

P18-2013-38

А. В. Кравцова¹, Н. А. Мильчакова¹, М. В. Фронтасьева

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ
НЕЙТРОННЫЙ АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
В ИЗУЧЕНИИ МАКРОВОДОРОСЛЕЙ РОДА *CYSTOSEIRA*
КАК БИОМОНИТОРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ
(ЮГО-ЗАПАДНЫЙ КРЫМ, СЕВАСТОПОЛЬ)

Направлено в журнал «Альгология»

¹Институт биологии южных морей, Севастополь, Украина

Кравцова А. В., Мильчакова Н. А., Фронтасьева М. В.

P18-2013-38

Многоэлементный инструментальный нейтронный активационный анализ в изучении макроводорослей рода *Cystoseira* как биомониторов загрязнения прибрежных вод Черного моря (юго-западный Крым, Севастополь)

С использованием метода нейтронного активационного анализа впервые для исследуемого региона изучены особенности концентрирования 26 макро- и микроэлементов (Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Br, Rb, Sr, Sb, I, Cs, Ba, Sm, Nd, Ag, Au и U) в разновозрастных частях талломов бурых водорослей рода *Cystoseira* в прибрежной зоне юго-западного Крыма (Черное море). Показана возможность применения бурых водорослей рода *Cystoseira* в качестве биомонитора загрязнения прибрежных акваторий.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Kravtsova A. V., Milchakova N. A., Frontasyeva M. V.

P18-2013-38

Multielement Instrumental Neutron Activation Analysis of Macroalgae *Cystoseira* Used as Biomonitor of the Black Sea Coastal Waters Pollution (South-Western Crimea, Sevastopol)

For the first time for Sevastopol region the peculiarities of 26 (Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Br, Rb, Sr, Sb, I, Cs, Ba, Sm, Nd, Ag, Au and U) macro- and microelements accumulation in the thalli of brown algae *Cystoseira* from the coastal waters of south-western Crimea (the Black Sea) were studied using instrumental neutron activation analysis (INAA). The possibility of using brown algae *Cystoseira* as a biomonitor of coastal waters pollution was shown.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Морские макроводоросли способны накапливать различные макро- и микроэлементы в концентрациях, в сотни и тысячи раз превышающих их содержание в среде [1]. Эта особенность макрофитов используется для индикации уровня загрязнения прибрежных акваторий разных районов Мирового океана, в том числе Черного моря [2–9]. Считается, что бурые водоросли более всего соответствуют целям альгомониторинга, поскольку из-за наличия альгиновых кислот обладают более высокой по сравнению с красными и зелеными макроводорослями металлоустойчивостью и металлоемкостью, имеют широкое распространение и играют важную экосистемную роль [2, 9].

Хотя особенности накопления микроэлементов черноморскими макроводорослями охарактеризованы в ряде работ, до сих пор остается малоизученной связь концентрирования элементов с возрастом растений, морфоструктурными элементами талломов и сезонами, что затрудняет выработку научно-обоснованных рекомендаций по их использованию в качестве биомониторов загрязнения прибрежных акваторий. Целью настоящей работы являлось изучение особенностей накопления бурыми водорослями *Cystoseira barbata* C. Ag. и *Cystoseira crinita* (Desf.) Vogt макро- и микроэлементов в зависимости от сезона года, возраста и морфоструктурных элементов талломов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

1. Материалы и методы

Характеристика района исследования. Исследования проведены в прибрежной зоне Севастопольского взморья, вблизи мыса Фиолент и в б. Балаклавская. Севастопольское взморье характеризуется сильно расчлененной береговой линией, множеством бухт, среди которых полузамкнутые бухты с ограниченным водообменом (б. Севастопольская и б. Балаклавская), глубоко врезанные в сушу (б. Карантинная), а также небольшие со свободным водообменом с глубоководной частью моря (б. Круглая). Для большинства исследуемых участков Севастопольского взморья, в том числе бухт, характерна разная степень комплексного загрязнения акваторий (табл. 1), при этом к наиболее загрязненным по индексу эвтрофикации вод (функция концентрации растворенного кислорода, общего фосфора, суммы минеральных форм азота и хлорофилла «а» — E-TRIX) относятся по степени убывания: б. Севастопольская → б. Карантинная и б. Балаклавская → б. Круглая [10]. По содержанию нефтеуглеводородов (СНУВ) в донных осадках наиболее загрязненной считается б. Севастопольская, затем б. Балаклавская и б. Карантинная,

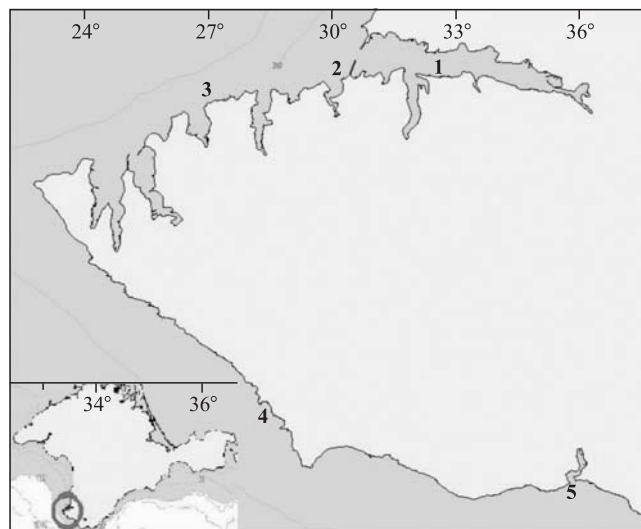


Рис. 1. Район исследования и станции отбора проб в прибрежной зоне Севастопольского моря (юго-западный Крым, Черное море)

Таблица 1. Районы отбора проб и данные о степени загрязнения участков прибрежной акватории Севастопольского моря (юго-западный Крым, Черное море)

Район отбора проб, № станций	Координаты		Показатели загрязнения	
	с. ш.	в. д.	Е-TRIX [10]	СНУВ в донных осадках, мг/100 г [11, 12]
1. б. Севастопольская (м. Павловский)	44°36'58"	33°32'47"	3,24	1187
2. б. Карантинная (входной м. Восточный)	44°36'42"	33°30'7"	2,99	65
3. б. Круглая (входной м. Восточный)	44°36'28"	33°26'51"	2,27	5
4. Прибрежный аквальный комплекс у м. Фиолент (вблизи м. Лермонтова)	44°30'31"	33°28'52"	—	—
5. б. Балаклавская (вблизи м. Курона)	44°29'34"	33°35'38"	2,76	160

Прочерк — отсутствие данных.

а наименее — б. Круглая [11, 12]. Акватория у м. Фиолент входит в состав гидрологического памятника природы местного значения «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Фиолент» природно-заповедного фонда Украины и относится к условно чистым.

Станции отбора проб и данные об их загрязнении приведены на рис. 1 и в табл. 1 соответственно.

Пробоотбор и пробоподготовка. Отбор талломов *Cystoseira barbata* (станции 1, 2) и *C. crinita* (станции 3–5) проводили в мае и июле 2012 г. на пяти прибрежных участках региона Севастополя с разным уровнем комплексного загрязнения акваторий (табл. 1). Растения цистозирь отбирали на глубине 0,5–1 м, особенности концентрирования микроэлементов изучали отдельно в стволах и ветвях талломов возрастом от 6 месяцев до 5 лет. Растения тщательно очищали от эпифитов, высушивали при комнатной температуре, а затем доводили до постоянной массы в течение 24 ч при 40 °С. Далее пробы вручную гомогенизировали в агатовой ступке. Всего для микроэлементного анализа было сформировано 52 пробы.

Анализ. Определение элементного состава образцов видов цистозирь проводили с помощью инструментального нейтронного активационного анализа (ИНАА) на реакторе ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (Дубна) с использованием пневмотранспортной установки РЕГАТА [13]. Для определения короткоживущих изотопов элементов Al, Cl, Ca, V, Mg, Mn и I образцы цистозирь массой около 0,3 г, упакованные в полиэтилен, облучали в течение 5 мин в канале реактора с плотностью потока нейтронов $1,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Наведенную гамма-активность измеряли в течение 3 мин после 5–7 мин выдержки и 12–15 мин после 20 мин выдержки.

Для определения долгоживущих изотопов элементов Na, K, Sc, Fe, Co, Ni, Zn, As, Br, Rb, Sr, Sb, Cs, Ba, Sm, Nd, Ag, Au и U образцы облучали ~ 90 ч в канале реактора с кадмиевым экраном и плотностью потока резонансных нейтронов $1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. После облучения образцы переупаковывали в чистые контейнеры для измерения наведенной гамма-активности образцов: спустя 4–5 сут после выгрузки из канала облучения в течение 45 мин и спустя 20 сут в течение 2,5–3 ч.

Для обработки гамма-спектров и расчета концентраций элементов в цистозирь использовали пакет программ, разработанных в ЛНФ ОИЯИ [14]. Погрешность определения концентраций составляла 10–15 %, а при определении концентрации элементов на уровне чувствительности метода — 30 % и более (Ag). Качество анализа обеспечивалось с помощью сертифицированных эталонных материалов SRM Rice Flour-1568a (рисовая мука, NIST), SRM Pine needles-1575a (иглы сосны, NIST) и SRM Apple Leaves-1515 (листья яблони, NIST), навески которых облучали в одинаковых условиях с исследуемыми образцами.

2. Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены диапазоны концентраций 26 элементов в стволах и ветвях *Cystoseira* в весенний и летний периоды.

Таблица 2. Диапазоны концентраций макро-* (мг/г) и микроэлементов (мкг/г) в среднем для двух видов *Cystoseira* (прибрежная зона Севастопольского взморья)

Элемент	Часть таллома	Весна			Лето		
		Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее
Na*	Ствол	9,8	18,5	13,6	16,7	19,7	18,9
	Ветви	10,9	20	15,1	18,5	26,7	23,2
Mg*	Ствол	6,1	8,8	7,7	6,54	8,9	7,9
	Ветви	6,4	8,4	7,64	7	12,1	10
Al	Ствол	77	563	226	31,8	436	129
	Ветви	83	269	200	49,5	1230	353
Cl*	Ствол	20,1	40,1	27,4	12,4	24,7	19,5
	Ветви	36,1	50,1	40,2	25	73,3	44,5
Ka*	Ствол	19,3	43,4	27,9	21,8	31,3	24,8
	Ветви	28,2	53,7	40,1	29,4	61,8	40,2
Ca*	Ствол	13,6	18,1	16	14,1	20,9	15,6
	Ветви	12	21,1	14,5	13,3	34,2	21,2
Sc	Ствол	0,02	0,1	0,06	0,02	0,04	0,03
	Ветви	0,04	0,16	0,08	0,02	0,22	0,1
V	Ствол	0,34	2,03	1,01	0,23	1,17	0,64
	Ветви	0,27	1,06	0,57	0,44	3,9	1,22
Mn	Ствол	13,4	42,2	20,9	15,7	54,6	29,6
	Ветви	8,59	25,2	13,3	15,9	43,2	30,8
Fe	Ствол	81,2	376	176	21,7	192,5	88,6
	Ветви	75,2	259	172,3	90,9	722	260
Co	Ствол	0,26	0,51	0,41	0,42	0,78	0,61
	Ветви	0,14	0,3	0,22	0,35	0,91	0,65
Ni	Ствол	2,7	5,23	3,86	1,38	3,68	2,2
	Ветви	2,22	3,45	2,54	2,69	6,08	3,83
Zn	Ствол	25,4	79,1	51,4	34,3	61,7	43,1
	Ветви	12,2	30,1	18,6	18,6	35	25,3

Таблица 2. Окончание

Элемент	Часть таллома	Весна			Лето		
		Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее
As	Ствол	22,3	38	31,3	9,41	40	27,3
	Ветви	16,3	41,6	31,8	11,2	54,5	35,1
Br	Ствол	119	223	162	149	196	161
	Ветви	162	191	170	139,5	373	287
Rb	Ствол	8,5	15,6	10,7	6,66	11,3	8,38
	Ветви	12,5	22	16,8	8,92	19	13,4
Sr	Ствол	591	974	848	643	953	804
	Ветви	1055	1230	1161	1043	1357	1229
Ag	Ствол	0,02	0,12	0,08	0,1	0,15	0,13
	Ветви	—	—	—	0,09	0,17	0,13
Sb	Ствол	0,06	0,1	0,07	0,03	0,04	0,04
	Ветви	0,05	0,07	0,06	0,04	0,06	0,05
I	Ствол	85,3	135	98,1	37,7	136	86,9
	Ветви	89,6	140	110	52,4	231	121
Cs	Ствол	0,02	0,06	0,03	0,02	0,05	0,03
	Ветви	0,02	0,04	0,03	0,02	0,13	0,05
Ba	Ствол	28,7	44,2	38,2	29,7	43,6	34,6
	Ветви	45,3	53,7	50,1	37,8	68	55,8
Au	Ствол	0	0,07	0,07	0,007	0,008	0,007
	Ветви	0,02	0,03	0,025	0,004	0,011	0,01
Nd	Ствол	3,06	17,7	7,88	6,91	9,58	8,25
	Ветви	2,16	9,94	6,35	9,33	18,7	14,02
Sm	Ствол	0,03	0,05	0,04	0	0,02	0,01
	Ветви	0,01	0,03	0,012	0,01	0,05	0,03
U	Ствол	0,19	0,76	0,46	0,24	0,64	0,48
	Ветви	0,15	0,31	0,18	0,25	0,5	0,37

Прочерк — концентрации не определены.

По результатам определения микроэлементов в талломах водорослей рода *Cystoseira* были рассчитаны коэффициенты их накопления, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Среднее содержание микроэлементов (мкг/г) в Черном море, видах *Cystoseira* (мкг/г) и коэффициенты накопления ими микроэлементов

Элемент	Концентрация в Черном море [15]	Средняя концентрация в видах рода <i>Cystoseira</i> **	Коэффициент накопления видами рода <i>Cystoseira</i>
Al	$100 \cdot 10^{-4} *$	213	10^4
Sc	$0,014 \cdot 10^{-4}$	0,07	10^4
V	$3 \cdot 10^{-3} *$	0,8	10^3
Mn	$19 \cdot 10^{-4}$	17	10^4
Fe	$300 \cdot 10^{-4}$	173	10^4
Co	$0,34 \cdot 10^{-3}$	0,31	10^3
Ni	$1,8 \cdot 10^{-3}$	3,2	10^3
Zn	$70 \cdot 10^{-3}$	35	10^3
As	$19 \cdot 10^{-4}$	32	10^4
Rb	$32 \cdot 10^{-2} *$	14	10^2
Sr	$1800 \cdot 10^{-3}$	1005	10^3
Ag	$0,013 \cdot 10^{-2}$	0,04	10^2
Sn	$0,46 \cdot 10^{-4}$	0,17	10^4
Sb	$0,18 \cdot 10^{-2}$	0,07	10^2
Cs	$0,01 \cdot 10^{-3}$	0,03	10^3
Ba	$47 \cdot 10^{-4}$	44	10^4
Nd	$5 \cdot 10^{-6}$	7,12	10^6
Sm	$0,02 \cdot 10^{-5}$	0,01	10^5
U	$0,24 \cdot 10^{-2}$	0,32	10^2

* Концентрация в Мировом океане. ** Собственные данные.

Согласно полученным данным бурые водоросли рода *Cystoseira* способны накапливать рассеянные и другие микроэлементы в концентрациях, на 3–4 порядка превышающих их содержание в воде Черного моря. Известно, что величина накопления микроэлементов морскими макрофитами зависит от многих факторов. К наиболее важным абиотическим факторам относятся концентрация элементов в среде и их валентная форма, соленость, интенсивность водообмена, температура и освещенность. Среди биотических факторов выделяют

особенности метаболизма растений, их анатомо-морфологические характеристики, таксономическую принадлежность, стадию онтогенеза и физиологическое состояние [1, 16].

Накопление элементов в разных морфоструктурных частях талломов цистозир. В весенний период содержание макроэлементов Na, Mg и Ca в стволах и ветвях *Cystoseira* различается незначительно, а Cl и K в 1,2–2 раза больше в ветвях, чем в стволах. В летний период концентрация Na и Mg в ветвях *Cystoseira* в 1,2–1,5 раза, а Cl, K и Ca — в 1,5–3 раза больше по сравнению со стволами.

Распределение микроэлементов в морфоструктурных частях видов *Cystoseira* также имеет сезонные особенности. Весной в ветвях обоих видов *Cystoseira* содержание Rb, Sr, I и Ba в 1,2–1,8 раз выше, чем в стволах. По отношению к некоторым микроэлементам виды *Cystoseira* проявляют разный характер накопления в частях талломов. Так, концентрация Al, Sc, Fe в 1,4–1,6 раз выше в ветвях *C. crinita*, тогда как в ветвях и стволах *C. barbata* эти микроэлементы распределены равномерно. Для других элементов (As, Cs, Br, Ni и Nd) отмечено равномерное распределение в ветвях и стволах *C. crinita*, но ветви *C. barbata* содержат их в 1,5–2 раза меньше, чем стволы. Следует отметить, что концентрация Zn в стволах *C. crinita* и *C. barbata* выше, чем в ветвях в 3,5–4 и 1,4–1,7 раза соответственно (рис. 2). Сходная закономерность обнаружена также для V и U, концентрация которых в 2,5–3 и в 4–7 раз выше соответственно в стволах *C. crinita*, чем в ветвях; концентрации этих элементов в частях талломов *C. barbata* сходны. Возможно, это связано с особенностями структуры ствола *C. barbata*, более грубого, шероховатого и большего диаметра по сравнению с более тонким стволом *C. crinita* с гладкой поверхностью [17], что может влиять на процесс сорбции [8].

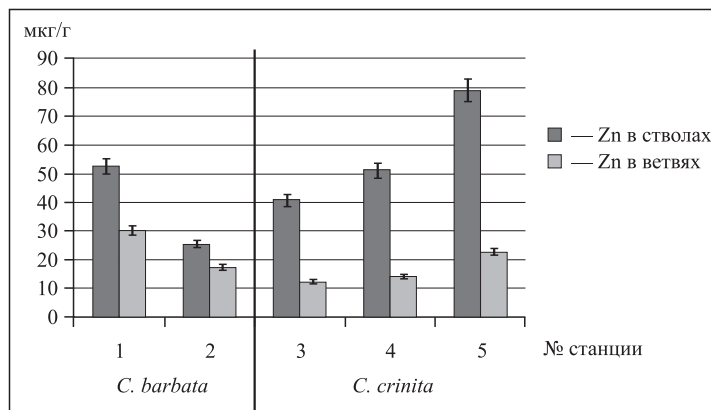


Рис. 2. Содержание цинка (мкг/г) в стволах и ветвях *C. crinita* и *C. barbata* в весенний период 2012 г. (юго-западный Крым, Севастопольское взморье, станции 1–5)

В летний период концентрации почти всех микроэлементов (за исключением Zn и U) в ветвях обоих видов *Cystoseira* в 1,5–4 раза выше, чем в стволах. Одна из возможных причин этого явления — обилие эпифитирующих макроводорослей на ветвях *Cystoseira*, что является дополнительным источником сорбции элементов из водной среды. Накопление Zn и U подчиняется закономерности, обнаруженной для этих элементов в весенний период, при этом их концентрации в стволах *C. crinita* в 2 раза выше, чем в ветвях, а в морфоструктурах *C. barbata* их распределение почти сходно. Полученные данные по концентрации цинка в талломах цистозеры из акваторий региона Севастополя согласуются с данными других исследователей [8, 9], которые отмечали, что его содержание в стволах *C. crinita* вдвое выше, чем в ветвях в других районах Черного моря (прибрежная зона Крыма и б. Новороссийская).

Таким образом, распределение макро- и микроэлементов в частях талломов видов *Cystoseira* изменяется по сезонам, при этом в летний период содержание всех элементов (кроме Zn и U) выше в ветвях, чем в стволах.

Связь накопления элементов в талломах цистозеры с их возрастом. Максимальные концентрации всех макроэлементов в весенний и летний периоды обнаружены в стволах *C. barbata* и *C. crinita* первого года жизни (за исключением Mg и Ca в весенний период). Подобная закономерность обнаружена только для ветвей *C. crinita* в летний период.

Наибольшее содержание большинства микроэлементов весной и летом также определено в стволах *C. barbata* и *C. crinita* возрастом менее года (рис. 3). Исключение выявлено для Sc, Zn, Cs и U, концентрация которых в стволах *C. crinita* возрастает с увеличением возраста растений. Весной в

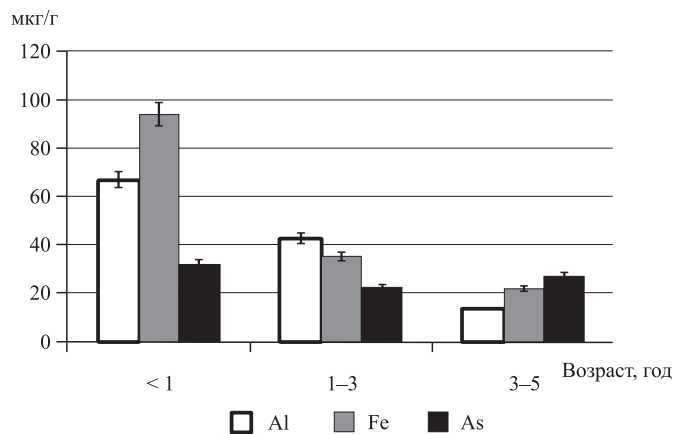


Рис. 3. Среднее содержание Al, Fe и As (мкг/г) в разновозрастных стволах *Cystoseira crinita* в летний период 2012 г. (юго-западный Крым, Севастопольское взморье, станции 3–5)

стволах *C. crinita* и *C. barbata* возрастом 1–3 года содержание некоторых микроэлементов в 1,5–2 раза ниже, чем в растениях первого года жизни (Sc, Ni, Ag и Al, V, Fe, Ag и Sm соответственно). Сходная закономерность накопления Zn, Fe, Mn и Pb в талломах *C. crinita* выявлена ранее другими исследователями, которые указывают возрастной интервал 0,5–2 года как период резких изменений концентраций этих элементов [9]. По-видимому, значи-

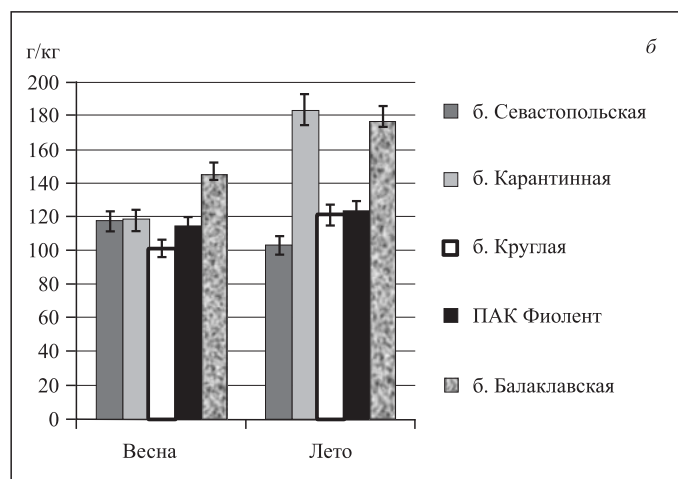
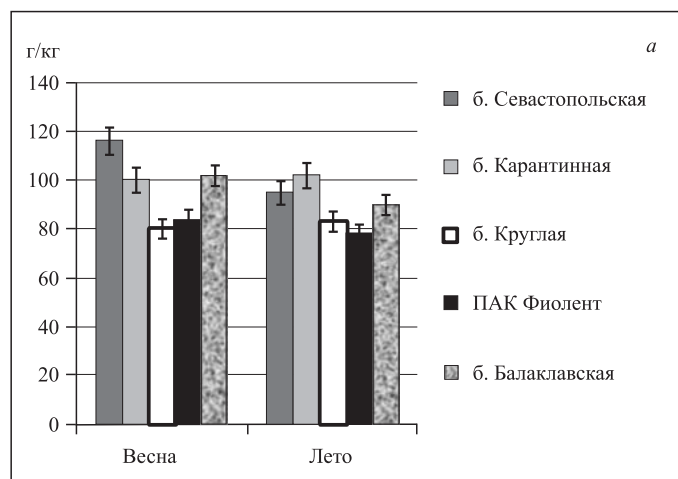


Рис. 4. Суммарное содержание элементов (г/кг) в стволах (а) и ветвях (б) *C. crinita* и *C. barbata* в весенне-летний период 2012 г. (юго-западный Крым, Севастопольское взморье, станции 1–5)

тельные концентрации элементов в молодых растениях цистозиры могут быть связаны с высокой интенсивностью их роста [9].

Весной и летом в ветвях *C. crinita* первого года жизни содержание элементов, как правило, выше, чем в ветвях растений возрастом от 1 до 3 лет, однако эта закономерность выражена не так четко, как для стволов. Возможно, это связано с тем, что возраст адвентивных и боковых ветвей *C. crinita* и *C. barbata* не превышает 5–7 мес, при этом ветви обычно сменяются раз в год или чаще в зависимости от экологических условий [17]. Так, максимальные концентрации всех микроэлементов, за исключением Al, Sm и Nd, обнаружены в ветвях *Cystoseira barbata* возрастом от 1 до 2 лет.

Накопление элементов в стволах и ветвях видов *Cystoseira* в акваториях с разной степенью загрязнения. Суммарное содержание элементов в стволах и ветвях *C. barbata* и *C. crinita* отражает тенденцию к увеличению их концентраций от менее загрязненных акваторий к наиболее загрязненным (рис. 4).

В весенний период максимальные концентрации большинства микроэлементов в стволах *Cystoseira* обнаружены в б. Севастопольская, затем, в порядке убывания, в б. Балаклавская и б. Карантинная, а минимальные — в б. Круглая и по некоторым элементам — у м. Фиолент. Летом наиболее высокое содержание микроэлементов определено в стволах *Cystoseira* из б. Карантинная, затем — в б. Севастопольская и б. Балаклавская. Максимальные концентрации некоторых микроэлементов (Mn, As, Sr, Ba, U) в летний период определены также в талломах *Cystoseira* из б. Круглая.

Наибольшее содержание элементов в стволах *Cystoseira* из б. Севастопольская соотносится с данными о высоком содержании нефтяных углеводородов и токсичных металлов в донных осадках ее центральной части [18, 19]. Высокие концентрации элементов в видах *Cystoseira* из б. Балаклавская и б. Карантинная, по-видимому, также связаны с высоким уровнем комплексного загрязнения их акваторий, что усугубляется слабым водообменом с открытой частью моря. Минимальные концентрации микроэлементов в стволах видов *Cystoseira* у м. Восточный (б. Круглая) в весенний период обусловлены меньшей по сравнению с другими бухтами антропогенной нагрузкой и особенно — интенсивным водообменом с глубоководной частью моря, благодаря чему в прилегающей акватории происходит восстановление гидрохимической структуры вод [20]. Повышенные концентрации ряда микроэлементов в летний период в талломах *Cystoseira* из б. Круглая связаны, очевидно, с высокой рекреационной нагрузкой, что подтверждается повышением в июне–июле величины биохимического потребления кислорода за 5 сут (БПК₅) [20].

В весенний период в стволах *Cystoseira crinita* вблизи м. Фиолент, прибрежная акватория которого относится к условно-чистым, концентрации таких элементов, как Co, Sc, Zn, V, Fe оказались сопоставимы с таковыми

в стволах *Cystoseira* из загрязненных акваторий. Как известно, м. Фиолент представляет собой обособленный, вулканотектонический блок, а участок у м. Лермонтова сложен вулканическими образованиями средней юры, которые перекрываются органогенно-детритовыми и глинистыми известняками сарматского яруса неогена [21]. Повышенные концентрации Co, Sc, Zn, V, Fe в талломах *Cystoseira* можно объяснить их высоким содержанием в магматических породах основного и среднего состава, которые характерны для исследуемого участка [21, 22]. При этом содержание этих элементов в данных породах на 1–2 порядка выше, чем в известняках, которыми преимущественно сложен Севастопольский регион [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые в бурых водорослях рода *Cystoseira* из прибрежной зоны региона Севастополя (юго-западный Крым, Черное море) определено 26 элементов, включая группу макроэлементов, тяжелых металлов и мышьяк.

2. Выявлены различия и особенности в накоплении макро- и микроэлементов разновозрастными морфоструктурными частями талломов *Cystoseira barbata* и *C. crinita*. В летний период содержание всех элементов (кроме Zn и U) выше в ветвях, чем в стволах, а в весенний период отдельные элементы имеют свои особенности накопления.

3. В стволах видов *Cystoseira* более интенсивное накопление элементов наблюдается весной в период роста, а в ветвях — летом, что, возможно, связано с обилием эпифитирующих водорослей на ветвях *Cystoseira*, являющихся дополнительным источником сорбции элементов из водной среды.

4. Максимальные концентрации большинства элементов весной и летом обнаружены в талломах обоих видов *Cystoseira* возрастом менее года, независимо от района произрастания, что, вероятно, обусловлено особенностями их онтогенеза.

5. Обнаружена общая закономерность увеличения концентраций микроэлементов в талломах *Cystoseira* от менее к более загрязненным акваториям. В весенний период наибольшие концентрации микроэлементов в стволах *Cystoseira* выявлены в б. Севастопольская, затем — у входных мысов б. Балаклавская и б. Карантинная. Минимальное содержание большинства микроэлементов обнаружено в стволах *Cystoseira crinita* у входного мыса б. Круглая, относящейся к условно чистым акваториям. Летом наиболее высокое содержание микроэлементов определено в стволах *Cystoseira* из б. Карантинная, затем — б. Севастопольская и б. Балаклавская. В талломах из б. Круглая зафиксированы максимальные концентрации ряда элементов, что, вероятно, связано с усилением сезонной рекреационной нагрузки.

6. В стволах *Cystoseira crinita* из условно чистых акваторий у м. Фиолент выявлено повышенное содержание Co, Sc, Zn, V, Fe, что может быть обусловлено геологическими особенностями данного участка, а не фактором антропогенного загрязнения.

7. Для биомониторинга загрязнения прибрежных акваторий рекомендовано исследовать стволы и ветви растений одного возраста, отобранных в один и тот же сезон. Для региона Севастополя биомониторами могут служить стволы 2–3-летних растений *Cystoseira barbata* и *C. crinita*, отобранные в летний сезон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саенко Г. Н. Металлы и галогены в морских организмах. М.: Наука, 1992. 199 с.
2. Христофорова Н. К. Подбор основных параметров при использовании макрофитов как индикаторов состояния среды // III Всесоюз. совещ. по морской альгологии-макрофитобентосу: Тез. докл. Севастополь, 1979. С. 125–126.
3. Христофорова Н. К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами. Л.: Наука, 1989. 192 с.
4. Güven K. C. et al. Metal Uptake by Black Sea Algae // Bot. Mar. 1992. V. 35. P. 337–340.
5. Strezov A., Nonova S. Environmental Monitoring of Heavy Metals in Bulgarian Black Sea Green Algae // Environmental Monitoring and Assessment. 2005. V. 105. P. 99–100.
6. Topcuoğlu S. et al. Use of Marine Algae as Biological Indicator of Heavy Metal Pollution in Turkish Marine Environment // J. of the Black Sea/Mediterranean Environment. 2010. V. 16(1). P. 43–52.
7. Беленикина О. А. Красные водоросли в системе биомониторинга сублиторали Черного моря. Автореф. дис. . . . канд. биол. наук. М., 2005. 20 с.
8. Теюбова В. Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в разновозрастных талломах цистозеры (Новороссийская бухта, Черное море) // Морской экологический журн. 2011. Т. 10(3). С. 67–75.
9. Бурдин К. С. и др. Изучение возможности использования макроводоросли *Cystoseira crinita* в качестве организма монитора загрязнения Черного моря тяжелыми металлами // Вестн. МГУ. Сер. 16. Биология. 1980. С. 3–10.
10. Губанов В. И. и др. Диагноз качества вод Черного моря в районе г. Севастополя // Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона: Материалы III Междунар. конф., 10–11 окт. 2007 г. Керчь: ЮгНИРО, 2008. С. 90–97.
11. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь: ЭКОСИ — Гидрофизика, 2003. 185 с.
12. Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В. Комплексные экологические исследования Балаклавской бухты // Экология моря. 1999. Вып. 49. С. 16–20.

13. *Фронтасьева М. В.* Нейтронный активационный анализ в науках о жизни // ЭЧАЯ. 2011. Т. 42, вып. 2. С. 636–716.
14. *Дмитриев А. Ю., Павлов С. С.* Автоматизация количественного определения содержания элементов в образцах методом нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ // Письма в ЭЧАЯ. 2013. Т. 10, № 1(178). С. 58–64.
15. *Рябинин А. И. и др.* Изменчивость полей концентраций микроэлементов и стронция в морских водах у Южного берега Крыма в 2002–2007 гг. // Морской гидрофизический журн. 2011. № 2. С. 43–56.
16. *Бурдин К. С., Золотухина Е. Ю.* Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность). М.: Диалог МГУ, 1998. 202 с.
17. *Калугина-Гутник А. А.* Макрофитобентос Черного моря. Киев: Наук. думка, 1974. 248 с.
18. *Копытов Ю. П., Минкина Н. И., Самышев Э. З.* Уровень загрязненности воды и донных отложений Севастопольской бухты (Черное море) // Системы контроля окружающей среды / НАН Украины. МГИ: Сб. науч. тр. Севастополь, 2010. Вып. 14. С. 199–208.
19. *Овсяный Е. И., Романов А. С., Игнатьева О. Г.* Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Морской экологический журн. 2003. Т. 2(2). С. 85–93.
20. *Куфтаркова Е. А. и др.* Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья // Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане (юбилейный выпуск). Труды ЮгНИРО. 2008. Т. 46. С. 110–117.
21. *Алехин В. И.* Деформации горных пород и результаты реконструкций полей палеонапряжений мыса Фиолент (юго-западный Крым) по новым тектонофизическим данным // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-геологічна. 2012. Вып. 16(206). С. 184–192.
22. *Кабата-Пендиас А.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1988. 439 с.

Получено 12 апреля 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабаева*

Подписано в печать 15.05.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,22. Тираж 225 экз. Заказ № 57990.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/