ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИШАЙНИКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

Курченко В.П., Мямин В.Е., Бородин О.И., Гигиняк Ю.Г.

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь
E-mail: kurchenko@tut.by

Исследовано содержание ряда тяжелых металлов в некоторых листоватых и кустистых лишайниках Восточной Антарктиды. Показано, что дальний атмосферный перенос может оказать существенное влияние на накопление в лишайниках таких элементов, как Zn, Mn, Cu, Pb, Ti, Sr, Rb, Y, Ba. Значительное накопление лишайниками алюминия и железа связано с их литогенным происхождением. В качестве индикаторных видов атмосферного переноса и загрязнения тяжелыми металлами могут использоваться листоватый лишайник *Xanthoria elegans* и кустистый лишайник *Pseudephebe pubescens*.

Ключевые слова: кустистые лишайники, тяжелые металлы, атмосферный перенос, Антарктида, коэффициент обогащения, загрязнение

POSSIBILITIES OF THE USE OF LICHENS FOR THE ESTIMATION OF ANTHROPOGENIC POLLUTION WITH METALS IN THE EAST ANTARCTICA

Kurchenko V.P., Miamin V.E., Borodin O.I., Giginyak J.G.

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus,
E-mail: kurchenko@tut.by

The content of some metals in different species of leafy and bushy lichens of East Antarctica was investigated. It has been shown that long-range atmospheric transport can have a significant effect on the accumulation of elements such as Zn, Mn, Cu, Pb, Ti, Sr, Rb, Y, and Ba in lichens. A significant accumulation by lichens aluminum and iron is due to lithogenic origin of that elements. As an indicator of atmospheric transport and heavy metal pollution, leafy lichen *Xanthoria elegans* and bushy lichen *Pseudephebe pubescens* can be used.

Keywords: bushy lichens, heavy metals, atmospheric transport, Antarctica, enrichment factor, pollution

Поступила в редакцию 1.08.2019

DOI: 10.31163/2618-964X-2019-2-4-420-424

ВВЕДЕНИЕ

Научными исследованиями Белорусских антарктических экспедиций в районе базы «Гора Вечерняя» проведено исследование состава биоты и собрана коллекция из 7 видов мхов и 38 видов лишайников [1-3]. В экстремальных условиях Антарктиды флора представлена преимущественно лишайниками. Для Восточной Антарктиды и прибрежных районов характерны сильные стоковые ветра, достигающие скорости более 60 м/сек. Они являются переносчиками больших масс поллютантов. В этих условиях вся поверхность тела лишайника подвергается воздействию загрязнителей, находящихся в воздухе. Лишайники являются долгоживущими накопителями поллютантов, таких как тяжелые металлы, радионуклиды и др. [4]. Данные о видовом составе лишайников и их элементном составе могут использоваться для индикации загрязнения атмосферы различными химическими веществами [1; 4- 6]. В районе проведения исследований базы «Гора Вечерняя» элементный состав лишайников не изучался. В связи с этим целью данной работы являлась оценка аккумуляции тяжелых металлов кустистыми и листоватыми лишайниками для выявления видов, которые могут быть использованы в качестве биоиндикаторов антропогенного загрязнения Антарктиды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись листоватые *Xanthoria elegans, Physcia caesia, Umbilicaria* и кустистые лишайники *Usnea sphacelata, Pseudephebe pubescens,* собранные Белорусской антарктическойх экспедицией в районе полевой базы «Гора Вечерняя» (Восточная Антарктида, Земля Эндерби, холмы Тала, оазис Гора Вечерняя, 67º39’ ю.ш., 46º09’ в.д.). Определение видовой принадлежности лишайников в лабораторных условиях проводили по [3]. Образцы подвергали механическому измельчению и озолению при температуре 550°С в течение 5,5 часов. Элементный состав определяли с помощью рентгенофлуоресцентной спектрометрии на приборе ElvaX (США). Микроструктуру и химический состав лишайников изучали на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония). Исследования электронного парамагнетизма лишайников проводили на спектрометре “Varian E-112” (США) [4]. Представлены результаты среднеарифметических измерений трех независимых определений элементов. Статистическая обработка полученных данных проведена с использованием соответствующего приложения программы Microsoft Office Excel 2003.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Лишайники отличаются незначительным накоплением минеральных веществ. Согласно литературным данным [2; 3], в среднем их зольность колеблется в пределах от 0,7 до 2-4 % и различается у видов разных групп. Накипные лишайники отличаются большим содержанием золы (до 6-8 %), а листоватые и кустистые - меньшим. В нашем исследовании зольность листоватых и кустистых лишайников Восточной Антарктиды достигала 18 %, что свидетельствует о значительном накоплении ими металлов. Элементный состав конкретного лишайника зависит от его видовой принадлежности, возраста, субстрата произрастания и условий обитания. Сравнительный элементный состав исследуемых лишайников приведен в табл. 1.

Таблица 1 Содержание химических элементов в листоватых и кустистых лишайниках оазиса Гора Вечерняя, мкг/г сухого веса

Элемент	Листоватые лишайники			Кустистые лишайники	
	Xanthoria elegans	*Physcia caesia*	*Umbilicaria africana*	*Pseudephebe pubescens*	*Usnea sphacelata*
1	2	3	4	5	6
Ca	37323,1	18699,4	3803,6	23164,0	30893,3
Si	20764,1	8226,5	1300,1	73778,3	3933,0
Al	**11665,8**	2890,7	466,3	**35769,4**	1470,4
Fe	**1413,2**	535,04	274,8	**2007,0**	385,2
Mg	**3644,1**	1627,7	751,7	**2453,1**	895,3
Mn	14,3	13,1	4,5	**20,8**	3,0
Cu	4,8	5,1	7,1	**7,6**	2,5
Zn	11,1	11,6	14,5	13,2	6,0
Pb	**1,6**	0,7	0,3	**1,9**	1,0
Rb	**12,7**	2,2	1,0	**5,7**	1,0
Sr	**15,9**	9,5	1,9	**26,5**	12,0
Y	**1,6**	0,7	0,3	**1,9**	0,5
Zr	**11,1**	0,7	0,5	**9,4**	0,9
Ti	**131,8**	48,0	31,9	**158,7**	36,0

Анализ результатов представленных в табл. 1 показал, что для всех видов лишайников характерно высокое содержание Ca и Si. Меланиновые пигменты исследованных лишайников находятся в комплексе с хитином, который является неотъемлемым компонентом микобионта. Исследованные кустистые и листоватые лишайники отличаются жестким талломом, который формируется благодаря взаимодействию хитин-меланинового комплекса микобионта с Ca и другими элементами [6-8]. В накоплении металлов в трех видах листоватых лишайников наблюдаются значительные различия. Сравнение содержания элементов показало, что в *Xanthoria elegans* значительно больше, чем в *Physcia caesia* и *Umbilicaria africana*.: Si - 2,5 и 16 раз, Al - 4 и 25 раз, Fe - 2,6 и 5 раз, Mg - 2,2 и 4,8 раз, Mn - 1,1 и 3,2 раза, Pb - 2,2 и 4,9 раз, Rb - 5,8 и 13 раз, Sr - 1,68 и 8,2 раза, Y - 2,2 и 5 раз, Zr - 15,3 и 23 раза, Ti - 2,7 и 4,12 раз соответственно. Содержание Cu и Zn у этих видов имели близкие значения. Значительные видовые отличия в накоплении различных элементов исследованными листоватыми лишайниками позволяют использовать *Xanthoria elegans* в качестве индикаторного вида при оценке дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ.

Кустистый лишайник *Pseudephebe pubescens* накапливает различные элементы значительно больше, чем *Usnea sphacelata*: Al - 24,3 раза, Fe - 5,2 раза, Mg - 2,74 раза, Mn - 6,9 раз, Cu - 3,02 раз, Zn - 2,2 раза, Pb - 1,87 раз, Rb - 5,6 раз, Sr - 2,2 раза, Y - 3,7 раз, Zr - 9,9 раз, Ti - 4,4 раза. Эта видовая особенность *Pseudephebe pubescens* накапливать большие количества металлов позволяет использовать его в качестве индикаторного вида. Значительные количества Al, Fe и Mg в исследованных лишайниках объясняется высоким содержанием этих элементов в субстрате произрастания - скальных породах. Для таких металлов, как Zn, Mn, Cu и Pb характерен удаленный перенос, зачастую связанный с антропогенным загрязнением [4; 5; 9]. Среди исследованных видов максимальное количество этих металлов накапливается в *Pseudephebe pubescens*. Установлено, что металлы накапливаются путем их поглощения всем телом лишайника, аккумулируясь в тканях. Поглощение металлов представляет собой пассивный процесс диффузии, за счет которого они выборочно абсорбируются лишайниками. Интересно отметить, что металлы оседают на внешней поверхности или внутри клеточных стенок грибного симбионта и иммобилизуются в нем, не влияя на водорослевый симбионт до тех пор, пока их концентрация не превышает пороговых значений. Накопление тяжелых металлов в лишайниках определяется их видовой принадлежностью и тесно связана со степенью загрязнения воздуха [7- 9].

Механизм накопления элементов различными видами лишайников малоизучен. В связи с этим, проведено исследование анатомического строения кустистых лишайников Антарктиды и определение относительного содержания ряда элементов в различных частях их таллома. Кустистые лишайники Антарктиды отличаются жестким талломом, который формируется благодаря взаимодействию хитин-меланинового комплекса микобионта с Ca и другими элементами. Он защищает фикобионт от экстремальных воздействий и поддерживает вертикальные лопасти кустистых слоевищ. Черный цвет корового слоя определяется высоким содержанием меланиновых пигментов, которые не только связывают металлы, но и служат защитой от УФ-облучения [1; 2]. Количество парамагнитных центров в меланинах кустистых лишайников *Usnea sphacelata* и *Pseudephebe pubescens* составило соответственно $0{,}45\times10^{17}$ спин/г и $0{,}94\times10^{17}$ спин/г, что свидетельствует о большом количестве меланина в коровом слое, который задерживает более 90% УФ [2]. Зона

фикобионта выполняет функцию ассимиляции углекислоты и накопления органических веществ. Необходимо отметить, что на глубине до 20 микрон отдельные анатомические части слоевища лишайников имеют отличия в накоплении и распределении элементов в поверхностном слое, как видно из табл. 2.

Таблица 2. Относительное содержание химических элементов в % морфологических частей таллома кустистых лишайников Антарктиды *Usnea sphacelata* и *Pseudephebe pubescens*

Элемент	*Usnea sphacelata,* боковая ветвь таллома, светлая часть	*Usnea sphacelata,* боковая ветвь таллома, темная часть	*Pseudephebe pubescens,* краевая поверхность таллома	*Pseudephebe pubescens,* центральная зона таллома
Ca	0.03	0.77	0.58	0.69
Si	0.08	5.65	3.62	6.37
Al	0.91	1.13	2.06	2.97
Fe	0.16	0.67	3.29	5.31
Mg	0.09	0.11	1.05	1.46
Cu	3.96	2.05	2.74	2.53
Zn	3.93	0.87	1.92	1.32

Стоит отметить высокое содержание Si и Ca в темной части боковых ветвей *Usnea sphacelata,* которое в 70,6 и 25,6 раз выше, чем в светлой нижней части ветвей лишайника. Эти элементы связаны с хитин-меланиновым комплексом и создают жесткую структуру таллома. Относительное содержание элементов литогенного происхождения Al, Fe значительно выше у *Pseudephebe pubescens*, чем у *Usnea sphacelata*. Содержание Fe значительно больше в темных морфологических частях таллома обоих лишайников, что может свидетельствовать об их более интенсивном связывании с меланинами. Для таких металлов, как Zn, Mg и Cu характерно относительно равномерное распределение по морфологическим частям таллома обоих лишайников. Поступление металлов в лишайники осуществляется через коровый слой лишайников. В нём происходит связывание с хитин-меланиновым комплексом микобионта, а в дальнейшем выборочно абсорбирование мико- и фикобионтом [5]. Исследовано анатомическое строение листоватых лишайников Антарктиды и определение относительного содержания ряда элементов в различных частях их таллома, см. табл. 3. Листоватые лишайники имеют вид листовидной пластинки, горизонтально распростертой по поверхности субстрата. За счет радиального краевого роста форма слоевищ, как правило, округлая. Характерной особенностью листоватых слоевищ является выраженное дорсовентральное строение: верхняя сторона по цвету и структуре отличается от нижней. Необходимо отметить, что на глубине до 2-х микрон отдельные морфологические части таллома лишайников имеют отличия в накоплении и распределении элементов в поверхностном слое.

Необходимо отметить, что содержание Fe значительно больше в темных морфологических частях таллома обоих лишайников, что может свидетельствовать об их более интенсивном связывании с меланинами. Для таких металлов, как Zn, Mg и Cu характерно относительно равномерное распределение по морфологическим частям таллома обоих лишайников [6].

Таблица 3. Относительное содержание химических элементов, % в морфологических частях таллома листоватых лишайников Антарктиды

Элемент	*Xanthoria elegans* краевая поверхность	*Physcia caesia* краевая поверхность	*Umbilicaria africana* Краевая поверхность	*Umbilicaria africana* центральная зона	*Umbilicaria africana* верхняя светлая часть	*Umbilicaria africana* нижняя черная часть
Ca	-	0.84	0.46	0.14	0.82	0.72
Si	1.11	5.31	1.37	0.91	8.76	1.44
Al	1.77	2.66	0.95	0.51	1.94	1.58
Fe	0.53	**5.23**	1.04	0.57	3.65	1.74
Mg	1.21	1.48	0.39	0.89	1.08	0.10
Cu	2.99	4.40	3.73	1.39	3.41	4.09
Zn	1.89	2.17	2.17	1.08	1.29	1.86

Можно заключить, что лихеноиндикация является эффективным способом мониторинга загрязнения Антарктиды. В качестве индикаторных видов загрязнения металлами могут использоваться листоватый лишайник *Xanthoria elegans* и кустистый лишайник *Pseudephebe pubescens*. Актуальным является дальнейшее исследование элементного состава этих лишайников в различных частях Антарктиды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев М.П., Курбатова Л.Е. Криптогамная флора массива Клеменс (ледник Ламберта, Континентальная Антарктика) // Труды БГУ. 2014. т. 9, ч. 2. С. 49-57.
2. Гигиняк Ю.Г., Яцына А.П., Бородин О.И. Новые данные о лишайниках Земли Эндерби (Восточная Антарктида) // Доклады НАН РБ. 2012. Т. 56. № 3. С. 88-92.
3. Цуриков А.Г., Храмченкова О.М. Листоватые и кустистые городские лишайники: атлас-определитель: учебное пособие для студентов биологических специальностей вузов. Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2009. 123 с.
4. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Кутенков С.А.,. Виноградова А.А, Гордеев В.В., Демина Л.Л., Иванова Ю.А., Филиппов А.С. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ//Современные проблемы науки и образования. 2011. № 3. С. 35-43.
5. Феофилова Е.П. Ключевая роль хитина в образовании клеточной стенки грибов // Хитин и хитозан: получение, свойства и применение. 2002. С. 91-98.
6. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 3. P. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
7. Багманян И.А., Мямин В.Е., Гигиняк Ю.Г., Бородин О.И., Курченко В.П. Возможная роль меланинов в адаптации лишайников к экстремальным факторам Антарктиды) // Труды БГУ. 2014. т. 9, ч. 2. С. 82-89.
8. Анищенко Л.Н., Шапурко В.Н., Сафранкова Е.А. Особенности аккумуляции тяжелых металлов растениями и лишайниками в условиях сочетанной антропогенной нагрузки // Фундаментальные исследования. № 9, 2014 С. 1527-1531.
9. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Starodymova D.P., Vasyukova E.V., Drovnina S.I., Zamber N.S., Makhnovich N.M., Savvichev A.S., Sonke J. Geochemistry of Terricolous Lichensin the White Sea Catchment Area // Doklady Earth Sciences. 2013, V. 450, N 1. P. 514-520. DOI: 10.1134/S1028334X13050073