

УДК 574.21;504.736;504.4.054;502.4

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ МАКРОВОДОРОСЛЯМИ РОДА *CYSTOSEIRA* ИЗ ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЙ КРЫМА (ЧЕРНОЕ МОРЕ)

Кривоца А. В.¹, Мильчакова Н. А.¹, Фронтасьева М. В.²

¹Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского, Севастополь,
alexkravtsova@yandex.ru, milchakova@gmail.com

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия, mfrontasyeva@jinr.ru

Впервые с использованием многоэлементного нейтронного активационного анализа определены или уточнены концентрации 21 микроэлемента (Al, Sc, V, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, I, Ba, Cs, Tb, Th и U) в талломах бурых водорослей *Cystoseira barbata* C. Ag. и *Cystoseira crinita* (Desf.) Borg, произрастающих в прибрежной зоне акваторий Крыма. Показано, что видоспецифичность, морфоструктура таллома и эффект их взаимодействия в наибольшей степени влияют на накопление большинства микроэлементов видами цистозеры, в то время как фактор возраста не является достаточно значимым. В качестве фоновых предложены концентрации микроэлементов в талломах *Cystoseira crinita* из прибрежно-аквальных комплексов Джангульское оползневое побережье и мыс Атлеш (Тарханкутский п-ов, западный Крым) и у мыса Фиолент (юго-западный Крым), акватории которых отнесены к наиболее чистым по содержанию исследуемых микроэлементов в цистозере.

Ключевые слова: микроэлементы, *Cystoseira barbata*, *Cystoseira crinita*, нейтронный активационный анализ, морские охраняемые акватории, Черное море.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивная эксплуатация прибрежной зоны Крыма привела к тому, что большинство прибрежных акваторий, относящихся к объектам природно-заповедного фонда (ПЗФ) и имеющих, как правило, низкий охранный статус, подвергается сильной антропогенной нагрузке [1]. Среди загрязнителей водной среды одними из наиболее опасных для биоты и здоровья человека являются тяжелые металлы. Для оценки загрязнения прибрежных акваторий тяжелыми металлами и установления их фоновых концентраций в условно-чистых акваториях широко применяется биологический метод, основанный на определении содержания загрязнителей в живых организмах [2]. Известно, что морские макроводоросли способны накапливать тяжелые металлы и другие микроэлементы из водной среды, косвенно отражая степень ее загрязнения [2, 3]. Большинство исследователей полагают, что бурые макроводоросли наиболее соответствуют целям альгомониторинга при оценке качества среды морских прибрежных акваторий, поскольку из-за наличия альгиновых кислот обладают более высокой металлоустойчивостью и металлоемкостью по сравнению с красными и зелеными макроводорослями, имеют широкое распространение [2, 3]. Данные о содержании микроэлементов в бурых водорослях прибрежной зоны Крымского п-ова, в том числе об их фоновых концентрациях в охраняемых акваториях, малочисленны или вообще отсутствуют.

Цель настоящего исследования состояла в определении фоновых концентраций микроэлементов в ключевых видах черноморской экосистемы – бурых макроводорослях *Cystoseira barbata* C. Ag. и *Cystoseira crinita* (Desf.) Borg, произрастающих в охраняемых акваториях Крыма, изучении особенностей накопления микроэлементов в разновозрастных талломах обоих видов цистозеры.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследования. Исследования проведены в прибрежной зоне 7 объектов заповедного фонда Крыма с разным охранным статусом и в прилегающих к ним акваториях, испытывающих выраженную антропогенную нагрузку (рис. 1, табл. 1).

Проботбор и пробоподготовка. Отбор разновозрастных талломов *Cystoseira barbata* (станции 2, 4, 5) и *C. crinita* (станции 1, 3, 6–14) проводили на глубине 0,5–1 м в прибрежной зоне Крымского п-ва в июле – августе 2012 г. Возраст растений *C. barbata* и *C. crinita* определяли с учетом длины ствола и значения среднегодового прироста [4]. Все талломы тщательно очищали от

эпифитов, отделяли «стволы» и «ветви», высушивали при комнатной температуре, а затем доводили до постоянного веса в течение 24 часов при 40 °С. Навески талломов цистозирис с постоянной массой гомогенизировали вручную в агатовой ступке, всего для анализа было сформировано 82 пробы обоих видов цистозирис.

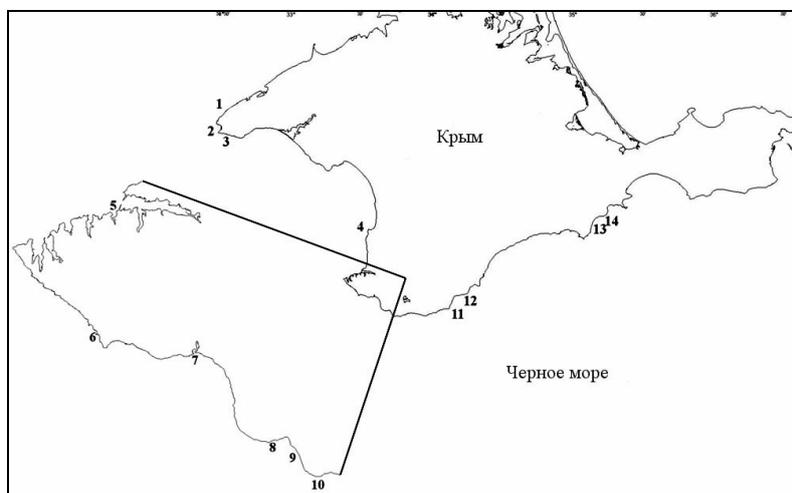


Рис. 1. Схема станций отбора проб в прибрежной зоне Крыма (Черное море)

1 – ПАК у Джангульского оползневого побережья, 2 – мыс Тарханкут, 3 – ПАК у мыса Атлеш, 4 – ПАК у мыса Лукулл, 5 – б. Карантинная, 6 – ПАК у мыса Фиолент, 7 – б. Балаклавская, 8 – урочище Батилиман, 9 – пляж базы отдыха «Изумруд», 10 – м. Сарыч, 11 – пляж г. Ялты, 12 – ПЗ «Мыс Мартыян», пляж, 13 – мыс Биостанция, 14 – Кузьмичев Камень (расшифровка сокращений приведена в таблице 1).

Таблица 1

Участки отбора проб в прибрежной зоне объектов ПЗФ и акваториях,
не имеющих охранного статуса (Крым, Черное море)

Район	Координаты	
	Северная широта	Восточная долгота
Карадагский природный заповедник (ПЗ) (причал, мыс Биостанция)	44°54'40''	35°12'07''
Карадагский природный заповедник (Кузьмичев Камень)	44°54'41''	35°12'33''
Природный заповедник «Мыс Мартыян» (дикий пляж)	44°30'23''	34°15'01''
Прибрежно-аквальный комплекс (ПАК) у Джангульского оползневого побережья	45°25'41''	32°30'36''
Прибрежно-аквальный комплекс у мыса Атлеш	45°20'03''	32°33'05''
Прибрежно-аквальный комплекс у мыса Лукулл	44°50'36''	33°32'51''
Прибрежно-аквальный комплекс у мыса Фиолент (у м. Лермонтова)	44°30'31''	33°28'52''
Прибрежно-аквальный комплекс между бухтой Ласпи и мысом Сарыч (урочище Батилиман, пляж)	44°25'07''	33°41'25''
Прибрежно-аквальный комплекс между бухтой Ласпи и мысом Сарыч (база отдыха «Изумруд», пляж)	44°24'22''	33°43'09''
Прибрежно-аквальный комплекс между бухтой Ласпи и мысом Сарыч (мыс Сарыч)	44°23'16''	33°44'40''
Мыс Тарханкут	45°20'49''	32°29'36''
Бухта Карантинная (мыс Восточный)	44°36'42''	33°30'7''
Бухта Балаклавская (у мыса Курона)	44°29'34''	33°35'38''
Пляж г. Ялта	44°29'26''	34°09'49''

Нейтронный активационный анализ. Для определения короткоживущих изотопов элементов Al, V, Mn и I образцы цистозирис массой около 0,3 г, упакованные в полиэтилен, облучали в течение 5 минут в канале реактора с плотностью потока нейтронов $1,3 \times 10^{12}$

нейтрон/(см²×с). Наведенную гамма-активность измеряли в течение 3 минут после 5–7 минут выдержки и 12–15 минут после 20 минут выдержки. Для определения долгоживущих изотопов элементов Sc, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, Ba, Cs, Tb, Th и U образцы облучали ~ 90 часов в канале реактора с кадмиевым экраном и плотностью потока резонансных нейтронов $1,6 \times 10^{12}$ нейтрон/(см²×с). После облучения образцы переупаковывали в чистые контейнеры для измерения наведенной гамма-активности образцов: спустя 4–5 дней после выгрузки из канала облучения в течение 45 минут и спустя 20 дней в течение 2,5–3 часов.

При обработке гамма-спектров и расчете концентраций элементов в цистозире использовали пакет программ, разработанных в ЛНФ ОИЯИ [5]. Погрешность определения концентраций составляла 10–15%, а при определении концентрации элементов на уровне чувствительности метода – 30% и более (например, Ag). Контроль качества анализа обеспечивался с помощью сертифицированных эталонных материалов SRM 1632с (микроэлементы в угле, NIST), SRM 2709 (микроэлементы в почве, NIST) и SRM 433 (морские отложения, IAEA), навески которых облучали в одинаковых условиях с исследуемыми образцами.

Инструментальный нейтронный активационный анализ (ИНАА) осуществлен на реакторе ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, РФ) с использованием пневмотранспортной установки РЕГАТА [6]. По результатам ИНАА определены 26 макро- и микроэлементов, в данной работе сообщаются результаты для 21 микроэлемента (Al, Sc, V, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, I, Ba, Cs, Tb, Th и U), обнаруженных в талломах *C. barbata* и *C. crinita*.

Статистический анализ. По данным о концентрациях анализируемых элементов в 82-х образцах *Cystoseira* spp. проведен трехфакторный дисперсионный анализ ANOVA с целью выявления особенностей накопления микроэлементов в зависимости от видовой принадлежности, возраста растения (<1 года, от 1 до 3 лет, от 3 до 5 лет) и морфоструктур таллома («стволы» или «ветви»).

С помощью факторного анализа проанализирована матрица данных, в которой строки – станции пробоотбора, а столбцы – переменные (средние концентрации Al, Sc, V, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, I, Ba, Cs, Tb, Th и U в *Cystoseira* spp). Для интерпретации факторов использовали вращение Varimax нормализованный, статистическую обработку данных проводили по программному пакету Statistica 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние концентрации 21 микроэлемента в «стволах» и «ветвях» *Cystoseira* spp., собранных на 14 станциях, представлены в таблице 2; опубликованные данные о содержании некоторых микроэлементов в *Cystoseira* spp. приведены в таблице 3 [7–11].

Al, Fe, Br, Sr (элементы с концентрациями > 100 мкг/г). Изменение средних концентраций Al, Fe, Sr и Br, определенных в «стволах» (372, 253, 908 и 209 мкг/г, соответственно) и «ветвях» (833, 496, 1034 и 436 мкг/г, соответственно) *Cystoseira* spp., выражено следующей закономерностью: Br<Fe<Al<Sr. Полученные значения Al, Fe и Sr на порядок ниже по сравнению с данными [7] и [10] для *C. barbata* из прибрежной зоны Ялтинского порта и г. Синопа, а также *C. crinita* из ПЗ «Мыс Мартьян». С этими значениями сравнимы лишь максимальные концентрации Al и Fe (> 1000 мкг/г), найденные в талломах *Cystoseira* spp., произрастающих в районе м. Лукулл, Ялтинского пляжа и м. Биостанция Карадагского ПЗ (станции 4, 11 и 13). Средние для 14 станций концентрации Br в «стволах» и «ветвях» *Cystoseira* spp. хорошо согласуются с данными [12] о его содержании в водорослях того же порядка (пор. Fucales) из Японского и Охотского морей (650 и 680 мкг/г), с учетом более низкого содержания Br (более чем в 2 раза) в воде Черного моря по сравнению с этими морями.

Mn, Zn, As, I, Ba (элементы с концентрациями от 10 до 100 мкг/г). Средние концентрации Mn, Zn и I, определенные в «стволах» *Cystoseira* spp., составляют 56,7, 41,2 и 88,4 мкг/г, а в «ветвях» – 82,7, 21,6 и 119 мкг/г соответственно. При этом диапазон концентраций As и Ba в «стволах» (7,08–69 и 16,1–56 мкг/г) *Cystoseira* spp. и «ветвях» (21,1–74,6 и 22,7–79,7 мкг/г) сходен. Выявленные концентрации Mn и Zn находятся в одном диапазоне значений с данными [8] для

Таблица 2

Средние концентрации микроэлементов (мкг/г) в морфоструктурных элементах талломов
Cystoseira spp. (прибрежная зона Крыма, Черное море)

Э	М	Тарханкутский полуостров, Западный Крым			Севастопольский регион						Ялтинский регион		Карадаг, Восточный Крым		
					Северо-запад		Юго-запад		Юг, бухта Ласпи						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Al	с	63	616	43	1364	436	44	32	72	56	197	246	209	1281	558
	в	107	642	74	2057	1230	50	349	527	142	636	2670	293	2583	440
Sc	с	0,02	0,12	0,02	0,36	0,04	0,02	0,02	0,05	0,03	0,04	0,04	0,06	0,24	0,14
	в	0,06	0,13	0,07	0,29	0,22	0,09	0,11	0,14	0,07	0,16	0,48	0,11	0,59	0,17
V	с	0,38	0,94	0,73	3,33	1,17	0,23	0,67	0,67	0,61	0,84	1,04	0,74	2,53	1,58
	в	0,50	1,17	0,45	4,96	3,90	0,48	0,78	1,20	0,59	1,50	6,38	0,73	5,04	1,06
Mn	с	63	37	36	34	32	16	21	21	13	19	59	85	230	120
	в	53	32	27	44	43	19	33	21	13	27	83	64	562	123
Fe	с	46	350	33	1393	193	51	21	125	95	110	134	131	574	258
	в	121	378	85	1261	722	91	255	389	144	406	1167	248	1460	289
Ni	с	1,84	2,08	2,56	10,4	3,68	1,94	1,98	2,82	2,54	2,46	2,31	2,19	2,67	2,60
	в	2,38	2,63	3,91	7,63	4,31	2,90	6,08	6,24	4,89	7,66	5,63	4,46	4,98	2,36
Co	с	0,57	0,41	0,68	1,62	0,72	0,63	0,47	0,56	0,66	0,57	0,58	1,12	1,08	1,10
	в	0,36	0,33	0,35	1,54	0,91	0,63	0,68	0,47	0,43	0,62	0,83	0,64	1,95	0,70
Zn	с	35	25	49	16	36	34	62	53	56	38	73	38	37	26
	в	17	28	17	20	34	19	25	24	21	21	35	16	19	12
As	с	37	19	37	30	20	29	30	51	49	43	32	41	21	33
	в	42	24	45	36	25	31	55	49	56	48	43	64	28	36
Se	с	0,27	0,12	0,13	0,31	–	–	–	0,16	0,11	–	–	–	0,14	0,07
	в	0,27	0,22	0,31	0,22	–	–	–	0,28	–	0,46	0,45	0,28	0,29	0,12
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Br	с	254	365	204	316	197	152	165	111	153	113	208	236	212	236
	в	649	455	558	199	286	249	373	266	320	184	464	446	1048	555
Rb	с	8,1	9,8	8,1	13	10	6,7	8,6	8,9	8,1	7,7	10	7,7	9,8	7,8
	в	13	11	12	15	19	8,9	17	16	16	15	21	11	16	11
Sr	с	854	771	910	993	694	894	744	1100	1034	1004	824	968	898	958
	в	1253	1427	1207	1264	1135	1387	1043	1463	1467	1437	985	1387	1320	1423
Ag	с	0,11	0,05	0,14	0,09	0,15	0,11	–	0,08	0,08	0,08	0,04	0,13	0,23	0,07
	в	0,07	–	0,07	0,25	0,13	0,11	–	0,10	0,05	0,06	0,05	0,08	0,12	0,03
Sb	с	0,05	0,04	0,05	0,09	0,03	0,04	0,04	0,11	0,06	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05
	в	0,06	0,05	0,06	0,08	0,06	0,05	0,05	0,09	0,05	0,05	0,07	0,06	0,09	0,05
I	с	114	117	89,1	84,6	102	87,8	136	70,9	74,4	67,6	73,1	81,8	75,0	69,1
	в	154	147	135	86	70	123	231	86	85	99	99	125	113	96
Ba	с	35,9	42,2	36,1	45,8	33,3	29,7	34,3	29,0	26,8	20,5	38,5	41,0	47,8	40,0
	в	52,1	68,0	49,8	52,6	61,4	37,8	56,1	37,1	30,9	27,9	57,8	59,2	74,3	57,7
Cs	с	0,02	0,06	0,02	0,24	0,05	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03	0,11	0,06
	в	0,03	0,07	0,04	0,19	0,13	0,02	0,05	0,11	0,04	0,10	0,31	0,05	0,28	0,06
Tb	с	0,004	0,009	0,004	0,021	–	–	–	0,006	–	0,004	–	–	0,013	0,007
	в	0,004	0,007	0,004	0,017	–	–	–	0,007	–	0,005	0,009	0,006	0,027	0,009
Th	с	–	0,09	–	0,37	–	–	–	0,02	0,02	0,02	–	–	0,13	0,05
	в	0,03	0,08	0,03	0,43	–	–	–	0,06	0,03	0,07	0,19	0,04	0,34	0,07
U	с	0,47	0,39	0,31	1,16	0,37	0,54	0,48	0,65	0,74	0,69	0,40	0,46	0,35	0,50
	в	–	0,38	0,31	1,30	0,40	0,35	0,25	0,64	0,30	0,51	0,35	0,20	0,16	–

Примечание к таблице. Э – элемент, М – морфоструктурная часть таллома, с – «стволы», в – «ветви», прочерк – концентрации не определены, номера станций 1–14 указаны как на рис. 1

Cystoseira spp., произрастающей в акватории Карадагского ПЗ, и в 1,5–2 раза ниже значений, определенных [7] в *C. crinita* из прибрежной зоны урочища Батилиман и ПЗ «Мыс Мартыан», а

также в *C. barbata* из Ялтинского порта. Опубликованные данные о содержании As и Ba в видах цистозеры Черного моря колеблются в широких пределах на разных участках (0,23–168 мкг/г и 5,5–4700 мкг/г, соответственно), а концентрации I в талломах *Cystoseira barbata* из северо-западной части [13] в 2 раза выше, чем обнаруженные нами у *Cystoseira* spp. из прибрежной зоны Крыма.

Таблица 3

Содержание некоторых микроэлементов (мкг/г) в талломах видов *Cystoseira* (прибрежная зона Черного и Адриатического морей)

Район исследования (прибрежная зона)	Вид	Микроэлементы											Ссылка
		Al	V	Mn	Fe	Ni	Co	Zn	As	Sr	Ag	Cs	
Урочище Батилиман	1	350	1,0	124	1400	16	–	85,4	152	7800	0,1	–	[7]
Ялтинский порт	2	7500	6,1	298	5600	37	–	66,6	168	10600	0,43	–	[7]
ПЗ «Мыс Мартыан» (дикий пляж)	1	1300	1,2	298	1100	14	–	46,4	70,5	10500	0,08	–	[7]
Карадагский ПЗ	3	83,2	0,6	62	340	6	0,1	59	0,23	7	0,005	0,04	[8]
Карадагский ПЗ (мыс Актинометрический)	1	–	8	999	–	40	4	100	–	–	–	–	[9]
Акватория у г. Синоп (Турция)	2	4500	–	73,3	3414	–	5,3	85,8	43	1727	–	–	[10]
Адриатическое море (южная часть)	2	–	–	–	500	–	0,6	15,2	15,1	–	–	0,4	[11]

Примечание к таблице. 1 – *Cystoseira crinita*, 2 – *Cystoseira barbata*, 3 – *Cystoseira* spp.

V, Ni, Rb (элементы с концентрациями от 1 до 10 мкг/г). Диапазон концентраций V и Ni, определенных в *Cystoseira* spp., колеблется в «стволах» от 0,31 до 5,15 и от 1,29 до 11,4 мкг/г, а в «ветвях» – от 0,27 до 8,3 и от 1,65 до 8,31 мкг/г соответственно. Средние концентрации Rb в *Cystoseira* spp. на всех станциях у берегов Крыма примерно одинаковы и составляют 8,83 мкг/г в «стволах» и 14,2 мкг/г в «ветвях». Диапазон концентраций V совпадает с данными [7–9] для *Cystoseira* spp. из других прибрежных акваторий, в то время как для Ni приведены более высокие концентрации [7–9]. Среднее содержание Rb в *Cystoseira* spp. на исследуемых участках на порядок выше [8], чем у растений собранных в Карадагском ПЗ (0,37 мкг/г).

Co, Se, Ag, Th, U (элементы с концентрациями от 0,1 до 1 мкг/г). Средние концентрации Co, Se и Ag в «стволах» и «ветвях» *Cystoseira* spp. составляют 0,77, 0,16, 0,11 мкг/г и 0,74, 0,29, 0,09 мкг/г соответственно. Содержание Th в «стволах» и «ветвях» *Cystoseira* spp. почти сходно (0,11 и 0,13 мкг/г, соответственно), а концентрации U составляют 0,54 и 0,38 мкг/г соответственно. Среднее содержание Co на порядок ниже значений, которые приводят [9] и [10] для *Cystoseira* spp. из акватории Карадагского ПЗ и г. Синопа и сопоставимо с данными других авторов [8, 11]. Выявленные концентрации Se и Ag хорошо согласуются со значениями [8] (0,5 мкг/г) и [7] для *Cystoseira* spp. из прибрежных акваторий Крыма, а среднее содержание Th и U сопоставимо с данными [14] о диапазонах их концентраций в талломах водорослей пор. Fucales из Японского моря (0,02–0,13 и 1,3–2,7 мкг/г, соответственно).

Sc, Sb, Cs, Tb (элементы с концентрациями < 0,1 мкг/г). Средние концентрации Sc, Sb и Cs в «стволах» и «ветвях» *Cystoseira* spp. составляют 0,09, 0,05, 0,06 мкг/г и 0,19, 0,06, 0,11 мкг/г соответственно. Среднее содержание Tb в *Cystoseira* spp. сходно в «стволах» и «ветвях» и составляет 0,01 мкг/г. Опубликованные данные о концентрациях элементов этой группы в талломах черноморской *Cystoseira* spp. малочисленны или отсутствуют. Средние концентрации Sc, Sb и Cs хорошо согласуются со значениями, определенными для водорослей пор. Fucales из Эгейского моря – Sc–0,06, Sb–0,06, Cs–0,09 мкг/г [15].

Таким образом, средние концентрации 12 из 20 сравниваемых элементов, определенных нами в талломах *C. barbata* и *C. crinita* из прибрежных акваторий Крыма, ниже значений, которые приведены для видов цистозеры и других водорослей пор. Fucales из разных районов Черного моря и Мирового океана. Это может быть связано как с изменением экологической ситуации в

районах исследования за период отбора проб с 80-х гг. XX в. до последнего десятилетия, так и методикой их отбора и анализа. Помимо этого различия в концентрировании многих элементов могут быть объяснены разницей в анализе целого растения или его морфоструктурных частей, возрасте талломов, применяемым аналитическим методом, качеством среды прибрежных акваторий на разных участках исследования.

Видоспецифичность накопления микроэлементов в *Cystoseira* spp., связь с возрастом и морфоструктурными частями талломов. Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) свидетельствуют о том, что видовая принадлежность, морфоструктурная часть таллома и эффект их взаимодействия в наибольшей степени влияют на накопление большинства микроэлементов в *Cystoseira* spp., в то время как фактор возраста не является достоверно значимым. Установлено, что с видовой принадлежностью статистически значимо (при $p < 0,05$) связано накопление Al, Sc, Fe, Ni, Cs, Tb, Th и U, при этом их концентрации в талломах *C. barbata* выше, чем в *C. crinita*. Морфоструктурная часть таллома относится к значимым факторам при анализе накопления I, Sr, Rb, Se и Br в *Cystoseira* spp., при этом в «ветвях» концентрации этих элементов выше по сравнению со «стволами». Оба фактора (вид растения и тип морфоструктуры) значимо влияют на накопление V, As и Ba, при этом концентрации V выше в *C. crinita* и «ветвях», а As и Ba – в *C. barbata* и «ветвях». Эффект взаимодействия двух факторов (вид растения и тип морфоструктуры) – значимый фактор при анализе накопления Ni, Zn, Br и Se в *Cystoseira* spp. (табл. 4). Распределение Zn и Ni в морфоструктурных частях двух видов *Cystoseira* имеет противоположный характер: концентрация Zn в «ветвях» *C. barbata* выше, чем в «стволах», а в «ветвях» *C. crinita* ниже, чем в «стволах»; для Ni наблюдается обратная закономерность. Распределение Br и Se в талломах *Cystoseira* spp. имеет сходный характер: концентрации этих элементов в «стволах» и «ветвях» *C. barbata* примерно одинаковы, а в *C. crinita* – выше в «ветвях» (рис. 2).

Таблица 4

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа изменчивости концентраций Zn в талломах *Cystoseira* spp. (прибрежная зона Крыма, Черное море)

Источник вариации	Статистические параметры и критерии				
	SS	df	MS	F	p
Объединенный	41602	1	41602	295*	0,00*
Вид	845	1	845	5,99*	0,02*
Возраст	53,5	2	26,8	0,19	0,83
Морфоструктура	1666	1	1666	11,8*	0,001*
Вид×Возраст	142	2	71,2	0,50	0,61
Вид×Морфоструктура	2260	1	2260	16,0*	0,0002*
Возраст×Морфоструктура	224	2	112	0,8	0,46
Вид×Возраст×Морфоструктура	87,3	2	43,7	0,31	0,73
Ошибка	9867	70	141		

Примечание к таблице. SS – сумма квадратов; df – число степеней свободы; MS – средний квадрат; F – фактическое значение критерия Фишера; p – уровень значимости; * – значение критерия Фишера при $p < 0,05$.

Фактор возраста статистически значимо (при $p < 0,05$) влияет на накопление Ag в талломах *Cystoseira* spp., при этом его концентрации наиболее высоки в растениях первого года жизни. Ни один из рассмотренных выше факторов статистически значимо не влияет на накопление Mn, Co и Sb в *C. barbata* и *C. crinita*.

Особенности накопления, обнаруженные для Zn и Mn, согласуются с данными других исследователей, которые отмечали, что содержание Zn в «стволах» *C. crinita* вдвое выше, чем в «ветвях» [16, 17], а концентрации Mn в разновозрастных «стволах» и «ветвях» примерно одинаковы [16].

Особенности накопления микроэлементов в *Cystoseira* spp. в зависимости от района произрастания. Применение метода факторного анализа средних концентраций микроэлементов в разновозрастных «стволах» и «ветвях» *Cystoseira* spp. позволило выделить 4 фактора,

объясняющих около 80% общей дисперсии данных (табл. 5). Факторные нагрузки для 14 станций по каждому фактору приведены на рис. 3.

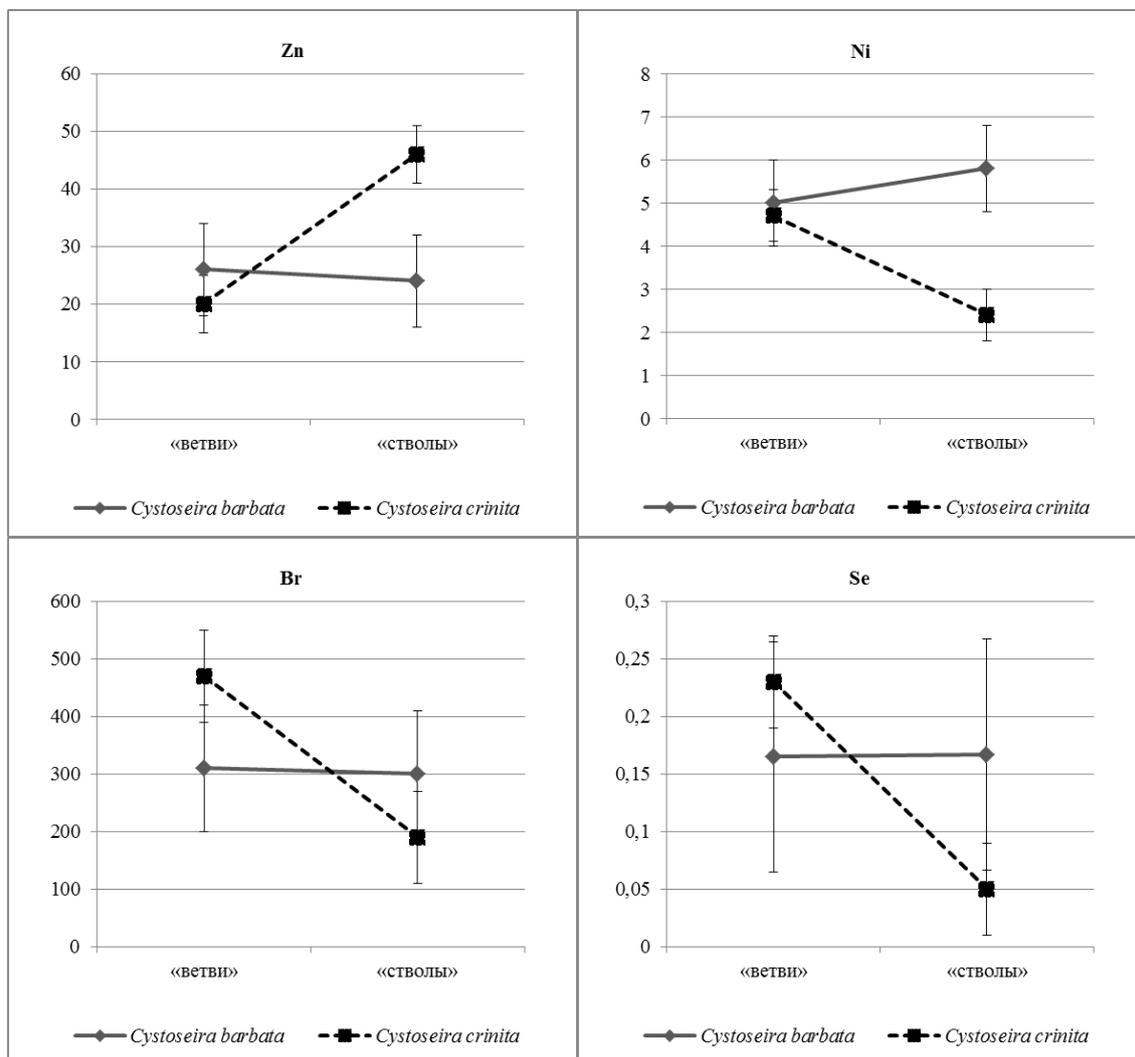


Рис. 2. Особенности распределения Zn, Ni, Br и Se (мкг/г) в морфоструктурных частях *C. barbata* и *C. crinita*

Фактор 1 включает элементы терригенного (Al, Sc, Fe, Rb, Cs, Tb, Th и U) [18] и антропогенного происхождения (V и Ni характеризуют нефтяное загрязнение [19], Co и Sb поступают в морскую среду со сточными водами [20]). Максимальные нагрузки этого фактора характерны для акватории ПАК у м. Лукулл, м. Биостанция Карадагского ПЗ, пляжа г. Ялты и б. Карантинная (регион Севастополя) (рис. 3). Высокие нагрузки первого фактора для условно чистой акватории ПАК у м. Лукулл связаны, вероятно, с его терригенной составляющей, а не с высоким уровнем загрязнения, так как по флористическому коэффициенту Чени этот участок, например, характеризуется наименьшей степенью загрязнения среди объектов ПЗФ Севастополя [21]. Высокие концентрации элементов терригенной составляющей связаны с интенсивными оползневыми процессами в этом районе и характерными почвами – красноцветными глинами, которые богаты железом, алюминием и другими элементами [22, 23]. Так, содержание Al, Sc, Fe и Cs в глинистых осадках на порядок выше их концентраций в известняках [23]. Большие нагрузки первого фактора для акватории м. Биостанция Карадагского ПЗ можно объяснить как повышенным содержанием элементов терригенного происхождения в магматических породах

основного и среднего состава [23], так и высокой степенью загрязнения прибрежной зоны сточными водами пос. Курортное, функционирующих дельфинариев, интенсивной работой маломерных судов в летний период (табл. 6). Так, содержание суммарного взвешенного вещества, растворенного органического вещества и нефтепродуктов в прибрежной зоне у м. Биостанция летом 2009 г. было соответственно в 226, 10 и 4,6 раз выше нормы [24].

Высокие нагрузки первого фактора для акваторий пляжа г. Ялта и б. Карантинная связаны с высоким уровнем их загрязнения (табл. 6), обусловленного близостью к городскому порту (ст. 11), наличием аварийного выпуска неочищенных бытовых стоков и расположением стоянки маломерных судов (ст. 5).

Таблица 5

Факторные нагрузки 21 микроэлемента в разновозрастных талломах *Cystoseira* spp. из прибрежных акваторий Крыма (Черное море)

Переменные	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Al	0,9	0,4	0,1	-0,1
Sc	0,8	0,5	0,0	0,0
V	0,9	0,3	0,2	-0,1
Mn	0,3	0,8	0,0	0,0
Fe	0,9	0,2	0,0	0,0
Ni	0,8	-0,3	0,1	0,3
Co	0,8	0,4	-0,1	0,2
Zn	-0,1	-0,1	0,9	-0,2
As	-0,3	-0,2	0,4	0,6
Se	0,5	0,2	0,0	0,4
Br	0,1	0,9	0,0	-0,1
Rb	0,6	0,0	0,7	0,0
Sr	-0,1	0,0	-0,4	0,8
Ag	0,4	0,6	0,0	0,4
Sb	0,5	0,1	0,0	0,4
I	-0,3	0,1	0,1	-0,5
Ba	0,4	0,7	-0,1	-0,4
Cs	0,9	0,3	0,2	0,0
Tb	0,8	0,5	-0,3	0,1
Th	0,9	0,1	-0,2	0,1
U	0,7	-0,5	-0,2	0,2
% общей дисперсии	47,3	14,9	10,6	6,7

Примечание к таблице. данные о факторных нагрузках получены с использованием расчета по Varimax (нормализованный).

Минимальные нагрузки первого фактора характерны для акваторий ПАК у Джангульского оползневого побережья, у мыса Атлеш и у м. Фиолент, пляжа базы отдыха «Изумруд» (б. Ласпи) и акватории ПЗ «Мыс Мартьян», что с одной стороны связано с низкой степенью их антропогенного загрязнения, а с другой – преобладанием в береговой полосе известняков, характеризующихся меньшими концентрациями элементов терригенного происхождения по сравнению с другими горными породами (рис. 3).

Распределение концентраций микроэлементов в *S. crinita*, которое обусловлено в большей степени антропогенной (степень загрязнения акватории), а не терригенной (геологические особенности района исследования) составляющей, показано на примере условно чистой акватории ПАК у м. Фиолент и пляжа г. Ялта с выраженной антропогенной нагрузкой в рекреационный сезон (рис. 4).

Фактор 2 включает Mn и Vg, выполняющие важные функции в развитии макроводорослей, накопление которых частично регулируется растениями [2], а также Ag и Ba. Максимальные нагрузки этого фактора для акватории ПАК у Джангульского оползневого побережья, ПЗ «Мыс

Мартьян» и Карадагского ПЗ (рис. 3) связаны, вероятно, с более высокими концентрациями Mn в *Cystoseira* spp. за счет локальных особенностей его накопления в этих акваториях. Известно, например, что существенно более высокие концентрации Mn регистрируются в видах *Sargassum*, если они собраны в дождливую или ветреную погоду [2]. С другой стороны, большие нагрузки этого фактора для указанных районов у берегов Крыма возможно связаны с повышенными значениями Br в результате эпифитирования видов цистозиры красной водорослью *Polysiphonia subulifera*, выраженным концентратором брома [12] и как следствие являющейся дополнительным источником его сорбции из водной среды. Высокие нагрузки фактора 2 для перечисленных станций также могут быть связаны с локальным повышением содержания Ag и Ba в их акваториях в результате перемешивания водных масс, так как концентрации этих элементов в глубинных водах в 6,8 и 4,7 раз выше, чем в поверхностных соответственно [33].

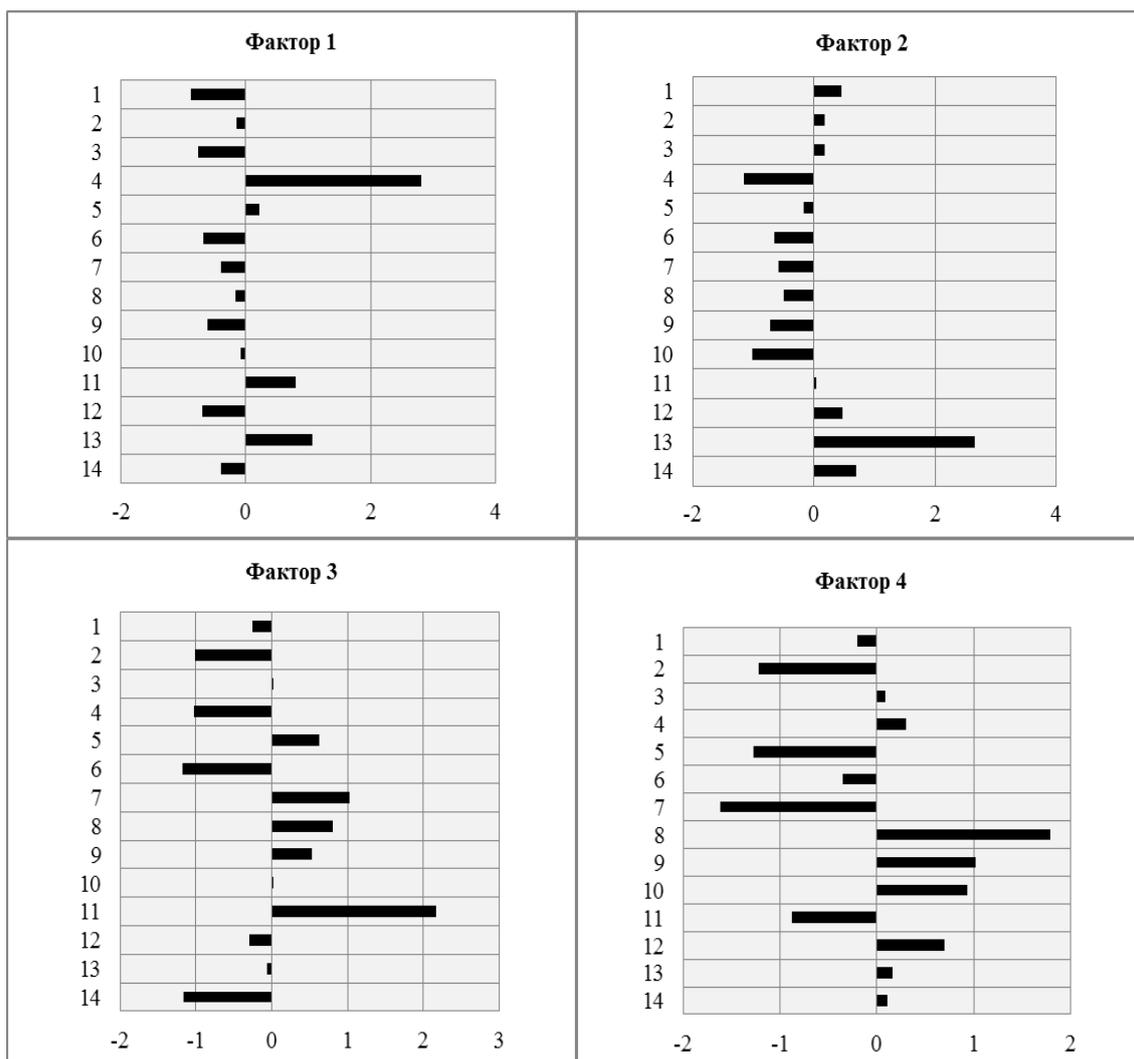


Рис. 3. Значения факторов, отражающие вклад 14 станций пробоотбора в определенный фактор (по результатам факторного анализа концентраций 21 микроэлемента в разновозрастных талломах *Cystoseira* spp. из прибрежных акваторий Крыма)

Фактор 3 включает Rb, легко поглощаемый растениями и отчасти замещающий позиции K в соединениях [23], и Zn, имеющий, вероятно, антропогенное происхождение. Так как концентрации Rb в *Cystoseira* spp. на всех станциях примерно одинаковы (различия статистически не значимы), разные факторные нагрузки для станций Севастопольского и Ялтинского регионов, Западного и Восточного Крыма, связаны с изменением концентраций Zn в *Cystoseira* spp.

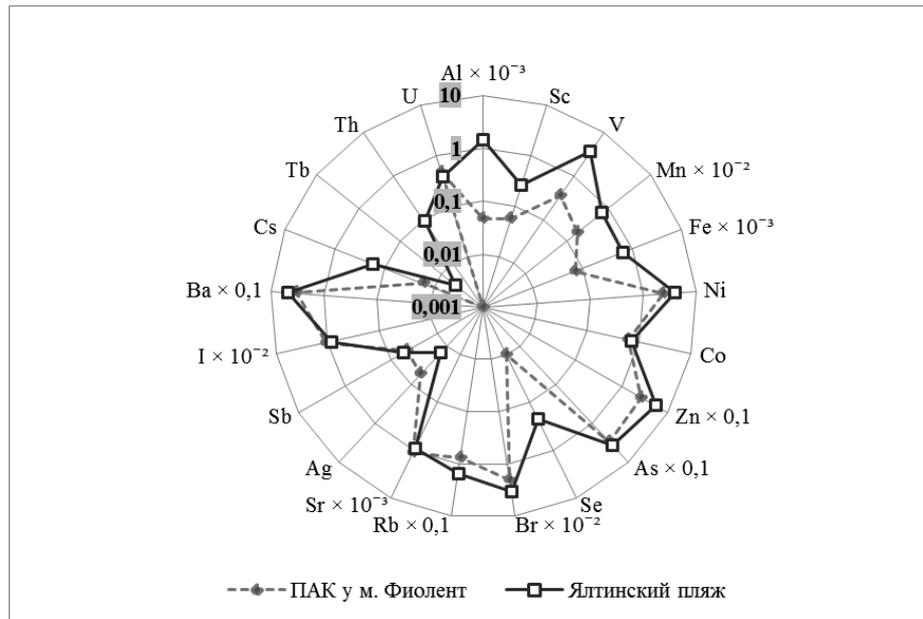


Рис. 4. Распределение концентраций микроэлементов (мкг/г, логарифмическая шкала) в *Cystoseira crinita* из условно чистой акватории (ПАК у м. Фиолент, ст. 6) и с высокой рекреационной нагрузкой (пляж г. Ялты, ст. 11)

Известно, что существенным источником загрязнения морской среды цинком является коррозия сплавов на его основе [19], широко применяемых в судостроении. Максимальные нагрузки фактора 3 отмечены для акватории пляжа г. Ялта, расположенного в непосредственной близости к пассажирскому порту, который принимает более 100 круизных судов в год и где ведутся судокорпусные и ремонтные работы [29]. Высокие нагрузки этого фактора приурочены также к акваториям б. Карантинная и б. Балаклавская, для которых характерна высокая степень комплексного загрязнения (табл. 6). Значения нагрузок фактора 3, превышающие средние,

Таблица 6

Общая характеристика загрязнения акватории и донных осадков некоторых участков у берегов Крыма (Черное море)

Район	Кислород БПК ₅ мг/л [25–28]	Биогены			Нефтепродукты и нефтеуглеводороды		Показатель качества вод E-TRIX [32]
		PO ₄ ³⁻ мкг/л [25–30]	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	НП, усл. ед. [24, 25]	НУ в донных осадках, мг/100 г [31]	
Мыс Тарханкут	–	1,6	0,3	1,0	–	–	–
Бухта Карантинная	0,74	–	2	116	–	100	2,99
Бухта Балаклавская, входной мыс	0,77	8,0	2,6	108	4,8–5,2	160	3,04
Бухта Ласпи	0,72	4	1,0	6	–	–	–
Акватория Ялтинского залива	–	11	3	120	–	–	–
Мыс Биостанция, Карадагский ПЗ	0,82–1,60	6–23	1,0	11,3	4,56	–	2,49

Примечание к таблице: E-TRIX – индекс эвтрофикации вод; НП – растворенные в воде нефтепродукты; НУ – нефтеуглеводороды; прочерк означает отсутствие современных опубликованных данных.

отмечены также для акваторий урочища Батилиман и ПАК между бухтой Ласпи и мысом Сарыч, что может быть связано с расположенной вблизи него якорной стоянкой судов. Минимальные нагрузки фактора 3 отмечены для акваторий ПАК у Джангульского оползневого побережья, м. Фиолент и м. Лукулл, Карадагского ПЗ (Кузьмичев Камень), ПЗ «Мыс Мартьян» и акватории м. Тарханкут.

Фактор 4 включает As и Sr, распределение которых может быть связано с физико-химическими характеристиками донных осадков исследуемых акваторий. По данным [34] распределение As и Sr в донных осадках б. Севастопольская и б. Балаклавская, а также Феодосийского залива и Керченского пролива характеризовалось высокими коэффициентами корреляции с содержанием в них карбоната кальция и обратной зависимостью – с илистой фракцией и органическим углеродом. Максимальные нагрузки этого фактора отмечены для акваторий ПАК между бухтой Ласпи и мысом Сарыч и ПЗ «Мыс Мартьян», где могут преобладать донные осадки, богатые карбонатами, а минимальные – для более загрязненных участков, где характерно повышенное содержание илистой фракции и органического углерода (акватории у м. Тарханкут, б. Карантинная и б. Балаклавская, пляж г. Ялта).

ВЫВОДЫ

Впервые с использованием многоэлементного нейтронного активационного анализа приведены и уточнены данные о концентрации 21 микроэлемента, в том числе тяжелых металлов, в ключевых видах прибрежной экосистемы Черного моря – *Cystoseira barbata* и *C. crinita*, произрастающих у берегов Крыма (объекты ПЗФ и акватории с выраженной антропогенной нагрузкой).

Выявлена связь накопления микроэлементов в *Cystoseira* spp. с видоспецифичностью (*C. barbata* или *C. crinita*), возрастом растения (<1 года, от 1 до 3 лет, от 3 до 5 лет) и типом морфоструктуры таллома («стволы» или «ветви»). Установлено, что вид растения, морфоструктура таллома и эффект их взаимодействия в наибольшей степени влияют на накопление большинства микроэлементов (кроме Mn, Co и Sb) в *Cystoseira* spp., в то время как фактор возраста не является значимым.

На основании факторного анализа выделено 4 фактора, объясняющих около 80% общей дисперсии данных о концентрации микроэлементов и тяжелых металлов. Первый и третий факторы включают элементы антропогенного происхождения и характеризуют степень загрязнения акватории; элементы первого и четвертого факторов объясняют вклад терригенной составляющей (земная кора) и влияние донных осадков; второй фактор содержит элементы, накопление которых частично регулируется водорослями, и элементы, характеризующие локальные гидрохимические особенности. Показано, что максимальные значения факторов, включающих элементы антропогенного происхождения, приурочены к акваториям пляжа г. Ялта и бухте Карантинная, а минимальные – к акваториям ПАК у Джангульского оползневого побережья, мыса Атлеш (Тарханкутский п-ов, западный Крым) и у мыса Фиолент.

Установлено, что концентрации 21 микроэлемента в видах цистозеры у берегов Крыма, как правило, ниже значений, известных для других районов Черного моря, что, вероятно, обусловлено улучшением экологической ситуации в районах исследования (например, демилитаризация бухты Балаклавская), различием в методиках отбора проб и методов их анализа.

При анализе накопления Al, Sc, Fe, Ni, Cs, Tb, Th и U в талломах цистозеры предложено учитывать ее вид (*C. barbata* или *C. crinita*); для I, Sr, Rb, Se и Br – тип морфоструктуры; V, As и Ba – оба фактора; Ni, Zn, Br и Se – эффект их взаимодействия; Ag – возраст растения. Значения концентрации микроэлементов в *Cystoseira* spp. из ПАК у Джангульского оползневого побережья и мыса Атлеш (Тарханкутский п-ов, западный Крым), ПАК у мыса Фиолент (Севастопольский регион) предложено использовать в качестве фоновых. При анализе в талломах цистозеры элементов не терригенного происхождения к условно чистым отнесена акватория у Кузьмичева Камня (Карадагский ПЗ).

Концентрации некоторых микроэлементов в *Cystoseira* spp. из акваторий ПАК у мыса Лукулл и Карадагского ПЗ (Al, Sc, Mn, Fe, Rb, Cs, Tb, Th и U), ПЗ «Мыс Мартьян» и ПАК между бухтой

Ласпи и мысом Сарыч (As, Sr и Zn) превышают их фоновые значения, что, вероятно, связано с локальными геологическими и гидрохимическими особенностями этих участков прибрежной зоны Крыма.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках протокола о научно-техническом сотрудничестве между ИнБЮМ (Севастополь) и ОИЯИ (Дубна), при финансовой поддержке проекта 7-й рамочной программы Европейского Союза (FP7/2007–2013), проект COCONET «Towards COast to COast NETworks of marine protected areas (from the shore to the high and deep sea), coupled with sea-based wind energy potential» (No. 287844).

Список литературы

1. Мильчакова Н. А. Заповедание морских акваторий Крыма: проблемы и перспективы / Н. А. Мильчакова // Заповедники Крыма – 2007: матер. IV Междунар. науч.-практич. конф, посвящ. 10-летию провед. Междунар. семинара «Оценка потребностей сохранения биоразнообразия Крыма» (Гурзуф, 1997), 2 ноября 2007 г. – Симферополь, 2007. – Ч. 1 (Ботаника. Общие вопросы охраны природы). – С. 317–321.
2. Христофорова Н. К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами / Н. К. Христофорова. – Л.: Наука, 1989. – 192 с.
3. Бурдин К. С. Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность) / К. С. Бурдин, Е. Ю. Золотухина. – М.: Диалог МГУ, 1998. – 202 с.
4. Калугина-Гутник А. А. Макрофитобентос Черного моря / А. А. Калугина-Гутник. – К.: Наук. думка, 1974. – 248 с.
5. Дмитриев А. Ю. Автоматизация количественного определения содержания элементов в образцах методом нейтронного активационного анализа на реакторе ИБР-2 в ЛНФ ОИЯИ / А. Ю. Дмитриев, С. С. Павлов // Письма в ЭЧАЯ. – 2013. – Т. 10, № 1 (178). – С. 58–64.
6. Фронтасьева М. В. Нейтронный активационный анализ в науках о жизни. Обзор / М. В. Фронтасьева // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42, № 2. – С. 636–716.
7. Молчанов Е. Ф. Влияние загрязнения моря на содержание поливалентных металлов у массовых видов водорослей-макрофитов Черного моря / Е. Ф. Молчанов, И. И. Маслов, Ф. П. Ткаченко // Влияние антропогенных изменений окружающей среды на наземные и морские экосистемы Крыма (сб. науч. тр.): [ред. Е. Ф. Молчанов]. – Ялта, 1988. – Т. 104. – С. 83–92.
8. Жбанов А. Е. Остроумов С. А. Элементный состав цистозеры из черного моря / А. Е. Жбанов, С. А. Остроумов // Экология, науки о жизни: инновации, включ. труды науч. конф. Экосистемы, организмы, инновации-12 (Москва, 23 июня 2010 г.) и др. матер. – Москва, 2010. – Вып. 16. – С. 32–33.
9. Самчук А. І. Мікроелементи у водоростях акваторії Чорного моря / [А. І. Самчук, В. М. Загнітко, Т. В. Огар та ін.] (зб. наук. пр. Інституту геохімії навколишнього середовища): [ред. Р. Я. Белевцев]. – К., 2012. – Вып. 21. – С. 97–102.
10. Metal uptake by Black sea algae / [K. C. Güven, S. Topcuoğlu, D. Kut et al.] // Bot. Mar. – 1992. – Vol. 35. – P. 337–340.
11. Determination of trace elements in marine organisms by neutron activation analysis / [M. Martić, N. Ajdacic, J. Stjepčević et. al.] // Journal of Radioanalytical Chemistry. – 1980. – Vol. 59, N 2. – P. 445–451.
12. Саенко Г. Н. Металлы и галогены в морских организмах / Г. Н. Саенко. – М.: Наука, 1992. – 199 с.
13. Бойко Л. И. Опыт и перспективы использования черноморских гидробионтов для решения проблемы йоддефицита в Украине / Л. И. Бойко, Д. В. Микулич, Л. В. Аницупова // Екологічні проблеми Чорного моря: матер. до 6-го Міжнар. Симпозіуму (Одеса, 11–12 листопада 2004 р.). – Одеса, 2004. – С. 58–63.
14. Determination of rare earth elements, thorium and uranium in seaweed samples on the coast in Niigata Prefecture by inductively coupled plasma mass spectrometry / [N. Sakamoto, N. Kano, H. Imaizumi] // Applied Geochemistry. – 2008. – Vol. 23, N 10. – P. 2955–2960.
15. Study of the correlation between trace elements, sterols and fatty acids in brown algae from the Saronikos gulf of Greece / [G. D. Kaniias, H. Skaltsa, E. Tsitsa et. al.] // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. – 1992. – Vol. 344, N 7–8. – P. 334–339.
16. Бурдин К. С. Изучение возможности использования макроводоросли *Cystoseira crinita* в качестве организма монитора загрязнения Черного моря тяжелыми металлами / [К. С. Бурдин, М. В. Гусев, М. В. Крупина и др.] // Вестник МГУ. Сер. 16. Биология – 1980. – №3. – С. 3–10.
17. Теюбова В. Ф. Особенности накопления тяжелых металлов в разновозрастных талломах цистозеры (Новороссийская бухта, Черное море) / В. Ф. Теюбова // Морской экологический журнал – 2011. – Т.10, №3. – С. 67–75.
18. Atmospheric deposition of trace element pollutants in Macedonia studied by the moss biomonitoring technique / [L. Barandovski, M. Cekova, M. V. Frontasyeva et. al.] // Environ. Monit. Assess. – 2008. – Vol. 138. – P. 107–118.
19. Eisler R. Eisler's encyclopedia of environmentally hazardous priority chemicals / R. Eisler. – Oxford: Elsevier, 2007. – 950 p.
20. Логинова Е. В. Гидроэкология: курс лекций / Е. В. Логинова, П. С. Лопух. – Минск: БГУ, 2011. – 300 с.
21. Мильчакова Н. А. Флористическая характеристика морских акваторий объектов природно-заповедного фонда региона Севастополя (Черное море) / Н. А. Мильчакова, В. Г. Рябогина // Экология моря. – 2002. – Вып. 60. – С. 5–11.
22. Иваненко Т. А. Инженерно-геологические особенности побережья Западного Крыма / Т. А. Иваненко // Строительство и техногенная безопасность (сб. науч. тр.): [ред. С. И. Федоркин]. – Симферополь, 2012. – Вып. 43. – С. 85–92.

23. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils / A. Kabata-Pendias, H. Pendias. – New York: CRC Press, 2001. – 432 p.
24. Ломакин П. Д. Характеристика загрязнения прибрежных вод у Карадагского заповедника по данным оптических измерений / П. Д. Ломакин, О. А. Трощенко, А. И. Чепыженко и др. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2011. – № 4. – С. 76–84.
25. Ломакин П. Д. Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты / П. Д. Ломакин, М. А. Попов. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. – 184 с.
26. Ковригина Н. П. Результаты исследований экологического состояния акватории Карадагского природного заповедника / [Н. П. Ковригина, О. А. Трощенко, В. И. Губанов и др.] // Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол. – 2010. – №3 (44). – С. 116–119.
27. Куфтаркова Е. А. Результаты гидролого-гидрохимического мониторинга мидийной фермы в прибрежной зоне Южного Берега Крыма (Бухта Ласпи) / Е. А. Куфтаркова, С. В. Щуров, Н. Ю. Родионова // Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол. – 2010. – №3 (44). – С. 133–136.
28. Куфтаркова Е. А. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / [Е. А. Куфтаркова, Н. Ю. Родионова, В. И. Губанов и др.] // Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане (тр. ЮгНИРО, юбилейный выпуск). – Керчь, 2008. – Т. 46. – С. 110–117.
29. Мезенцева И. В. Многолетняя изменчивость содержания биогенных элементов в акватории Ялтинского порта / [И. В. Мезенцева, Е. Е. Совга, Е. А. Годин и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа (сб. науч. тр.): [ред. В. И. Иванов]. – Севастополь, 2013. – Вып. 27. – С. 255–261.
30. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2009 / [ред. Коршенко А. Н.]. – Обнинск: «Артифекс», 2010. – 174 с.
31. Тихонова Е. А. Оценка экологического состояния севастопольских бухт Черного моря по основным химическим и микробиологическим критериям / [Е. А. Тихонова, С. И. Рубцова, Н. В. Бурдиян и др.] // Морской экологический журнал – 2013. – Т. 12, №2. – С. 38–50.
32. Губанов В. И. Оценка уровня трофности морских вод в районе Карадагского природного заповедника (Черное море) / [В. И. Губанов, Н. П. Ковригина, Н. Ю. Родионова и др.] // Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона: матер. Междунар. Конференции. – Керчь, 2012. – Т. 1. – С. 192–195.
33. Корж В. Д. Геохимия элементного состава гидросферы / В. Д. Корж. – М.: Наука, 1991. – 243 с.
34. Котельянец Е. А. Влияние геохимических характеристик донных отложений шельфовой зоны Украины на распределение тяжелых металлов / [Е. А. Котельянец, Е. И. Овсяный, Н. А. Орехова и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа (сб. науч. тр.): [ред. В. И. Иванов]. – Севастополь, 2013. – Т. 27. – С. 312–317.

Кравцова О. В., Мильчакова Н. П., Фронтьева М. В. Особливості накопичення мікроелементів макроводоростями роду *Cystoseira* з прибережних акваторій Криму (Чорне море) // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2014. Вип. 10. С. 146–158.

Вперше з використанням багатоелементного нейтронного активаційного аналізу визначено або уточнено концентрації 21 мікроелемента (Al, Sc, V, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, I, Ba, Cs, Tb, Th і U) в таломх бурих водоростей *Cystoseira barbata* C. Ag. і *Cystoseira crinita* (Desf.) Bory, що ростуть в прибережній зоні акваторій Криму. Показано, що видоспецифічність, морфоструктура талому і ефект їх взаємодії найбільшою мірою впливають на накопичення більшості мікроелементів видами цистозіри, в той час як фактор віку не є достатньо значущим. В якості фонових запропоновані концентрації мікроелементів у таломх *Cystoseira crinita* з прибережно-аквальної комплексів Джангульське обвальне побережжя і мис Атлеш (Тарханкутський півострів, Західний Крим) і біля мису Фіолент (Південно-Західний Крим), акваторії яких віднесені до найбільш чистих за вмістом досліджуваних мікроелементів в цистозірі.

Ключові слова: мікроелементи, *Cystoseira barbata*, *Cystoseira crinita*, нейтронний активаційний аналіз, морські охоронювані акваторії, Чорне море.

Kravtsova A. V., Milchakova N. A., Frontasyeva M. V. The features of trace elements accumulation by macroalgae *Cystoseira* in the coastal zone of marine protected areas of the Crimea (the Black Sea) // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2014. Iss. 10. P. 146–158.

The concentrations of 21 microelements (Al, Sc, V, Mn, Fe, Ni, Co, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Ag, Sb, I, Ba, Cs, Tb, Th and U) were firstly determined or specified in the thalli of brown algae *Cystoseira barbata* C. Ag. and *Cystoseira crinita* (Desf.) Bory sampled in the coastal zone of the Crimea. Multielement neutron activation analysis was used as an analytical method. It was shown that the species of plant, the type of the analyzed morphostructural parts and the effect of their interaction have the greatest impact on the accumulation of the majority of trace elements in *Cystoseira* spp., while the age factor is not so significant. The concentrations of trace elements in *Cystoseira crinita* sampled in water areas of the coastal aquatic complexes near Dzhanguul landslip coast, near the cape Atlesh (Tarkhankut, the Western Crimea) and near the cape Fiolent (the South-Western Crimea), identified as the most clean water areas, are submitted as the background concentrations.

Key words: trace elements, *Cystoseira barbata*, *Cystoseira crinita*, neutron activation analysis, marine protected areas, the Black Sea.

Поступила в редакцію 25.02.2014 г.