

ИСТОЧНИКИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, НАКАПЛИВАЮЩИХСЯ В КУСТИСТЫХ ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ КАРЕЛИИ

Виноградова А. А.¹, Замбер Н. С.², Кутенков С. А.³, Шевченко В. П.⁴

¹ФГБУН Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Россия (119017, Москва, Пыжевский переулок, 3), e-mail: anvinograd@yandex.ru

²ФГБУ Государственный природный заповедник "Костомукшский", Костомукша, Россия (186930, Карелия, Костомукша, ул. Приозерная, 2), e-mail: zamber.nat@mail.ru

³ФГБУН Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия (185910, Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11), e-mail: effort@krc.karelia.ru

⁴ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия (117997, Москва, Нахимовский проспект, 36), e-mail: vshevch@ocean.ru

В статье представлены результаты исследования источников тяжелых металлов, накапливающихся в кустистых эпифитных лишайниках Карелии. Используются результаты определения тяжелых металлов в 28 пробах лишайников родов *Alectoria*, *Bryoria* и *Usnea*, отобранных в 2007 и 2010 гг. в разных районах Карелии, и расчета обратных траекторий переноса воздушных масс. Показано, что основная часть свинца, накапливающегося в эпифитных кустистых лишайниках Карелии, поступает в результате дальнего, в том числе трансграничного, атмосферного переноса; литогенные металлы (Al, Sc, Fe, U, Th, Ba) поступают в основном из локальных и региональных источников; вблизи Костомукши лишайники обогащены Fe и рядом литогенных элементов за счет поступления пыли, образующейся в результате работы Костомукшского ГОКа; одним из важных источников Cu и Ni, накапливающихся в лишайниках на северо-востоке Карелии, являются металлургические комбинаты, расположенные на Кольском полуострове.

Ключевые слова: тяжелые металлы, эпифитные лишайники, Карелия, загрязнение окружающей среды, дальний атмосферный перенос.

SOURCES OF HEAVY METALS ACCUMULATING IN FRUTICOSE EPIPHYTIC LICHENS OF KARELIA

Vinogradova A. A.¹, Zamber N. S.², Kutentkov S. A.³, Shevchenko V. P.⁴

¹A. M. Oboukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia (119017, Moscow, Pyzhevsky pereulok, 3), e-mail: anvinograd@yandex.ru

²State natural reserve "Kostomukshsky", Kostomuksha, Russia (186930, Karelia, Kostomuksha, Priozernaya street, 2), e-mail: zamber.nat@mail.ru

³Institute of Biology of Karelian Research Center RAS, Petrozavodsk, Russia (185910, Karelia, Petrozavodsk, Pushkinskaya street, 11), e-mail: effort@krc.karelia.ru

⁴P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia (117997, Moscow, Nakhimovsky prospect, 36), vshevch@ocean.ru

Results of studies of sources of heavy metals accumulating in fruticose epiphytic lichens of Karelia are presented in the article. Data on heavy metals contents in 28 samples of lichens of *Alectoria*, *Bryoria* and *Usnea* genera, collected in 2007 and 2010 in some places of Karelia, and calculations of backward trajectories of air masses are used. It has been shown, that main part of lead, accumulating in the fruticose epiphytic lichens of Karelia, comes as a result of long-range (including transboundary) atmospheric transport; lithogenic metals (Al, Sc, Fe, U, Th, Ba) come mainly from local and regional sources; lichens near Kostomuksha are enriched by Fe and some lithogenic elements due to delivery of dust, originated as a result of Kostomuksha ore mill work; one of important sources of Cu and Ni, accumulating in lichens in north-eastern part of Karelia, is metallurgic industry, situated on the Kola Peninsula.

Key words: heavy metals, epiphytic lichens, Karelia, environmental pollution, long-range atmospheric transport.

Введение. Одним из методов оценки степени загрязнения воздуха тяжелыми металлами является изучение элементного состава лишайников [2]. Тяжелые металлы, накапливающиеся в лишайниках, поступают за счет атмосферного переноса от многих

источников, как природных, так и антропогенных, расположенных на различных расстояниях [1]. Цель нашего исследования состоит в оценке различных источников тяжелых металлов, накапливающихся в кустистых эпифитных лишайниках Карелии.

Материалы и методы. 28 проб кустистых эпифитных лишайников родов *Alectoria*, *Bryoria* и *Usnea* были отобраны в 2007 и 2010 гг. в Карелии (в том числе 10 проб *Alectoria sarmentosa* в районе г. Костомукша) (рис. 1). Во избежание загрязнения отбор проб производился в одноразовых полиэтиленовых перчатках. Элементный состав проб из района Костомукши изучался методом инструментального нейтронно-активационного анализа [1, 2]. Состав остальных проб был определен методом атомно-абсорбционного анализа [6].

Результаты и их обсуждение. Для оценки роли различных источников Pb, токсичного элемента, важную роль в распределении которого в различных экосистемах играет воздушный перенос [1], были рассчитаны коэффициенты обогащения (КО) относительно среднего состава земной коры по формуле:

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

где Pb и Al – содержание свинца и алюминия в пробе и в земной коре [10], соответственно. В целом для Карелии КО свинцом имеют высокие значения, но их значения варьируют незначительно, уменьшаясь в северо-восточном направлении (рис. 1).

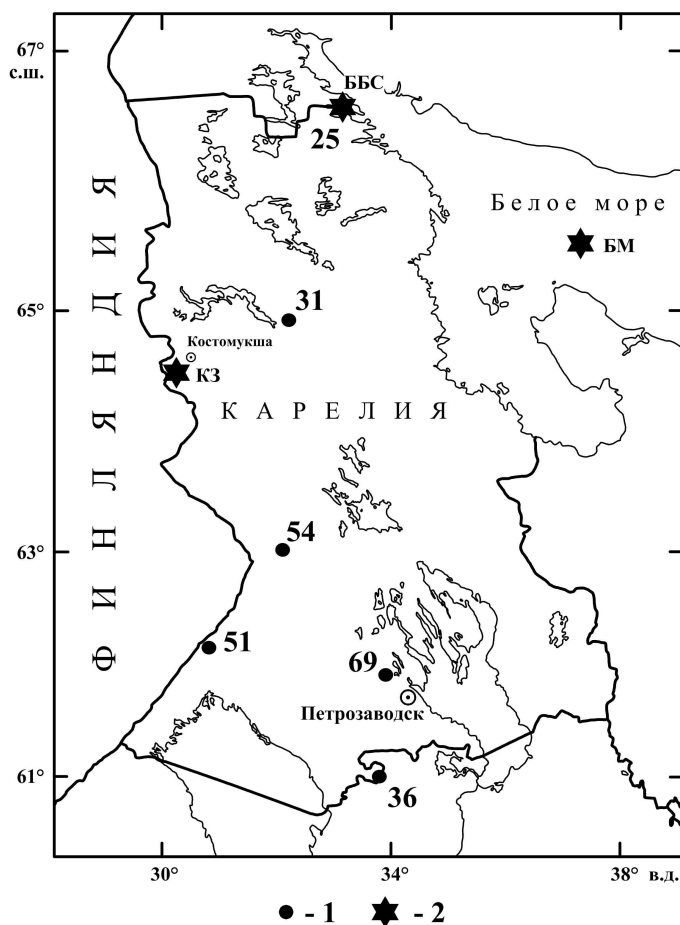


Рис. 1. Схема расположения точек, на которых были изучены лишайники (1), и точек, для которых были рассчитаны обратные траектории переноса воздушных масс (2): КЗ – Костомукшский заповедник; ББС – Беломорская биологическая станция им. Н.А. Перцова МГУ; БМ – центр Белого моря. Цифры около точек означают коэффициент обогащения лишайников свинцом относительно среднего состава континентальной земной коры [10].

Об общности происхождения элементов можно судить по корреляции содержания их в изучаемых пробах. Для окрестностей г. Костомукша (n = 10 проб) выделяются 4 основные группы элементов (рис. 2): Fe и Sc (1) – типичные литогенные элементы, поступающие в атмосферу из карьера и отвалов Костомукшского горнообогатительного комбината (ГОК) [4]), которые противостоят антропогенным Zn, Cr и Na (2) – выбрасываемым в ходе металлургических производств в удаленных районах, а также две терригенные группы (3) Lu, Sr, Co, Ca и (4) U, Th, Ba, которые отличаются от первой и друг от друга, возможно, территориальным расположением их источников. В группе (3) Co тяготеет ещё и к группе (1), а Ca – к антропогенной группе (2).

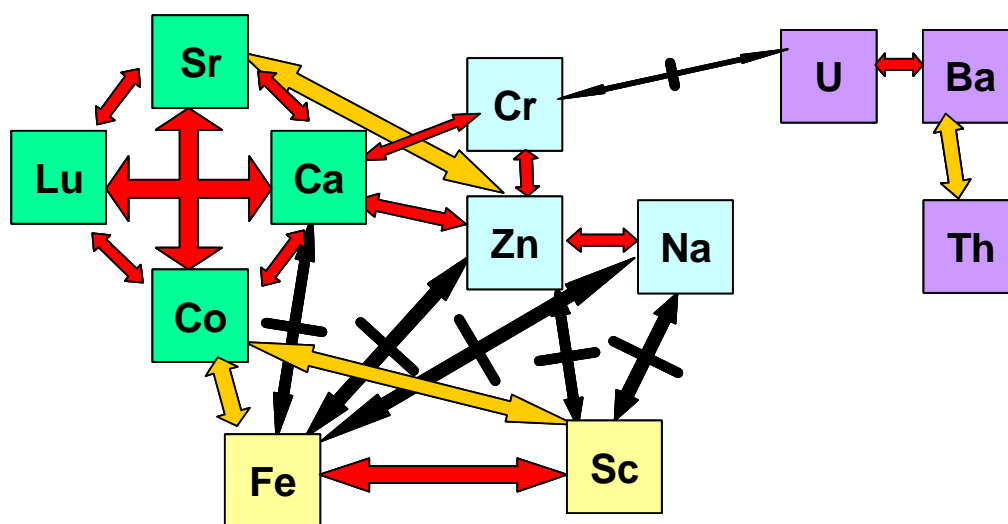


Рис. 2. Схема корреляции содержания элементов в пробах лишайников, собранных вблизи Костомукши. Стрелки: красные – коэффициенты корреляции $R > 0,6$; желтые – $R > 0,5$; черные зачеркнутые – коэффициенты корреляции отрицательные $|R| > 0,6$.

Достаточно грубая оценка трансграничного переноса (ТГП) антропогенных металлов от стран Европы на рассматриваемые территории может быть выполнена по результатам отчетов ЕМЕР и МСЦ-В [8, 9]. В табл. 1 приведены потоки свинца (и их соотношения), поступающего за год через атмосферу на всю территорию Финляндии со стороны самой Финляндии, а также от ряда стран Европы и европейской территории России (ЕТР).

Таблица 1. Поток свинца из атмосферы на территорию Финляндии в 2005 г.

Источник	На всю территорию страны		Средний поток на границе Финляндии и России, мкг/м ² /год
	Абсолютный, т/год, из [9]	По отношению к Финляндии	
Финляндия	10	1	45
Швеция	1	0,1	4,5
Норвегия	0,2	0,02	0,9
ЕТРоссии	2,7	0,25	11
Остальная Европа	21	2,1	95

В [4] были сделаны первые оценки ТГП для Pb, Ni и Cu, поступающих со стороны Финляндии на территорию Костомукшского заповедника, расположенного приблизительно в середине границы России с Финляндией. Исходя из величины потока Pb со стороны Финляндии на ЕТР, для него было получено значение $D_{КЗ} = 60$ мкг/м²/год, что хорошо сходится со средним потоком Pb от Финляндии на единицу её же площади, составляющим $D_{Ф} = 30$ мкг/м²/год [9]. Будем считать изучаемые территории достаточно близко расположенными к восточной границе Финляндии, чтобы распространить на них средние для территории Финляндии оценки потоков Pb. Примем за средний поток Pb от Финляндии вблизи середины этой границы $D_0 = 45$ мкг/м²/год (средний из $D_{КЗ}$ и $D_{Ф}$). Меридиональный градиент ТГП Pb можно считать пропорциональным градиенту потока Pb на поверхность (от всей Европы) вдоль восточной границы Финляндии (приблизительно 4:1 от южной точки до северной – по данным [8]). Считая этот поток приблизительно линейно убывающим вдоль границы с юга на север, получим ТГП Pb от Финляндии на юге равным $8/5D_0$ (72 мкг/м²/год), а на севере – $2/5D_0$ (18 мкг/м²/год). Можно предположить, что потоки Pb через атмосферу от ряда других стран Европы в районе середины восточной границы Финляндии будут пропорциональны их потокам на территорию Финляндии (табл. 1). Потоки в других частях этой границы можно оценить в предположении линейного убывания с юга на север. К сожалению, нельзя результаты оценок для Pb распространить на другие металлы – слишком разные распределения источников выбросов разных примесей в атмосферу.

Для анализа источников тяжелых металлов в воздухе изучаемого района используем подход, основанный на статистической обработке пространственного распределения траекторий переноса воздушных масс в этот район в течение 10 и более лет [3–5]. Расчеты проводились для трех точек (рис. 1): КЗ (Костомукшский заповедник), ББС (Беломорская

биологическая станция МГУ) и БМ (центр Белого моря). Обратные траектории переноса воздуха строились для каждого дня января, апреля, июля и октября на протяжении 10 лет (с 2000 по 2009 г.) с помощью модели HISPLYT 4 и данных реанализа полей метеорологических характеристик NOAA [7]. Изучались сезонные вариации средних распределений траекторий, считая результаты для каждого месяца представительными для соответствующего сезона (рис. 3). Одновременно та же модель рассчитывала количество осадков и высоту приземного слоя перемешивания вдоль траекторий движения воздуха. Затем рассчитывался перенос аэрозольных примесей от крупных промышленных регионов и предприятий к пунктам наблюдений, а также концентрации антропогенных загрязнений в воздухе и их выпадения на подстилающую поверхность, сезонные вариации и годовые показатели этих характеристик [3, 5]. На рис. 3 приведены диаграммы распределения по сторонам горизонта воздушных масс, поступающих к КЗ, ББС и БМ в разные месяцы. Это диаграммы направлений, где формируются воздушные массы, приходящие затем к пунктам наблюдений.

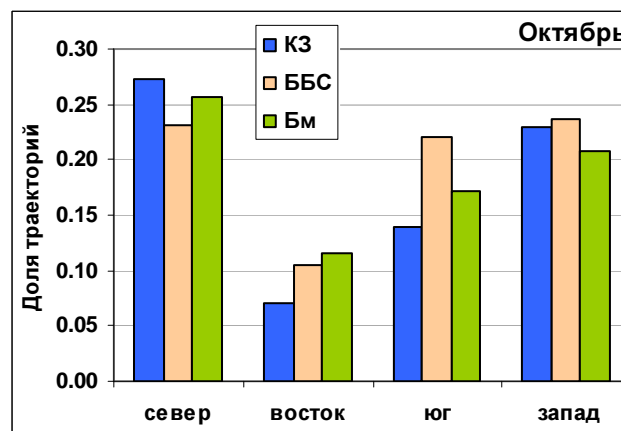
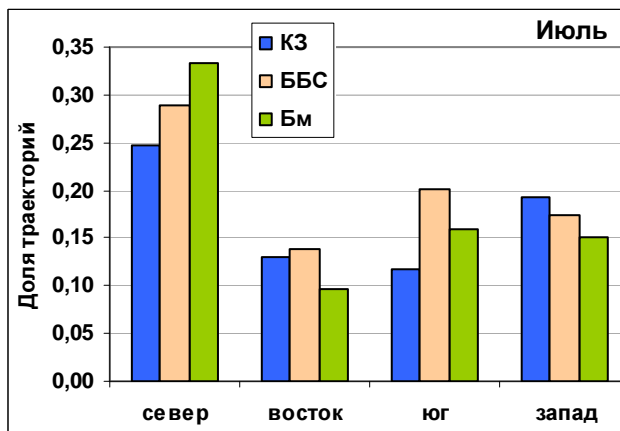
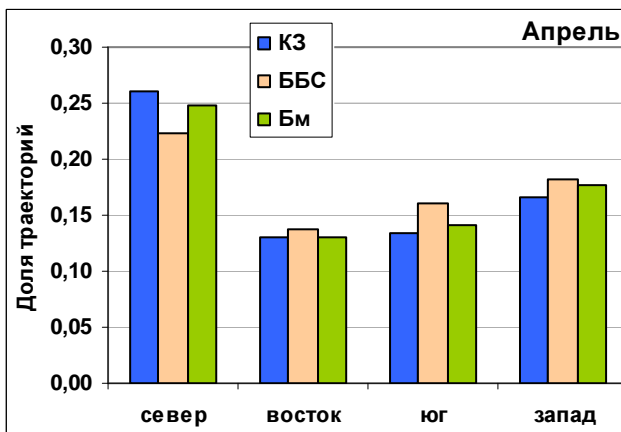
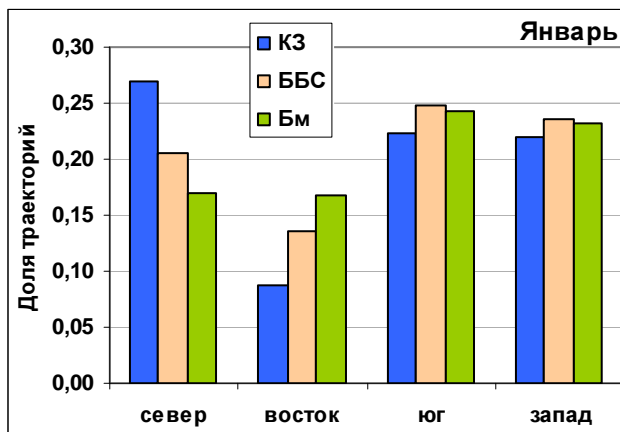


Рис. 3. Диаграммы пространственного распределения (по сторонам горизонта) воздушных масс, поступающих к КЗ, ББС и БМ в разные месяцы

Общие черты этих распределений для всех сезонов таковы: ко всем трем пунктам воздух чаще поступает с севера, реже всего – с востока; воздух с юга чаще поступает на ББС, чем на КЗ и БМ (особенно заметно это в июле и в октябре). Сезонные различия максимальны для зимы (январь) и лета (июль): частота переноса воздуха с севера для всех пунктов ниже в январе, чем в июле, а по мере мысленного смещения от одного пункта к другому в восточном направлении (КЗ→ББС→БМ) она убывает в январе (0,27-0,17) и возрастает (0,25-0,33) в июле; частота переноса с юга и с запада почти вдвое больше в январе, чем в июле. При известном преобладании западных ветров в северной части Евразии большую часть времени в рассматриваемый район поступает холодный и сухой воздух Арктики (север). Далее, в порядке убывания: теплый и влажный воздух из Атлантики (запад), а также теплые (юг) и холодные (восток) континентальные воздушные массы.

В табл. 2 показаны результаты оценок [3, 5] уровня антропогенного загрязнения вблизи рассматриваемых пунктов в результате атмосферного переноса некоторых примесей от ближайших крупных промышленных комплексов и регионов. Различия обусловлены разницей эмиссий и удаленности рассматриваемых источников. Повышенное загрязнение района ББС МГУ медью и никелем определяется близостью мощных источников этих элементов, расположенных на Кольском п-ве. Большое количество железа и алюминия в районе КЗ связано с близостью Костомукшского ГОК и его карьера.

Таблица 2. Средняя концентрация в приземном воздухе (С) и поток на поверхность за год (F) для некоторых антропогенных примесей в трех рассматриваемых пунктах – по данным [3, 5]

Примесь	Место	С, нг/м ³	F, мкг/м ² /год
Cu	КЗ	0.53	46
	ББС	4.5	610
	БМ	0.55	34
Ni	КЗ	0.24	18
	ББС	1.2	140
	БМ	0.22	15
Fe	КЗ	33.4	4100
	ББС	5.0	590
	БМ	0.67	37

Выводы. 1) Основная часть свинца, накапливающегося в эпифитных кустистых лишайниках Карелии, поступает в результате дальнего, в том числе трансграничного, атмосферного переноса. 2) Литогенные металлы (Al, Sc, Fe, U, Th, Ba) поступают в основном из локальных и региональных источников. 3) Вблизи Костомокши лишайники обогащены Fe и рядом литогенных элементов за счет поступления пыли, образующейся в результате работы Костомукшского ГОКа. 4) Одним из важных источников Cu и Ni, накапливающихся в лишайниках на северо-востоке Карелии, являются металлургические комбинаты, расположенные на Кольском полуострове.

Список литературы

1. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований / В. П. Шевченко, А. П. Лисицын, А. А. Виноградова [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2000. – Т. 13. – № 6–7. – С. 551–576.
2. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений: Экофизиологический подход к биомониторингу и биовосстановлению. – М.: ГЕОС, 2005. – 456 с.
3. Виноградова А. А. Дальний перенос воздушных масс и атмосферных аэрозолей в район Белого моря // Система Белого моря. Т. II. – М.: Научный мир, 2012. – В печати.
4. Виноградова А. А. Антропогенное загрязнение природных сред в районе Костомукшского заповедника (Карелия) при дальнем переносе аэрозольных примесей в атмосфере / А. А. Виноградова, Ю. А. Иванова // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 6. – С. 493–501.
5. Виноградова А. А. Загрязнение окружающей среды в центральной Карелии при дальнем переносе антропогенных примесей в атмосфере / А. А. Виноградова, Ю. А. Иванова // Изв. РАН. Сер. Географическая. – 2012. – В печати.
6. Шевченко В. П. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ / В. П. Шевченко, Д. П. Стародымова, С. А. Кутенков [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 3; URL: www.science-education.ru/97-4692.
7. Draxler R. R. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY / R. R. Draxler, G. D. Rolph. – 2003. – <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>.
8. Heavy metal emissions, depositions, critical loads and exceedances in Europe / J. P. Hettelingh, J. Sliggers, M. van het Bolcher [et al.] // Report of the Directorate for Climate Change and Industry, Dutch ministry of VROM, 2006 (also available from www.mnr.nl/cce).

9. Heavy metals: transboundary pollution of the environment / I. Ilyin, O. Rozovskaya, O. Travnikov, W. Aas // EMEP Status Report 2/2007. June 2007. – 85 p.
10. Rudnick R. L. Composition of the Continental Crust / R. L. Rudnick, S. Gao // Treatise on Geochemistry. – V. 3. The Crust. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – P. 1–64.

Авторы благодарны сотрудникам заповедника “Костомукшский”, ББС МГУ за поддержку, М. П. Журбенко, Д. Ю. Сапожникову, В. В. Гордееву, Л. Л. Деминой, Ю. А. Ивановой за участие в аналитической обработке проб, Лаборатории ARL NOAA за предоставление возможности использовать модель HYSPLIT для расчета траекторий движения воздушных масс. Работа выполнена в рамках реализации ФЦП “Кадры” при финансовой поддержке Программы 23 Президиума РАН и РФФИ (грант 11-05-00300).

Рецензенты:

Гинзбург А. С., д.ф.-м.н., заместитель директора ФГБУН Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва.

Доманов М. М., д.г.н., ведущий научный сотрудник ФГБУН Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва.