

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИЙ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ВИДАХ *CYSTOSEIRA* (ЧЕРНОЕ МОРЕ, ПОБЕРЕЖЬЕ КРЫМА)

А. В. Кравцова^{1,2}

¹ Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, РФ,
alexkravtsova@yandex.ru

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, РФ

С помощью нейтронного активационного анализа определены уровни Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Ag, Sb, I, Cs, Ba, Ce, Sm, Gd, Tb, Tm, Hf, Ta, Th и U в макроводорослях *Cystoseira barbata* и *Cystoseira crinita*, отобранных в прибрежной зоне Крыма на 24 станциях. Максимальное содержание большинства элементов обнаружено в образцах из акваторий Карадагского заповедника, прибрежного аквального комплекса у мыса Лукулл и Керченского п-ова, а минимальное – из акватории Тарханкутского п-ова.

Ключевые слова: *Cystoseira*, макроэлементы, микроэлементы, побережье Крыма, Черное море

Морские макрофиты – основное продукционное звено прибрежных экосистем, выполняющее важную средообразующую функцию, при этом виды *Cystoseira* являются одними из ключевых для Черного моря. Элементное содержание водорослей, которые способны накапливать микроэлементы из водной среды, косвенно отражает степень ее загрязнения, при этом ряд исследователей полагает, что бурые водоросли наиболее ответственны целям альгомониторинга при оценке качества среды прибрежных акваторий [1, 2]. Наиболее полные исследования пространственной изменчивости концентраций 28 элементов в видах *Cystoseira* из прибрежной зоны Крымского п-ова (Южный берег Крыма) проведены около 30 лет назад [3], при этом данные об элементных концентрациях водорослей из других районов малочисленны или вообще отсутствуют.

Цель настоящего исследования состояла в изучении пространственной изменчивости концентраций макро- и микроэлементов в *Cystoseira barbata* и *Cystoseira crinita*, произрастающих в охраняемых акваториях Крыма и прибрежных водах, испытывающих антропогенную нагрузку. При этом впервые для исследуемого региона пробы отобраны вдоль всего Крымского побережья Черного моря (24 станции), а в качестве аналитического метода применен нейтронный активационный анализ (НАА), позволивший определить уровни 33 элементов.

Материал и методы. Пробы макроводорослей *C. barbata* и *C. crinita* отбирали в прибрежной зоне Крыма в летний период 2012 г. на глубине 0,5–1,0 м. Растения промывали морской водой с места их сбора; талломы тщательно очищали от макроэпифитов. Для анализа выделены стволы возрастом от 6 месяцев до 5 лет. Пробы высушивали при комнатной температуре, а затем доводили до постоянного веса в течение 24 ч. при 40 °С. Навески талломов цистозир гомогенизировали вручную в агатовой ступке. Всего для анализа была сформирована 91 проба обоих видов цистозир.

Элементные концентрации в водорослях определяли с помощью НАА, который проводили на реакторе ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, РФ). Погрешность определения концентраций большинства элементов составляла 5–15%. Контроль качества анализа обеспечивался с помощью сертифицированных эталонных материалов SRM 1632с, SRM 2709 и SRM 433, навески которых облучали в одинаковых условиях с исследуемыми образцами.

Результаты и обсуждение. Макроэлементы. Для макроэлементов характерна низкая пространственная изменчивость концентраций в видах цистозир: их максимальное и минимальное содержание различается в 1,4–2,4 раза. Минимальная пространственная изменчивость выявлена для Mg (рис. 1).

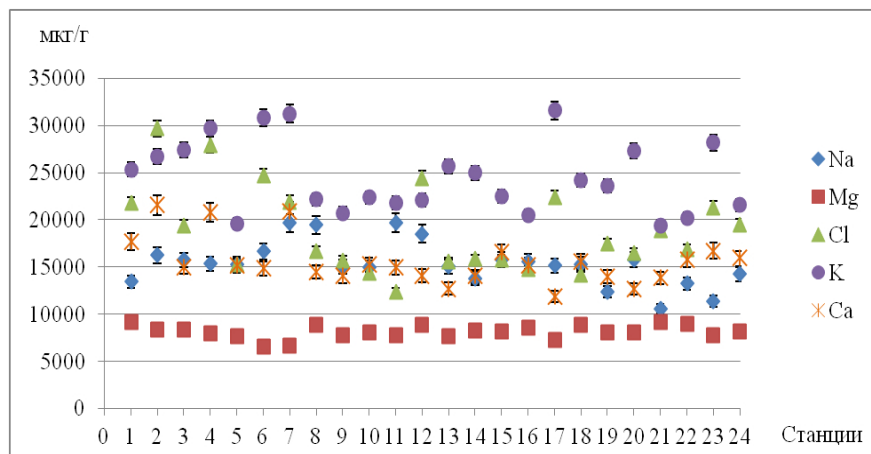


Рис. 1 Пространственная изменчивость средних концентраций макроэлементов в *C. barbata* (станции 2, 4, 6, 7, 17, 23, 24) и *C. crinita* (станции 1, 3, 5, 8–16, 18–22) (мкг/г) на 24 станциях: 1. Прибрежный аквальный комплекс (ПАК) у Джангульского оползневого побережья; 2. Мыс Тарханкут; 3. Ландшафтно-рекреационный парк Атлеш; 4. ПАК у мыса Лукулл; 5. ПАК у мыса Коса Северная; 6. Севастопольская бухта; 7. Карантинная бухта; 8. Круглая бухта; 9. Камышовая бухта; 10. Мыс Херсонес; 11. ПАК у мыса Фиолент; 12. Балаклавская бухта; 13. Урочище Батилиман; 14. пляж базы отдыха «Изумруд»; 15. ПАК у мыса Сарыч; 16. Приборная скала (Кацивели); 17. Сток пос. Кацивели; 18. ПАК у скалы Дива и горы Кошка (Скала Дива); 19. Пляж г. Ялта; 20. Природный парк «Мыс Мартыан»; 21. Природный заповедник (ПЗ) «Карадагский» (Мыс Биостанция); 22. ПЗ «Карадагский» (Кузьмичев Камень); 23. Керченский п-ов (Крепость); 24. Керченский п-ов (Порт Крым)

Микроэлементы. Пространственное распределение Al, Sc, V, Fe и Cs имеет общие закономерности: максимальные концентрации характерны для акватории ПЗ «Карадагский» и Керченского п-ова, ПАК у мыса Лукулл и мыса Тарханкут, минимальные – для ПАК у Джангульского оползневого побережья и ландшафтно-рекреационного парка Атлеш, акватории мыса Херсонес и ПАК у мыса Фиолент. Концентрации Mn в цистозире варьируют от 13–21 мкг/г в прибрежной акватории от м. Фиолент до м. Сарыч до 130–230 мкг/г в акватории мыса Коса Северная, ПЗ «Карадагский» и Керченского п-ова. Пространственная изменчивость содержания Zn в цистозире в пределах района связана, с одной стороны, с видоспецифичностью накопления этого элемента (его большим содержанием в стволах *C. crinita*), с другой – повышенным содержанием в акватории в результате ее загрязнения (акватория Камышовой и Балаклавской бухт, Ялтинского пляжа). Максимальные концентрации As характерны для цистозир из акватории бухты Ласпи (*C. crinita*), а минимальные – из акватории Керченского п-ова и других станций, где отбирали *C. barbata*, что связано, по-видимому, со способностью *C. crinita* более активно накапливать этот элемент. Максимальные концентрации Ni, Co и U определены в цистозире, отобранной в акватории ПАК у мыса Лукулл, Керченского п-ова, ПЗ «Карадагский» (для Co), мыса Херсонес (для U). Содержание Ba в цистозире из всех исследуемых районов примерно одинаково, за исключением акватории Керченского п-ова, где его концентрации в 4–8 раз выше и достигают 160 мкг/г. Самый

высокий уровень Br обнаружен в водорослях из акватории Тарханкутского п-ова, в то время как содержание I, Rb, Sr и Sb варьирует незначительно от станции к станции. Содержание Se изменяется от 0,1 мкг/г в *Cystoseira* spp. из акватории Тарханкутского п-ова до 0,4–0,6 мкг/г – из акватории Южного берега Крыма (Кацивели) и Керченского п-ова. Концентрации Ag варьируют от 0,04 до 0,23 мкг/г, при этом максимальные значения обнаружены в водорослях из акватории ПЗ «Карадагский», а минимальные – из акватории мыса Тарханкут, Ялтинского пляжа и бухты Ласпи. Такие элементы, как Hf, Th, Ce, Sm, Tb, Tm и Ta, определены в водорослях только из некоторых районов (в остальных пробах их концентрации, как правило, были ниже предела обнаружения). Zr определен в водорослях, отобранных на 5 станциях: его содержание варьирует от 3,5 мкг/г в акватории ландшафтно-рекреационного парка Атлеш до 7,6 мкг/г в акватории ПАК у мыса Лукулл и мыса Биостанция (ПЗ «Карадагский»). Максимальные концентрации большинства редкоземельных элементов, а также Hf, Ta и Th определены в водорослях, отобранных в акватории ПАК у мыса Лукулл, акватории ПЗ «Карадагский» и Керченского п-ова, при этом Gd определен только в образцах, отобранных в бухте Ласпи (рис. 2).

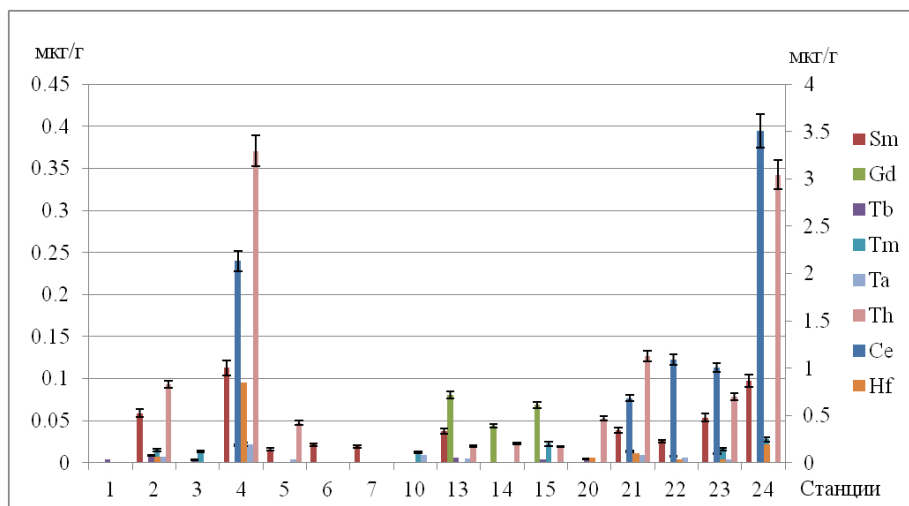


Рис. 2 Пространственная изменчивость средних концентраций Sm, Gd, Tb, Tm, Ta, Th (основная ось) и Ce, Hf (дополнительная ось) в *C. barbata* (ст. 2, 4, 6, 7, 23, 24) и *C. crinita* (ст. 1, 3, 5, 10–15, 20–22) (мкг/г) на 16 станциях (номера станций – как на рис. 1)

Известно, что уровни концентраций микроэлементов в растениях в сильной степени зависят от геохимии окружающей их среды. Данные о содержании элементов в разных типах горных пород иллюстрируют высокую изменчивость их концентраций в осадочных и магматических породах [4]. Так, содержание Al, Fe и Co в глинистых осадках и некоторых магматических породах на порядок выше их концентраций в известняках. Высокие концентрации таких элементов, как Al, Sc, V, Fe, Cs, Ni, Co, U в образцах из акваторий ПАК у мыса Лукулл и заповедника «Карадагский» связаны, по-видимому, с повышенными концентрациями этих элементов в воде. Для акватории мыса Лукулл это объясняется интенсивными оползневыми процессами в этом районе и характерными почвами – красноцветными глинами, которые богаты Fe, Al и другими элементами; для акватории м. Биостанция – как повышенным содержанием элементов терригенного происхождения в магматических породах основного и среднего состава, которыми сложено побережье, так и значительной степенью загрязнения прибрежной зоны. Высокие значения некоторых микроэлементов в образцах из акватории Керченского п-ова (Порт, Крепость) связаны, по-видимому, с высоким уровнем ее загрязнения, обусловленным работой нескольких портов, интенсивным судоходством. Кроме

того, донные отложения Керченского пролива, представленные преимущественно илистыми фракциями и обладающие высокой сорбционной емкостью, являются источником вторичного загрязнения акватории некоторыми металлами. Высокие значения отдельных элементов в образцах из акваторий Камышово́й, Карантинной, Балаклавской и Севастопольской бухт, пляжа г. Ялта, Качивели (сток) связаны, вероятно, с повышенным содержанием элементов в их водах в результате антропогенного загрязнения.

Выводы. Для Al, Sc, V, Mn, Fe, Cs, Hf и Th характерна высокая пространственная изменчивость их концентраций в *Cystoseira* spp. (максимальные и минимальные концентрации различаются более чем в 10 раз), для Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Ag, Ba, Ce, Sm, Tb, Tm, Ta и U – средняя (различаются в 4–10 раз), а для Na, Mg, Cl, K, Ca, Rb, Sr, Zr, Sb, I и Gd – низкая (различаются менее чем в 4 раза). Максимальное содержание Al, Sc, V, Fe, Cs характерно для акватории ПЗ «Карадагский» и Керченского п-ова, ПАК у мыса Лукулл и мыса Тарханкут, что объясняется видоспецифичностью их накопления, особенностями химического состава пород побережья или повышенным загрязнением вод. В акваториях некоторых районов наблюдаются повышенные концентрации отдельных элементов: As – в акватории бухты Ласпи, Ba – Керченского п-ова, Br – п-ова Тарханкут. Редкоземельные элементы, а также Hf, Ta и Th определены в образцах из отдельных районов, т. к. в остальных пробах их концентрации, как правило, были ниже предела обнаружения. В целом максимальное содержание большинства микроэлементов определено в видах цистозеры, отобранной в акватории ПЗ «Карадагский», Керченского п-ова, ПАК у мыса Лукулл, а минимальное – в акватории ПАК у Джангульского оползневого побережья, ландшафтно-рекреационного парка Атлеш и ПАК у мыса Фиолент.

1. Bryan G. W., Hummerstone L. G. Brown seaweed as an indicator of heavy metals in estuaries in south-west England // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1973. Т. 53, № 03. С. 705–720.
2. Бурдин К. С., Золотухина Е. Ю. Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность). – М.: Диалог МГУ, 1998. 202 с.
3. Молчанов Е. Ф., Маслов И. И., Ткаченко Ф. П. Влияние загрязнения моря на содержание поливалентных металлов у массовых видов водорослей-макрофитов Черного моря // Влияние антропогенных изменений окружающей среды на наземные и морские экосистемы Крыма (сб. науч. тр.); Ялта, 1988. Т. 104. С. 83–92.
4. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils. – New York: CRC Press, 2001. 432 p.

SPATIAL VARIABILITY OF MAJOR AND TRACE ELEMENTS CONCENTRATIONS IN SPECIES OF *CYSTOSEIRA* (BLACK SEA, COASTAL ZONE OF CRIMEA)

A. V. Kravtsova^{1,2}

¹ Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, RF, alexkravtsova@yandex.ru

² Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, RF

The levels of Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Ag, Sb, I, Cs, Ba, Ce, Sm, Gd, Tb, Tm, Hf, Ta, Th and U in macroalgae *Cystoseira barbata* and *Cystoseira crinita* sampled in the coastal zone of Crimea at 24 sites were determined. Maximum values of the majority of elements were found in the samples collected in the water areas of Karadag Nature Reserve, coastal aquatic complex near Cape Lukull and Kerch peninsula, and minimum values were found in the water area of Tarkhankut peninsula.

Key words: *Cystoseira*, major elements, trace elements, Crimean coast, Black Sea