

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 582.29, 581.5, 550.462

В. П. КУРЧЕНКО<sup>1</sup>, И. А. БАГМАНЯН<sup>1</sup>, В. Е. МЯМИН<sup>2</sup>, О. И. БОРОДИН<sup>2</sup>, Ю. Г. ГИГИНЯК<sup>2</sup>ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В КУСТИСТЫХ ЛИШАЙНИКАХ КАК ИНДИКАТОР  
АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АНТАРКТИДЕ

(Представлено академиком В. Ф. Логиновым)

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
kurchenko@tut.by; irina\_bagmanian@gmail.ru<sup>2</sup>Научно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Минск, Беларусь  
vladmiamin@mail.ru; borodinoi\_zoo@mail.ru; antarctida\_2020@mail.ru

Исследовано содержание ряда металлов в некоторых кустистых лишайниках Восточной Антарктиды. Дана оценка влияния различных источников на формирование их элементного состава. Показано, что дальний атмосферный перенос таких элементов, как Zn, Mn, Cu, Pb, Ti, Sr, Rb, Y, Ba оказывает существенное влияние на их накопление в лишайниках. Накопление лишайниками алюминия и железа связано с их литогенным происхождением. В сравнении с другими лишайниками для *Pseudephebe pubescens* характерно значительное накопление указанных элементов, и следовательно, этот вид может быть использован в качестве индикатора атмосферного переноса загрязняющих веществ в атмосфере.

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

V. P. KURCHENKO<sup>1</sup>, I. A. BAGMANYAN<sup>1</sup>, V. E. MIAMIN<sup>2</sup>, O. I. BORODIN<sup>2</sup>, J. G. GIGINYAK<sup>2</sup>HEAVY METALS IN FRUTICOSE LICHENS OF ANTARCTIDA AS AN INDICATOR  
OF ATMOSPHERIC TRANSPORT OF POLLUTANTS<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus  
kurchenko@tut.by; irina\_bagmanian@gmail.ru<sup>2</sup>Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Biological resources, Minsk, Belarus  
vladmiamin@mail.ru; borodinoi\_zoo@mail.ru; antarctida\_2020@mail.ru

The content of a number of metals in some fruticose lichens from East Antarctica has been studied. The influence of various sources on the formation of their composition has been estimated. It has been shown that long-distance atmospheric transfer of such elements as Zn, Mn, Cu, Pb, Ti, Sr, Rb, Y, Ba has an essential impact on their accumulation in lichens. Accumulation of aluminium and iron in lichens is associated with their lithogenic origin. Comparing to other lichens, *Pseudephebe pubescens* is characterized by a significant accumulation of the above-noted metals, and this species can therefore be used as an indicator of atmospheric transfer of pollutants in the air.

*Keywords:* fruticose lichens, heavy metals, atmospheric transfer, Antarctica, enrichment factor, pollution.

**Введение.** Живые организмы Антарктики относят к экстремофилам, поскольку они способны выживать в условиях, часто непригодных для обитателей других широт. В условиях Антарктиды флора представлена преимущественно лишайниками. Научно-экспедиционным составом 5-й и 6-й Белорусских антарктических экспедиций в районе белорусской полевой базы «Гора Вечерняя» проведен сбор лишайников, которые были представлены 29 видами [1].

Лишайники – организмы, состоящие из ассоциации грибов и зеленых водорослей или цианобактерий, развившие способности к выживанию в разнообразных неблагоприятных экологических условиях [2]. Для Восточной Антарктиды и прибрежных районов характерны сильные стоковые ветра, достигающие скорости более 60 м/с. Они могут быть переносчиками больших масс

поллютантов. В этих условиях вся поверхность лишайника подвергается воздействию загрязнителей, находящихся в воздухе. Лишайники, являющиеся долгоживущими накопителями тяжелых металлов, радионуклидов среды, способны накапливать в своем слоевище различные химические элементы, а также обладают уникальной способностью извлекать их из окружающей среды [3]. Данные о видовом и элементном составе лишайников могут использоваться для индикации загрязнения атмосферы Антарктиды химическими веществами [2; 3]. В районе проведения исследований базы «Гора Вечерняя» ранее элементный состав лишайников не изучался. Представлялось важным для оценки степени загрязненности атмосферы разных регионов Земли сравнить эти показатели, а также элементный состав кустистых лишайников Антарктиды и Палеартики, в частности Северной Карелии [3], где расположены промышленные предприятия по переработке полиметаллических руд.

**Материалы и методы исследования.** Объектами исследования служили кустистые лишайники *Usnea sphacelata*, *Pseudephebe pubescens*, собранные научно-экспедиционным составом 5-й и 6-й Белорусских антарктических экспедиций в районе белорусской полевой базы «Гора Вечерняя» (Восточная Антарктида, Земля Эндерби, холмы Тала, оазис Гора Вечерняя, 67°39' ю. ш., 46°09' в. д.).

Определение видовой принадлежности лишайников в лабораторных условиях проводили по [2]. Для определения элементного состава образцы подвергали механическому измельчению и озолению при температуре 550 °С в течение 5,5 ч. Элементный состав определялся 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], статистическая обработка полученных данных проведена с использованием соответствующего приложения программы Microsoft Office Excel 2003.

**Результаты и их обсуждение.** Лишайники отличаются незначительным накоплением минеральных веществ. Согласно литературным данным [2; 3], их средняя 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. Исследование показало, что зольность образцов составила для *Usnea sphacelata* 5 %, *Pseudephebe pubescens* – 18,9 %, что свидетельствует о значительном накоплении металлов в лишайниках Восточной Антарктиды.

Элементный состав конкретного лишайника зависит от его видовой принадлежности, возраста, субстрата произрастания и условий обитания. Сравнительный элементный состав исследуемых кустистых лишайников Антарктиды и Северной Карелии приведен в табл. 1. Для оценки антропогенного или литогенного источников поступления элементов в лишайники были рассчитаны значения коэффициентов обогащения лишайников (КО) по формуле

$$КО = (\text{Эл}/\text{Al})\text{проба} / (\text{Эл}/\text{Al})\text{земная кора},$$

где Эл – концентрации интересующего нас элемента в пробе и континентальной земной коре, а также алюминия в пробе и в земной коре [5]. Результаты анализа представлены на рис. 1.

Т а б л и ц а 1. Содержание химических элементов в исследуемых кустистых лишайниках Антарктиды и Северной Карелии, мкг/г сухого веса

Элемент	Антарктида		Карелия	
	<i>Usnea sphacelata</i> , 67°39' ю. ш., 46°09' в. д.	<i>Pseudephebe pubescens</i> , 67°39' ю. ш., 46°09' в. д.	<i>Usnea dasypoga</i> , 60°59' с. ш., 33°48' в. д. [3]	<i>Usnea dasypoga</i> , 61°54' с. ш., 33°55' в. д. [3]
Al	1470,4	35769,4	215	155
Fe	385,25	2007,03	240	205
Zn	6,004	13,229	31	42
Mn	3,002	34,35	125	157
Cu	2,502	7,5594	2,2	1,9
Pb	1,0006	1,889	3,1	0,1

Анализ литературных данных [3], результатов, представленных в табл. 1 и на рис. 1, позволяет разделить элементы на две группы: Al и Fe, имеющих литогенное происхождение, связанное в основном с субстратом произрастания, а для элементов Zn, Mn, Cu и Pb характерен общий механизм переноса от удаленных источников. Для лишайников Северной Карелии и Антарктиды характерны значительные различия в накоплении металлов. В частности, в *Pseudephebe pubescens* содержание Al в 24–160 раз, Fe в 5–8 раз больше, чем в лишайниках рода *Usnea*, что показывает видовую специфичность накопления металлов. Значительные количества Al и Fe в лишайниках Антарктиды можно объяснить высоким содержанием этих элементов в субстрате произрастания – скальных породах, тогда как лишайники из Северной Карелии являются эпифитами. Для таких металлов, как Zn, Mn, Cu и Pb характерен удаленный перенос, зачастую связанный с антропогенным загрязнением. Относительно высокое содержание Zn, Mn в образцах лишайников из Северной Карелии объясняется близостью металлургических комбинатов Мурманской области [3]. Кроме того, Mn входит в состав хлорофилла фикобионта лишайников и его высокое содержание в лишайниках Карелии свидетельствует о более интенсивных процессах фотосинтеза. Содержание Cu в лишайниках Антарктиды и Карелии близки. Значения КО Pb выше у эпифитных лишайников Карелии, что может быть связано с близостью Мончегорского комбината по переработке полиметаллических руд [3].

В образцах лишайников из Антарктиды проведено дополнительное исследование ряда элементов. Показано, что в *Usnea sphacelata* содержание элементов в мкг/г сухого веса составило: Ca – 30893,3, K – 9713,2, Si – 3933, P – 1549,5, Ti – 36,02, Sr – 12,008, Rb – 1,0006, Y – 0,5003, Ba – 0,5003.

Сравнение содержания элементов в этих двух видах лишайников показало, что в *Pseudephebe pubescens* значительно больше: Si в 19 раз, K, P и Ti в 4 раза, Sr в 2 раза, Rb в 5 раз, Y и Ba в 3,7 раз, а Ca в 1,33 раза меньше, чем в *Usnea sphacelata*. Эти видовые отличия в накоплении различных элементов исследованными кустистыми лишайниками позволяют использовать *Pseudephebe pubescens* в качестве индикаторного вида при оценке дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ.

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 (табл. 2). Как видно из рис. 2, а, *Usnea sphacelata* представляет собой кустистый прямостоячий лишайник 1,5–2,0 (5,0) см длиной. Главный стебель (ось) отходит от общего основания; боковые ветви удлиненные, слабо раздвоенные; ветвление более или менее дихотомическое и регулярное; боковые ветви круглые в сечении, пестрые с черными полосами. Фикобионтом является зеленая водоросль требуксия [2].

Т а б л и ц а 2. Относительное содержание химических элементов в % морфологических частей таллома кустистых лишайников Антарктиды *Usnea sphacelata* и *Pseudephebe pubescens*

Элемент	<i>Usnea sphacelata</i> , боковая ветвь таллома, светлая нижняя часть	<i>Usnea sphacelata</i> , боковая ветвь таллома, темная верхняя часть	<i>Pseudephebe pubescens</i> , краевая поверхность таллома	<i>Pseudephebe pubescens</i> , центральная зона таллома
C	28,75	30,07	25,63	22,84
O	61,82	58,08	56,21	53,51
K	0,25	0,61	1,93	2,49
Si	0,08	5,65	3,62	6,37
Ca	0,03	0,77	0,58	0,69
Al	0,91	1,13	2,06	2,97
Fe	0,16	0,67	3,29	5,31
Zn	3,93	0,87	1,92	1,32
Mg	0,09	0,11	1,05	1,46
Cu	3,96	2,05	2,74	2,53

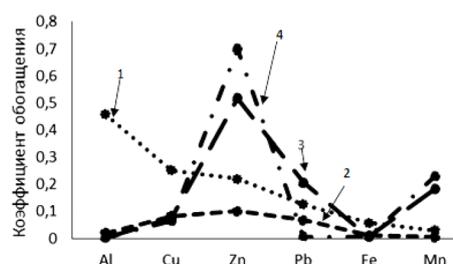


Рис. 1. Коэффициенты обогащения лишайников относительно среднего состава континентальной земной коры: 1 – *Pseudephebe pubescens*, 67°39' ю. ш., 46°09' в. д., 2 – *Usnea sphacelata*, 67°39' ю. ш., 46°09' в. д., 3 – *Usnea dasypoga*, 60°59' с. ш., 33°48' в. д., 4 – *Usnea dasypoga*, 61°54' с. ш., 33°55' в. д.

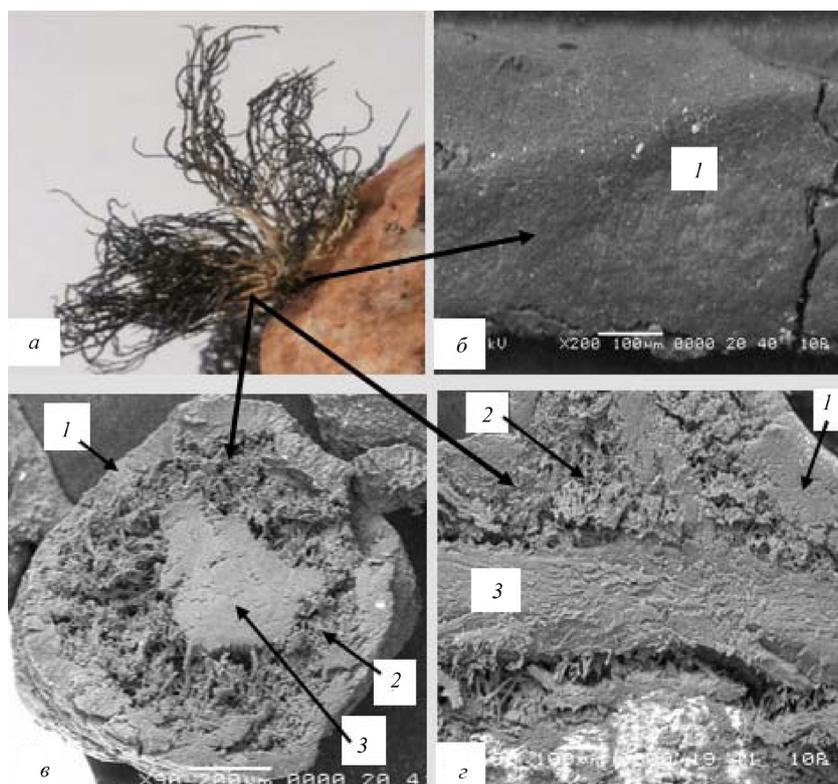


Рис. 2. Анатомическое строение *Usnea sphacelata*: а – внешний вид, б – внешняя поверхность главного стебля, в – поперечный разрез боковой ветви светлой части, з – продольный разрез боковой ветви светлой части; 1 – коровый слой; 2 – зона фикобионта; 3 – сердцевина [2]

Анализ анатомического строения *Usnea sphacelata* показал, что он имеет радиальную структуру: снаружи их ветви покрыты коровым слоем, под ним располагается водорослевый слой, или зона фикобионта, а центральная часть заполнена сердцевиной (рис. 2, в и з).

**Коровый слой** (рис. 2, в 1 и 2, з 1), через который происходит диффузия металлов, создает внешний каркас лишайника, состоящий из хитин-глюкан-меланинового комплекса [6]. Кустистые лишайники Антарктиды отличаются жестким талломом, который формируется благодаря взаимодействию хитин-меланинового комплекса микобионта с Ca и другими элементами (табл. 2). 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 [4]. В связи с этим проведено исследование количества парамагнитных центров в меланинах кустистых лишайников *Usnea sphacelata* и *Pseudophebe pubescens*, которое составило соответственно  $0,45 \cdot 10^{17}$  спин/г и  $0,94 \cdot 10^{17}$  спин/г. Высокое содержание парамагнитных центров свидетельствует о большом количестве меланина в коровом слое, который задерживает более 90 % УФ.

**Зона фикобионта** (рис. 2, в, 2 и 2, з, 2) выполняет функцию ассимиляции углекислоты и накопления органических веществ. **Сердцевина** (рис. 2, в, 3 и 2, з, 3) состоит из грибных гиф, которые осуществляют подведение воздуха к водорослевым клеткам для нормального осуществления процесса фотосинтеза.

Необходимо отметить, что на глубине до 2 микрон отдельные морфологические части таллома лишайников имеют отличия в накоплении и распределении элементов в поверхностном слое (табл. 2).

Анализ данных табл. 2 показал, что на различных частях обоих исследованных видов относительное содержание С и О близкое, что свидетельствует о их биогенном происхождении. 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*. 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.

Поступление металлов в лишайники осуществляется через коровый слой. В нем происходит связывание с хитин-меланиновым комплексом микобионта, а в дальнейшем выборочно абсорбирование мико- и фикобионтом [6].

**Заключение.** Долгоживущие кустистые лишайники Антарктиды способны извлекать из окружающей среды и накапливать в своем слоевище различные химические элементы. Благодаря этим свойствам они могут являться индикаторными организмами загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами и другими поллютантами. Проведенное сравнительное исследование кустистых лишайников *Usnea sphacelata*, *Pseudephebe pubescens* Антарктиды показало, что между ними существуют видовые отличия в накоплении различных элементов литогенного и антропогенного происхождения.

Для *Pseudephebe pubescens* характерно значительное накопление элементов, что позволяет использовать *Pseudephebe pubescens* в качестве индикаторного вида при оценке дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ.

### Список использованной литературы

1. Гигиняк, Ю. Г. Новые данные о лишайниках Земли Эндерби (Восточная Антарктида) / Ю. Г. Гигиняк, А. П. Яцына, О. И. Бородин // Докл. НАН Беларуси. – 2012. – Т. 56, № 3. – С. 88–92.
2. Цуриков, А. Г. Листоватые и кустистые городские лишайники: атлас-определитель / А. Г. Цуриков, О. М. Храменкова. – Гомель: Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, 2009. – 123 с.
3. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ / В. П. Шевченко [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 3. – С. 35–43.
4. Новиков, Д. А. Фотопротекторные свойства меланинов из винограда (*Vitis vinifera*) и черного грузинского чая (*Thea sinensis*) / Д. А. Новиков, В. П. Курченко, И. И. Азарко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001. – Т. 41, № 6. – С. 670–676.
5. Rudnick, R. L. Composition of the Continental Crust / R. L. Rudnick, S. Gao // Treatise on Geochemistry. – Vol. 3. The Crust. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – P. 1–64.
6. Феофилова, Е. П. Ключевая роль хитина в образовании клеточной стенки грибов / Е. П. Феофилова // Хитин и хитозан: получение, свойства и применение. – М., 2002. – С. 91–98.

Поступило 25.04.2016