn (в), Cd, Cu, Pb и Ni (г) в разных фрагментах талломов *F. distichus* из б. Рудная (ст. 2). Усл. обозначения как на рис. 1.

разновозрастных талломов *F. distichus* почти не изменялось (см. рис. 3).

Сравнительный анализ концентраций металлов в целых растениях возрастной группы G1 и верхних молодых ветвях более старших возрастных групп T2, T3 и T4 с фоновой станции 1 показал (см. рис. 1, табл. 2), что содержание Fe, Mn и Ni в образцах G1 было на 20–40% выше. В то же время концентрации Cd, Cu, Pb и Zn в этих пробах водорослей не различались. Таким образом, в фоновых условиях растения возрастной группы G1 по содержанию в них Cd, Cu, Pb и Zn не отличались от молодых вегетативных ветвей более старших возрастных групп.

Фоновые концентрации металлов в молодых вегетативных ветвях Fucus distichus

Рассчитанные диапазоны фоновых концентраций микроэлементов представлены в табл. 3. В верхних молодых ветвях *F. distichus* пороговые

значения фоновых концентраций металлов убывали в ряду: Zn, Mn, Fe > Ni > Pb > Cu > Cd.

Загрязнение металлами б. Рудная

Коэффициент опасности загрязнения водорослей металлами (K_0) был рассчитан на основе данных о концентрациях элементов только в молодых вегетативных ветвях талломов. На ст. 2 значения K_0 составляли по содержанию цинка 29–36, меди – 3.8–4.1, марганца и кадмия – 2.0–2.5, железа и свинца – 1.2–1.5, никеля – 0.7–0.9. На ст. 3 превышение C_i над $C_{порог}$ было максимальным по содержанию Zn (3.1–3.2) и в меньшей степени – по содержанию Mn и Cu (1.3–1.7). Для Fe, Ni, Pb и Cd значения K_0 для фукусов со ст. 3 у мыса Бринера не превышали 1. Следовательно, основным поллютантом морской среды в б. Рудная являлся Zn, другие металлы – Mn, Fe, Pb, Cu и Cd – являлись сопутствующими загрязняющими веществами. Загрязнение никелем не выявлено.

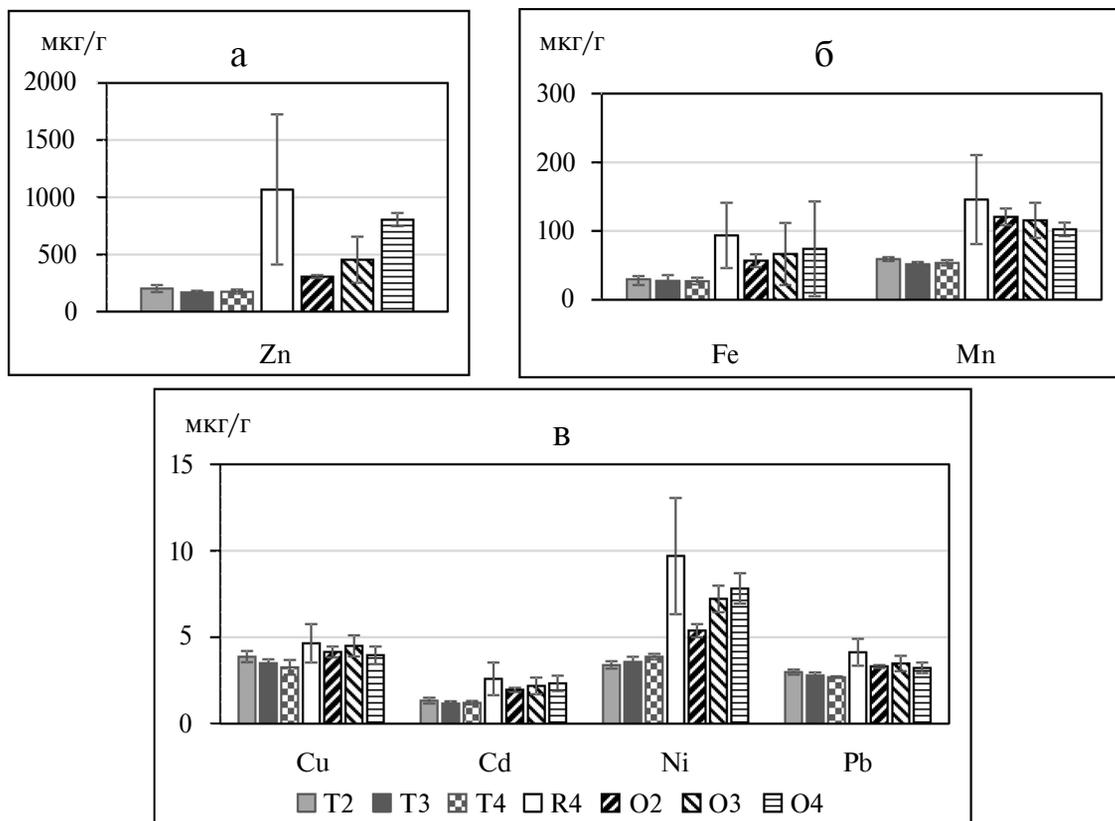


Рис. 3. Концентрации Zn (а), Fe и Mn (б), Cd, Cu, Ni и Pb (в) в разных фрагментах талломов *F. distichus* на ст. 3 (мыс Бринера). Усл. обозначения как на рис. 1.

Таблица 3. Фоновые диапазоны концентраций (мкг/г сух. массы) металлов в бурой водоросли *F. distichus* из северо-западной части Японского моря

Элемент	Верхние молодые ветви			Целые талломы (Чернова, Коженкова, 2016)		
	n	Av ± St	Фоновый диапазон	n	Av ± St	Фоновый диапазон
Cd	29	1.1 ± 0.2	0.8–1.4	19	2.5 ± 1.9	0.8–3.1
Cu	28	1.8 ± 0.2	1.4–2.0	19	3.0 ± 1.9	0.9–4.1
Ni	16	4.1 ± 0.3	3.6–4.6	–	–	–
Pb	29	2.8 ± 0.4	2.2–3.0	–	–	–
Fe	16	27.4 ± 8.0	21.0–31.4	18	77 ± 44	39–100
Mn	16	31.9 ± 5.6	25.2–40.5	19	55 ± 36	8–69
Zn	29	46.8 ± 6.8	26.4–54.7	15	51.4 ± 31.8	19.8–80

Примечание. Av ± St – среднее ± стандартное отклонение; n – величина выборки. “–” – нет данных.

ОБСУЖДЕНИЕ

Возрастные и функциональные изменения концентраций металлов в талломах Fucus distichus

Широкое распространение морских макрофитов, их ключевая роль в формировании морских экосистем и выраженная способность аккумулировать металлы определяют

перспективность их использования в качестве организмов-индикаторов загрязнения морских акваторий, подверженных антропогенному воздействию. Для корректной оценки уровня металлов в среде по их содержанию в водорослях необходимо учитывать специфику проявления концентрационной функции растений в зависимости от физиологических и экологических факторов (Бурдин, 1985). К физиологическим

параметрам относятся биохимический состав и возраст анализируемых тканей, анатомическое строение таллома, площадь его удельной поверхности, участок слоевища и др. Среди важных экологических факторов необходимо отметить следующие: химический состав среды (концентрация биогенных и токсичных элементов, соленость), динамика вод, а также географическая широта района, определяющая продолжительность дня, освещенность и температурный режим вод (Христофорова, 1989; García-Seoane et al., 2018; El-Seifat et al., 2023).

Бурая водоросль *Fucus distichus* subsp. *evanescens* имеет широкий аркто-тихоокеанский ареал, включающий арктические воды Северного Ледовитого океана, холодно-умеренные и частично теплоумеренные воды Атлантического и Тихого океанов (Клочкова и др., 2020). Вид встречается во всех морях российского Дальнего Востока. Во второй половине XX столетия российские ученые указывали его как *Fucus evanescens* C. Agardh.

Этот макрофит представляет собой уплощенный дихотомически разветвленный кустик до 25 (50) см высотой. В местах с оптимальными экологическими условиями обитания его биомасса может достигать 25 (70) кг/м² (Суховеева, Подкорытова, 2006). В северо-западной части Японского моря *F. distichus* населяет литораль, его обилие и биомасса увеличиваются с юга на север. Например, в зал. Петра Великого этот вид встречается редко и в виде отдельных кустика, в б. Киевка является доминантом или содоминантом литоральных сообществ скалистых грунтов с биомассой до 1748 г/м², а в зал. Чихачева (Татарский пролив) формирует выраженный пояс растительности с биомассой до 4450 г/м² (Kozhenkova, 2020).

Использовать *F. distichus* в качестве биоиндикатора загрязнения морских вод тяжелыми металлами на Дальнем Востоке начали в 1976 г. Изучение концентраций Fe, Mn, Zn, Cu и Pd в более старых нижних (7 см) и более молодых верхних (5–7 см) частях талломов фукусов примерно одинакового размера (20 см) проводили в конце октября 1977 г., "... когда бурные процессы роста и размножения закончились, интенсивность обменных процессов резко снизилась и произошло выравнивание концентраций

элементов по всему таллому" (Христофорова и др., 1981).

Учитывая, что в 2020 г. водоросли были отобраны в б. Рудной на тех же двух станциях, что и в 1977 г. (ст. 2 – "Ковш", ст. 3 – мыс Бринера), результаты исследований в разные годы и сезоны сравнимы. В 1977 г. на ст. 2 превышение концентраций Pb, Fe, Mn и Cu в старых частях таллома над их концентрациями в его молодых частях составляло 3.2, 3.0, 2.9 и 2.0 соответственно. В качестве контрольной станции исследовали литораль б. Лидовка в 10 км северо-восточнее б. Рудная. Было установлено, что в б. Лидовка "...стебли талломов по составу металлов не имели заметных преимуществ над верхними частями: содержание меди в них совпадало, практически одинаковы были и концентрации Mn и Zn (Mn чуть больше в стеблях, Zn – в верхушках). Лишь содержание Pb, и особенно Fe, в стеблях фукусов превышали количества этих металлов в верхушках слоевищ" (Христофорова и др., 1981).

Исследование 2020 г. показало, что в фоновом районе (ст. 1) в старых и молодых частях талломов *F. distichus* не наблюдалось различий в концентрациях Cd, Cu, Zn и Pb, но концентрации Fe, Mn и Ni в старых частях и в ветвях с рецептакулами были в 2 раза выше, чем в молодых вегетативных фрагментах (см. рис. 1). В б. Рудная (ст. 2) в условиях высокого загрязнения морской среды цинком, и в меньшей степени, медью, кадмием, марганцем, железом и свинцом, были выявлены различия в содержании металлов между разновозрастными участками талломов фукусов (см. рис. 2).

Согласно литературным данным, различия в концентрациях металлов между частями талломов бурых водорослей могут быть довольно существенными. При исследовании разных частей *Fucus vesiculosus* Linnaeus из Балтийского моря установлено, что концентрации Mn, Fe, Al, Zn, V и Ni в нижних "старых" были в два и более раз выше, чем в апикальных молодых фрагментах. Однако для Cd, Pb и Cu различия не были выявлены (Forsberg et al., 1988). При изучении этого же вида P. Kangas и H. Autio (1986) показали, что концентрации Zn и Cu от верхушек растений к их основанию увеличиваются, в то время как максимальные уровни железа были обнаружены в средней части талломов.

В макушках ветвей *Fucus ceranoides* Linnaeus из эстуарной зоны на северо-западе Испании, концентрации Al, Co, Cr, Fe, Mn, Ni и Zn были ниже, чем в более зрелых ветвях, но в концентрации Cu различий не выявили (Barreiro et al., 1993). Для фукусов Курильских островов отмечена тенденция увеличения концентраций Fe, Mn, Zn, Cu, Cd и Ni в более старых талломах, имеющих 7–8 дихотомических ветвлений, по сравнению с молодыми (с 2–3 ветвлениями). Однако для Pb и Cr такие закономерности не обнаружены (Малиновская, 1998). В близкородственной водоросли *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis из атлантического побережья Ирландии концентрации Cu и Fe в апикальных участках талломов были ниже, чем в “старых” ветвях (Stengel et al., 2005).

Различия в особенностях концентрирования металлов в связи с возрастом целых талломов или их отдельных фрагментов связаны с физиологическими потребностями макрофитов и формой существования элементов в морской среде. Некоторые микроэлементы, такие как Cu, Mn, Fe, Zn, Ni и Co, необходимы для роста водорослей, тогда как другие (например, Cd и Pb) не являются необходимыми и могут быть токсичными. Железо входит в состав многих ферментов, участвует в фотосинтетическом переносе электронов и в метаболизме азота и, таким образом, представляет собой важный микроэлемент для роста водорослей. Марганец необходим для фотосинтеза, он активирует ферменты, катализирующие реакции цикла Кребса и участвует в фотолизе воды. Медь является компонентом ряда окислительных ферментов (аминоксидаза, цитохромоксидаза). Цинк играет важную роль в функционировании многочисленных ферментов, включая ДНК- и РНК-полимеразу, карбоангидразу или щелочную фосфатазу. Однако в высоких концентрациях эти металлы могут стать токсичными, например, медь может подавлять фотосинтез и ограничивать рост водорослей (Камнев, 1989; Stengel et al., 2005; Bonanno, Orlando-Bonaca, 2018).

Накопление тяжелых металлов талломами водорослей происходит как из раствора, так и из сорбированных частиц взвеси. Механизм концентрирования представляет собой двухфазный процесс: поглощение, включающее абсорбцию элемента на поверхности ткани

и проникновение через мембрану внутрь клетки; образование комплексных соединений с органическими веществами. Поэтому содержание и/или тип полисахаридов в клеточной стенке макроводорослей во многом определяют интенсивность аккумуляции металлов (Камнев, 1989; Holan, Volesky, 1994; Kleiven et al., 2019).

Схематично строение клеточной стенки бурых водорослей можно представить следующим образом: целлюлозные цепи формируют упорядоченную прочную основу, в которую встроены различные полисахариды: альгиновая кислота и ее соли, фукоидан, аскофиллан и др. (Камнев, 1989). Эти соединения содержат множество функциональных групп. Ионы металлов либо замещают в них протоны водорода, либо участвуют в формировании иного типа связи, например, когда сульфатные группы соседних молекул полимеров связываются через “мостик-металл”, как полисахарид-О-SO₃-Pb-SO₃-О-полисахарид (Капков, Тришина, 1990; Holan, Volesky, 1994). Вся совокупность возможностей присоединения ионов металлов к полисахаридам клеточной стенки и определяет катионную емкость поверхностных структур. Внутри клетки металлы находятся в виде устойчивых комплексов с различными органическими веществами, а также в свободном ионном состоянии и легко обратимой адсорбированной форме. В условиях экстремально высокого содержания металлов в морской воде защитными механизмами водорослей являются связывание металлов с тиронеино-подобными белками или инертными метаболическими включениями (Камнев, 1989; Pellegrini et al., 1991; Andrade et al., 2010). В результате биохимических процессов концентрация металлов в более старых частях талломов, как правило выше, чем в молодых частях.

Выявленные нами высокие концентрации металлов в ветвях с рецептакулами очевидно вызваны как физиологическими, так и морфологическими особенностями талломов *F. distichus*. В фертильных частях водорослей увеличивается количество полисахаридов: фукоидана и альгинатов (Skriptsova et al., 2012). В рецептакулах происходит формирование мужских и женских половых клеток. Генеративные органы закладываются в округлых полостях – концептакулах, покрытых крышками,

в центре которых формируется пора — остиоль. Зрелые рецептакулы раздуваются и внутри них формируется полость, заполненная воздухом или слизью, содержащей в большом количестве альгинаты и фукоидан, способные связывать тяжелые металлы. Половые продукты выходят в окружающую среду через остиоль, после этого рецептакулы разрушаются или отламываются от несущей их ветви. Одновременно на одних ветвях фукуса идет процесс фертилизации, а другие остаются стерильными и продолжают свой рост (Клочкова и др., 2021). Таким образом, поступление внутрь полости частиц взвеси и растворенных форм элементов (с морской водой или атмосферными выпадениями) и большое содержание полисахаридов способствуют накоплению металлов в рецептакулах.

Фоновые концентрации тяжелых металлов в фукусах

Фоновая концентрация элемента в организме представляет собой сумму физиологически необходимого количества и некоторого нетоксичного избытка, накопленного из окружающей среды с регионально-фоновым содержанием микроэлементов, к которому организмы адаптированы. Взятые даже из одного и того же местообитания особи одного вида могут различаться по содержанию микроэлементов, что связано с их возрастом, генетической неоднородностью популяции и наличием в ее составе как гипо-, так и гиперконцентраторов химических веществ. В связи с этим фоновые концентрации металлов в живых организмах находятся в некотором диапазоне величин. Нижний порог этого диапазона для биофильных элементов (Cu, Zn, Ni, Fe и Mn) соответствует минимальному физиологически необходимому количеству или приближается к нулю для токсичных элементов (Pb, Cd), а верхний — пороговой величине концентрации элемента в организме, к которой вид адаптировался в данных условиях (Чернова, Коженкова, 2016).

Обзор методик и подходов к использованию макроводорослей в целях оценки степени загрязнения морских прибрежных вод тяжелыми металлами (García-Seoane et al., 2018) показал, что одни исследователи анализируют содержание элементов в целых талломах, другие — в отдельных фрагментах. Для многолетних видов

целесообразно отбирать для химического анализа только молодые части талломов. У фукусов — это верхние части ветвей. Однако, как показали наши исследования, особое внимание необходимо уделять наличию или отсутствию рецептакулов, химический состав которых может существенно отличаться от вегетативных частей таллома.

Установление фоновых концентраций металлов в водорослях является необходимым условием корректной оценки степени загрязнения морской среды в антропогенно-измененных местообитаниях. Ранее нами были рассчитаны фоновые концентрации металлов в целых талломах *F. distichus* и других видов бурых водорослей из северо-западной части Японского моря и показано, что в фоновых условиях различные виды содержат примерно одинаковые концентрации тяжелых металлов: Fe и Zn в тканях макрофитов содержатся в количестве десятков или сотен мкг/г сухой массы, а Cu, Pb, Cd и Ni — в количестве от десятых долей до десяти мкг/г (Чернова, Коженкова, 2016). На фоне общего сходства в содержании тяжелых металлов в разных видах бурых водорослей из северо-западной части Японского моря, *F. distichus* характеризуется более высокой концентрацией Zn. Так, верхний порог фонового диапазона для целых талломов фукусов составляет 80 мкг/г (см. табл. 3), в то время как для *Sargassum miyabei* Yendo, *S. pallidum* (Turner) C. Agardh, *Silvetia babingtonii* (Harvey) E.A. Serrão, T.O. Cho, S.M. Boo et Brawley и *Stephanocystis crassipes* (Mertens ex Turner) Draisma, Ballesteros, F. Rousseau et T. Thibaut он находится в диапазоне 23.9–42.7 мкг/г, что обусловлено биохимическим составом разных видов.

Концентрации металлов в верхних молодых вегетативных ветвях *F. distichus* в фоновых условиях имеют более узкие диапазоны, по сравнению с целыми талломами (см. табл. 3). Верхний пороговый уровень фоновых концентраций в макушках ниже, чем в целых талломах, что связано с особенностями биохимического состава (Камнев, 1989) разных по возрасту частей фукусов. Общий ряд убывания концентраций металлов в молодых частях *F. distichus* из Японского моря хорошо согласуется с соответствующей последовательностью для целых талломов из северо-западной части

Тихого океана (Малиновская, 1996; Чернова, Коженкова, 2016): Fe, Zn, Mn > Ni > Cd, Pb, Cu, но, по сравнению с бурыми водорослями побережья Атлантического океана, отличается более высокими концентрациями свинца. В молодых ветвях *F. distichus* из Японского моря фоновый диапазон Pb достигал 2.2–3.0 мкг/г; а у *F. vesiculosus* и *A. nodosum* из северо-западной части Атлантики – от 0.3 до 0.4 мкг/г (Riget et al., 1997). Различия в фоновых концентрациях свинца в бурых водорослях из Тихого и Атлантического океанов наблюдаются и по целым талломам: если в дальневосточных морях России величина обычно больше 1 мкг/г (Малиновская, 1996; Чернова, Коженкова, 2016), то у берегов Европы фукусовые водоросли накапливают заметно меньшие концентрации (Ryan et al., 2012; Kleiven et al., 2019), что, по-видимому, является отражением региональной геохимической специфики (Христофорова и др., 2023).

Долговременный мониторинг загрязнения б. Рудная металлами

Мониторинг экологического состояния б. Рудная был начат в 1976 г. В долине р. Рудная, расположенной на восточном макросклоне центральной части горного хребта Сихотэ-Алинь, функционирует горнопромышленный кластер, включающий добычу и обогащение Pb–Zn руд, а также добычу и глубокую переработку боросиликатных руд. До недавнего времени здесь же осуществляли выплавку свинца. Комплекс начал действовать более 100 лет назад. Вследствие избыточного поступления в окружающую среду тяжелых металлов сформировалась геохимическая аномалия, охватывающая как наземные, так и водные экосистемы долины р. Рудная и прилегающих морских акваторий. Интенсивность хозяйственной деятельности сильно менялась: до конца 1980-х годов происходил рост производства, но в начале 1990-х годов в связи с экономическим кризисом объемы выпуска продукции существенно уменьшились. В 2000-е годы произошло частичное восстановление производства, однако выплавку свинца на плавильном заводе, расположенном на побережье б. Рудная, прекратили (Христофорова, 1989; Коженкова и др., 2000; Кобзарь, Христофорова, 2019). В настоящее время в долине р. Рудная

продолжается добыча полиметаллических и боросиликатных руд, производство боросодержащей продукции, свинцового и цинкового концентратов. Измельченные концентраты на самосвалах доставляют к б. Рудная, где в гавани продукцию перегружают на суда.

Именно гавань “Ковш” – один из основных источников поступления поллютантов в бухту. В 2020 г. на ст. 2 в целых талломах *F. distichus* (G4) концентрация цинка достигала 2947 ± 414 мкг/г, что в 58 раз больше, чем в одновозрастных растениях с фоновой станции (51 ± 4 мкг/г), и сопоставимо с максимальной известной концентрацией цинка в бурых водорослях (см. табл. 2). Превышение концентраций Cd, Pb, Cu, Mn и Fe варьировало от 2 до 4 раз. Загрязнение никелем не выявлено (см. табл. 2).

Если содержание металлов в целых многолетних талломах водорослей является интегральной характеристикой за весь период жизни растения, то его молодые части отражают экологическое состояние морской среды за последние месяцы. K_0 , рассчитанный по данным о содержании элементов в молодых вегетативных ветвях талломов, достигал максимального значения также по концентрации Zn: на ст. 2 его значение составляло 29–36, на ст. 3 (мыс Бринера) – 3. Концентрации Cu превышали фоновый уровень в 4 и 1.5 раза соответственно. В число сопутствующих загрязняющих веществ входили также Mn, Cd, Fe и Pb (см. табл. 2).

По сравнению с 1970-ми гг., в 2020 г. концентрации цинка в *F. distichus* из б. Рудная стали выше. Так, в июле 1979 г. содержание цинка в целых талломах с южного бенча б. Рудная было 915 мкг/г.; у мыса Бринера фукусы содержали 230 мкг Zn/г сух. массы (Христофорова, 1989). В старых и молодых частях талломов *F. distichus* в октябре 1977 г. концентрации Zn составили соответственно: на ст. 2 – 800 и 1050 мкг/г, на ст. 3 – 350 и 390 мкг/г (Христофорова и др., 1981). По нашим данным в конце июля 2020 г. целые растения возрастной группы G4 содержали цинка в 3 раза больше (см. табл. 2), чем в 1979 г. В старых частях талломов на ст. 2 в 2020 г. содержание Zn достигало 5377 ± 959 , на ст. 3 – 805 ± 58 мкг/г (см. рис. 2, 3). Это свидетельствует о высоком загрязнении цинком вод б. Рудная. Очевидно, что источниками загрязнения являются цинковый концентрат,

перегрузка которого осуществляется в гавани бухты, а также воды р. Рудная, дренирующей территорию горно-добывающих производств. Площадь территории рудников, отвалов (мест складирования горной породы с непромышленными концентрациями металлов) и хвостохранилищ (складов отходов после обогащения руд) в водосборном бассейне р. Рудная год от года увеличивается. В результате окисления рудных минералов (сульфидов) на этих объектах формируются кислые сульфатные воды и образуются растворимые соединения рудных элементов, которые вовлекаются в водную миграцию. Со стоком р. Рудная загрязняющие вещества поступают в море; наибольшая интенсивность этого процесса отмечена в период прохождения тайфунов, характерных для июля и августа.

Концентрация Pb в *F. distichus* из б. Рудная в 2020 г. была в несколько раз меньше, чем в 1970-е годы. В районе гавани “Ковш” она уменьшилась с 21 мкг/г (Христофорова, 1989) до 4.9 ± 1.0 мкг/г, а у мыса Бринера – с 13.1 до 3.0 ± 0.3 мкг/г. Изменения содержания свинца в целых талломах фукусов на ст. 3 с 1976 г. по 2020 г. представлены на рис. 4. Динамика концентраций загрязняющих веществ в талломах *F. distichus* следовала за изменениями,

происходившими в долине р. Рудная. Сильное снижение концентрации Pb с 2009 г. связано с резким уменьшением поступления элемента в окружающую среду после прекращения работы свинцового плавильного завода (Кобзарь, Христофорова, 2019). В 1990-е гг. средний выброс свинца в атмосферу составлял 40 т/год; влияние газопылевых выбросов прослеживалось на площади около 100 км². Прекращение работы завода с устаревшим технологическим процессом выплавки способствовало улучшению локальной экологической ситуации по загрязнению свинцом.

ВЫВОДЫ

1. В фоновых условиях старые части талломов *F. distichus* и ветви с рецептакулами содержат Fe, Mn и Ni в 1.5–2 раза больше, чем молодые верхние ветви. Для концентраций Cd, Cu, Zn и Pb не выявлено различий, связанных с возрастом или функциональным состоянием талломов.

2. В пределах одной станции содержание металлов в молодых верхних ветвях (без рецептакулов) у разновозрастных талломов одинаковое. Поэтому для мониторинга степени загрязнения

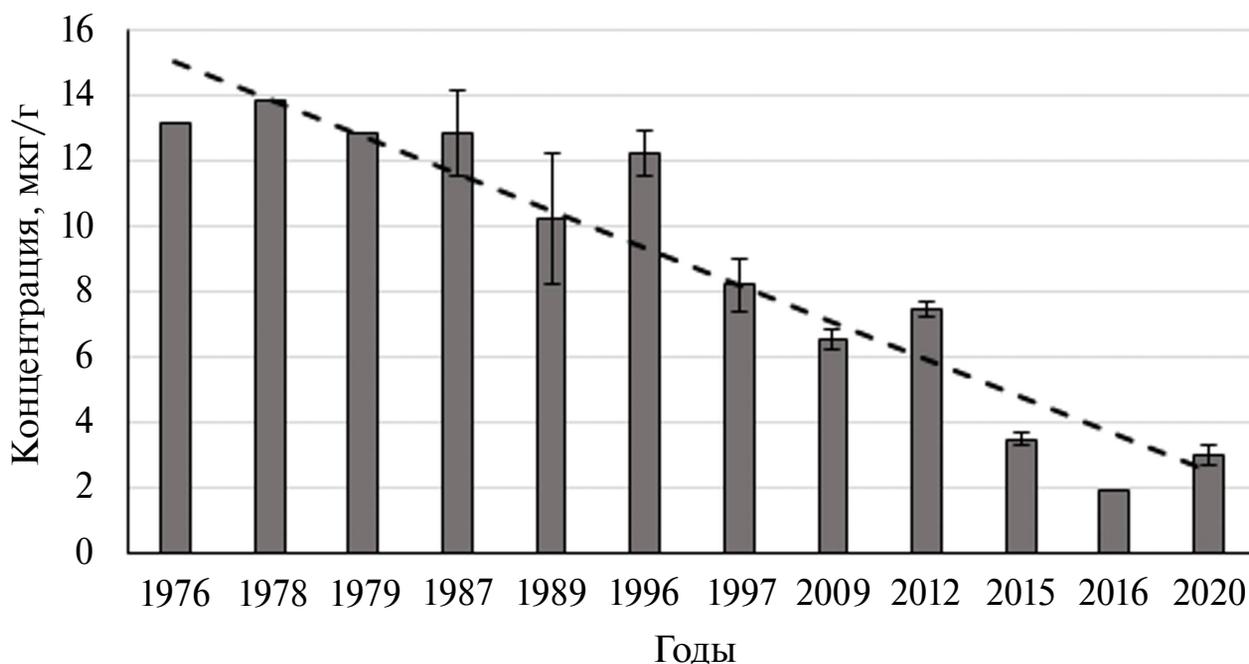


Рис. 4. Изменение концентрации свинца в целых талломах *F. distichus* на ст. 3 (мыс Бринера) с 1976 по 2020 гг. (мкг/г) и линия тренда. Составлено по: Христофорова, 1989; Коженкова и др., 2000; Кобзарь, Христофорова, 2019 и данным автора.

вод металлами рекомендуется отбирать именно молодые части растений.

3. В условиях загрязнения морской среды тяжелыми металлами с увеличением возраста тканей и целых талломов *F. distichus* происходит рост концентраций этих элементов. В б. Рудная, где основным поллютантом является цинк, выявлено увеличение его концентраций от младших к старшим возрастным группам (от G1 к G4). Для Mn и Ni такое увеличение отмечено на уровне тенденции. Различия в содержании Fe, Mn, Zn, Ni и Cd выявлены между частями таллома.

4. Фоновые концентрации металлов в верхних молодых ветвях *F. distichus* убывают в ряду Zn, Mn, Fe > Ni > Pb > Cu > Cd и имеют более узкие диапазоны по сравнению с целыми талломами водорослей.

5. Многолетний мониторинг в б. Рудная свидетельствует об уменьшении загрязнения свинцом после прекращения работы плавильного завода в пос. Рудная Пристань Приморского края. Однако загрязнение морской среды цинком продолжает оставаться высоким.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность сотрудникам ТИГ ДВО РАН А.М. Плотниковой, Г.А. Бескаравайной и Г.А. Власовой за помощь в подготовке и проведении аналитических работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Тихоокеанского института географии ДВО РАН (госзадание Минобрнауки РФ № 125021302113-3). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека и животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бурдин К.С. Основы биологического мониторинга. М.: Изд-во МГУ. 1985. 158 с.
- Камнев А.Н. Структура и функции бурых водорослей. М.: Изд-во МГУ. 1989. 200 с.
- Капков В.И., Тришина О.А. Содержание поливалентных металлов в промысловых макрофитах Белого моря // Гидробиол. журн. 1990. Т. 26. № 1. С. 71–75.
- Клочкова Н.Г., Кашутин А.Н., Клочкова Т.А. Рост и размножение меченых растений *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (Phaeophyceae, Fucales) в Авачинской губе (юго-восточная Камчатка) // Вестн. Камчат. гос. тех. ун-та. 2020. № 51. С. 55–65.
- Клочкова Т.А., Кашутин А.Н., Климова А.В., Клочкова Н.Г. Биология развития и экология бурой водоросли *Fucus distichus* в прибрежных водах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. 2021. 128 с.
- Кобзарь А.Д., Христофорова Н.К. Мониторинг загрязнения бухты Рудной (Японское море) по содержанию тяжелых металлов в бурых водорослях // Биол. моря. 2019. Т. 45. № 2. С. 133–140.
- Коженкова С.И., Христофорова Н.К., Чернова Е.Н. Долговременный мониторинг загрязнения морских вод Северного Приморья тяжелыми металлами с помощью бурых водорослей // Экология. 2000. № 3. С. 233–237.
- Малиновская Т.М. Оценка химико-экологического состояния прибрежных вод Курильских островов по содержанию металлов в бурой водоросли *Fucus evanescens* // Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток. 1996. 27 с.
- Малиновская Т.М. Содержание металлов в разновозрастных талломах бурой водоросли *Fucus evanescens* Курильских островов // Биол. моря. 1998. Т. 24. № 6. С. 397–399.
- Суховеева М.В., Подкорытова А.В. Промысловые водоросли и травы морей Дальнего Востока: биология, распространение, запасы, технология переработки. Владивосток: ТИПРО-центр. 2006. 243 с.
- Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами. Л.: Наука. 1989. 192 с.
- Христофорова Н.К., Богданова Н.Н., Обухов А.И. Использование бурых водорослей фукусов для индикации состояния прибрежно-морских вод // Сихотэ-Алинский биосферный район: принципы и методы экологического мониторинга. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1981. С. 118–127.

- Христофорова Н.К., Литвиненко А.В., Алексеев М.Ю., Цыганков В.Ю. Микроэлементный состав горбуши из рек баренцевоморского и охотоморского бассейнов // Рос. журн. биол. инвазий. 2023. Т. 16. № 2. С. 272–287.
- Чернова Е.Н., Коженкова С.И. Определение пороговых концентраций металлов в водорослях-индикаторах прибрежных вод северо-западной части Японского моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 393–402.
- Чернова Е.Н., Коженкова С.И. Пространственная оценка загрязнения залива Петра Великого (Японское море) металлами с помощью бурой водоросли *Sargassum miyabei* // Океанология. 2020. Т. 60. № 1. С. 49–56.
- Andrade L.R., Leal R.N., Noseda M. et al. Brown algae overproduce cell wall polysaccharides as a protection mechanism against the heavy metal toxicity // Mar. Pollut. Bull. 2010. V. 60. № 9. P. 1482–1488.
- Ang P.O. Jr. Natural dynamics of a *Fucus distichus* (Phaeophyceae, Fucales) population: reproduction and recruitment // Mar. Ecol.: Prog. Ser. 1991. V. 78. P. 71–85.
- Barreiro R., Real C., Carballeira A. Heavy-metal accumulation by *Fucus ceranoides* in a small estuary in north-west Spain // Mar. Environ. Res. 1993. V. 36. № 1. P. 39–61.
- Bonanno G., Orlando-Bonaca M. Chemical elements in Mediterranean macroalgae. A review // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2018. V. 148. P. 44–71.
- El-Seifat R.M., Bufarwa S.M., Gaballa M.F. et al. The role of marine algae as a bioindicator in assessing environmental pollution // J. Surv. Fish. Sci. 2023. V. 10. № 1. P. 1837–1869.
- Forsberg Å., Söderlund S., Frank A. et al. Studies on metal content in the brown seaweed, *Fucus vesiculosus*, from the Archipelago of Stockholm // Environ. Pollut. 1988. V. 49. № 4. P. 245–263.
- García-Seoane R., Fernández J.A., Villares R., Aboal J.R. Use of macroalgae to biomonitor pollutants in coastal waters: optimization of the methodology // Ecol. Indic. 2018. V. 84. P. 710–726.
- Holan Z.R., Volesky B. Biosorption of lead and nickel by biomass of marine algae // Biotechnol. Bioeng. 1994. V. 43. P. 1001–1009.
- Kangas P., Autio H. Macroalgae as indicators of heavy metal pollution // Publ. Water Res. Inst. 1986. V. 68. P. 183–189.
- Keser M., Larson B.R. Colonization and growth dynamics of three species of *Fucus* // Mar. Ecol.: Prog. Ser. 1984. V. 15. P. 125–134.
- Kleiven W., Johnsen G., Van Ardelan M. Sea surface microlayer and elemental composition in phaeo-, chloro-, and rhodophytes in winter and spring // J. Phycol. 2019. V. 55. № 4. P. 762–774.
- Kozhenkova S.I. Checklist of marine benthic algae from the Russian continental coast of the Sea of Japan // Phytotaxa. 2020. V. 437. № 4. P. 177–205.
- Pellegrini L., Pellegrini M., Delivopoulos S., Beraïl G. The effects of cadmium on the fine structure of the brown alga *Cystoseira barbata* forma *repens* Zinova et Kalugina // Br. Phycol. J. 1991. V. 26. P. 1–8.
- Riget F., Johansen P., Asmund G. Baseline levels and natural variability of elements in three seaweed species from West Greenland // Mar. Pollut. Bull. 1997. V. 34. № 3. P. 171–176.
- Ryan S., McLoughlin P., O'Donovan O. A comprehensive study of metal distribution in three main classes of seaweed // Environ. Pollut. 2012. V. 167. P. 171–177.
- Sanchez-Quiles D., Marba N., Tovar-Sanchez A. Trace metal accumulation in marine macrophytes: Hotspots of coastal contamination worldwide // Science of the Total Environment. 2017. V. 576. P. 520–527.
- Skriptsova A.V., Shevchenko N.M., Tarbeeva D.V., Zvyagintseva T.N. Comparative study of polysaccharides from reproductive and sterile tissues of five brown seaweeds // Mar. Biotechnol. 2012. V. 14. № 3. P. 304–311.
- Söderlund S., Forsberg Å., Pedersén M. Concentration of cadmium and other metals in *Fucus vesiculosus* L. and *Fontinalis dalecarlica* Br. Eur. from the northern Baltic Sea and the southern Bothnian Sea // Environ. Pollut. 1988. V. 51. P. 197–212.
- Stengel D.B., McGrath H., Morrison L.J. Tissue Cu, Fe and Mn concentrations in different-aged and different functional thallus regions of three brown algae from western Ireland // Estuarine, Coastal Shelf Sci. 2005. V. 65. № 4. P. 687–696.

The Brown Alga *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (C. Agardh) H.T. Powell as an Indicator of Heavy Metal Pollution of the Marine Environment

© 2025 S. I. Kozhenkova

*Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, 690041 Russia
e-mail: svetlana@tigdvo.ru*

The content of heavy metals (cadmium, copper, nickel, lead, iron, manganese, and zinc) in whole thalli and several fragments of the perennial brown alga *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (C. Agardh) H.T. Powell was studied in background and polluted areas of the northwestern Sea of Japan in 2020. In the background area (Oprichnik Bay), old parts of *F. distichus* and branches with receptacles contained 1.5–2-fold more iron, manganese, and nickel than the growing tips. In the polluted area (Rudnaya Bay), differences between thallus parts were found in the concentrations of zinc, cadmium, iron, manganese, and nickel. The degree of heavy metal pollution in Rudnaya Bay was assessed by comparing the concentrations in growing tips of algae with the threshold concentrations. The highest exceedance was found for zinc content, 29–36-fold in the “Kovsh” harbor of Rudnaya Bay. Accompanying pollutants include copper, manganese, cadmium, iron, and lead. The causes of the long-term changes in the ecological status of Rudnaya Bay are discussed.

Keywords: bioindicators, background concentrations, growing tips, receptacles, pollution, long-term monitoring, Sea of Japan