

УДК 582.29:631.42:504.5:550.4 (470.21)

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАЗЛИЧИЯ В АККУМУЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТАЛЛОМАМИ ЛИШАЙНИКА *CLADONIA RANGIFERINA* L. НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА «ПАСВИК»

В. В. Елсаков¹, А. Б. Новаковский¹, Н. В. Поликарпова²

¹ Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Сыктывкар, Россия

² Государственный природный заповедник «Пасвик», Раякоски Мурманской обл., Россия

Выполнен сравнительный анализ содержания тяжелых металлов (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Mn, Fe, Hg) и As в талломах кладонии оленьей *Cladonia rangiferina* L. в границах государственного природного заповедника «Пасвик» и его окрестностях (Мурманская область). Показано, что среди факторов, влияющих на аккумуляцию элементов, наиболее значимым является удаленность от производственных объектов цветной металлургии (промышленных площадок АО «Кольская ГМК» ПАО «Норникель»). Зависимость хорошо аппроксимирует выявленная экспоненциальная функция. Рассмотренные элементы разделены на две группы: 1) присутствующие в выбросах комбината и имеющие выраженный пространственный градиент на территории заповедника и в окрестностях (Cr, Fe, Co, Cu, Ni, Cd, Pb, As); 2) не имеющие явных закономерностей в распределении и зависящие от «фоновых» значений (Zn, Mn и Hg). Концентрации элементов-загрязнителей первой группы в талломах лишайника уменьшаются с интенсивностью 2–5 % на каждый километр удаления от источника эмиссии. Содержание большинства элементов значимо ($p < 0,05$) связано. Исключением является Mn, содержание которого ингибируется ростом концентраций других металлов, прежде всего Pb, Fe, Co. Для территории заповедника и его окрестностей образцы из наиболее удаленных от источников эмиссии участков с минимальными показателями содержания Ni, Cu, Co и Cd превышали «фоновые» величины, полученные для тундровых сообществ смежных регионов (Канинская тундра). В сравнении с сосудистыми растениями территориально сопряженных участков лишайники аккумулируют более высокие концентрации основных загрязнителей: Ni, Cu, Co и Fe. Для территории заповедника построены изоплеты распределения потенциальных концентраций элементов в талломах. На примере территории заповедника «Пасвик» показано, что компоненты природных сред в пределах границ отдельных особо охраняемых природных территорий в настоящее время не могут считаться геохимическими эталонами экосистем по содержанию некоторых поллютантов в связи с близостью расположения к промышленным объектам, а также наличием региональных переносов.

Ключевые слова: элементы-загрязнители; кустистые напочвенные лишайники; пространственное моделирование; Мурманская область.

V. V. Elsakov, A. B. Novakovskiy, N. V. Polikarpova. SPATIAL DIFFERENCES IN THE ACCUMULATION OF ELEMENTS BY THE LICHEN *CLADONIA RANGIFERINA* L. IN THE PASVIK NATURE RESERVE

A comparative analysis of the content of heavy metals (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Mn, Fe, Hg) and As in thalli of *Cladonia rangiferina* L. was carried out for the Pasvik Strict

Nature Reserve and its surroundings (the Murmansk Region). The most significant factor influencing the accumulation of elements is the distance to non-ferrous metal industry facilities (industrial sites of the Kola Mining and Metallurgic Company (Kola MMC) of the Norilsk Nickel Holding). The exponential function proved to be well fit for this dependence. The elements fall into two groups: 1) elements present in the plant's emissions and having a pronounced spatial gradient in the nature reserve and its surroundings (Cr, Fe, Co, Cu, Ni, Cd, Pb, As), and 2) elements which have no clear patterns in the distribution and depend on the "background" values (Zn, Mn and Hg). The concentrations of group 1 pollutants in the lichen decreased at a rate of 2–5 % for each kilometer of distance from the source of emissions. The content of most of the elements significantly ($p < 0.05$) correlated with each other. The exception was Mn, whose content was inhibited by an increase in the concentrations of other metals (primarily Pb, Fe, Co). Even samples with the lowest Ni, Cu, Co and Cd content from the sites furthest away from the source in the Pasvik Reserve and its surroundings had the elements concentrations higher than the environmental "background" for adjacent tundra communities (Kanin tundra, Nenets Autonomous District). Lichens of the Pasvik Reserve accumulate higher concentrations of the main pollutants (Ni, Cu, Co and Fe) than vascular plants in the same territory. Graphic isopleths of the distribution of potential contaminant concentrations in lichen thalli were plotted for the territory of the reserve. The Pasvik Nature Reserve was used as the example to demonstrate that, at present, ecosystem components within protected areas cannot be regarded as geochemical standards for the regional environment due the regional atmospheric transfers from nearby industrial facilities.

Keywords: chemical pollutants; fruticose epigeous lichens; spatial modeling; Murmansk Region.

Введение

Лишайники являются эдификаторами многих растительных сообществ северных фитоценозов. Общеизвестна [Подкорытов, 1967; Загороднева и др., 1988; Хренов, 1993; Grodzinska et al., 1993; Бязров, 2002 и др.] высокая чувствительность данной группы организмов к различным формам антропогенного воздействия и сорбирующая способность талломов в отношении ряда химических элементов, в том числе тяжелых металлов (ТМ). Отсутствие у талломов специализированных органов поглощения элементов из почвы, их пассивная аккумуляция из атмосферных выпадений и продолжительный период жизни позволяют привлекать лишайники в качестве организмов-индикаторов содержания минеральных элементов – поллютантов. Талломы аборигенных видов лишайников могут быть использованы для выявления градиентов распространения элементов от источников эмиссии воздушным путем на региональном уровне и в анализе дальних, в т. ч. трансграничных, переносов.

Различия, связанные с механизмом накопления талломами элементов: улавливание твердых частиц, концентрирующихся на поверхности и в межклеточных пространствах, экстрацеллюлярное связывание с обменными центрами на клеточных стенках симбионтов (преимущественно Pb, Cd), интрацеллюлярное (Zn) поглощение [Михайлова, Шарунова, 2008],

позволяют установить возможные источники эмиссии. Отмечено, что разные лишайники неодинаково накапливают ТМ, распределение элементов в талломах может быть неравномерным [Бязров, Пельгунова, 2016].

Играя роль основы рациона для северного оленя в зимний период, лишайники служат источником поступления загрязнителей в трофические цепи. С 2014 г. службами Россельхознадзора по Мурманской области отмечены регулярные превышения уровня загрязнения оленьих субпродуктов: Cd в 4–5 раз, Hg в 2–3 раза, реже фиксируется рост содержания Pb [Елсаков, Макаркин, 2016]. Сходные тренды отмечены и на сельхозпредприятиях всего Европейского Севера России [О высокой...]. Наиболее вероятная причина накопления токсичных элементов связана с промышленными выбросами, следствием которых является загрязнение кормовой базы животных. В экосистемах бореальных и арктических широт содержание ТМ в талломах определяется как «фоновыми» значениями, уровень которых складывается из естественной концентрации элементов в биогеоценозе, так и их увеличением за счет поступления загрязняющих веществ от промышленных источников. Вблизи источников атмосферных выпадений состав лишайников определен поставкой химических элементов из атмосферы [Шевченко и др., 2006]. В результате особенностей регионального и межрегионального воздушного перене-

са загрязнителей отмечено превышение ПДК для целого ряда ТМ не только в непосредственной близости от промышленных предприятий, но и в границах особо охраняемых природных территорий (ООПТ) [Ларионова, 2004]. Данное обстоятельство существенно затрудняет разработку региональных фоновых и санитарных показателей и районирование антропогенной нагрузки на компоненты малонарушенных экосистем.

Cladonia rangiferina L. – доминирующий в напочвенном покрове фитоценозов Крайнего Севера лишайник, обладающий широкой эвритопностью, формирующий основные запасы кормов для оленеводства на зимних пастбищах [Андреев и др., 1935; Дедов, 2006]. На территории заповедника «Пасвик» дикий северный олень (*Rangifer tarandus* L.) не обитает, оленеводство как вид хозяйственной деятельности законодательно запрещено, однако из сопредельных районов Норвегии на российскую сторону долины реки Паз домашние северные олени регулярно заходят.

Цель настоящей работы состояла в выявлении закономерностей пространственного распределения концентраций ТМ и As в талломах *C. rangiferina* в градиенте удаления от источника эмиссии на территории заповедника «Пасвик» и в его окрестностях (близ пос. Раякоски и Янискоски). После выполнения комплекса полевых работ и химико-аналитических исследований лишайников выявлены диапазоны варьирования содержания элементов в талломах и установлены корреляции между величинами концентраций аккумулированных ТМ и As; рассчитаны потенциально возможные пределы их накопления талломами для территории заповедника; разработаны пространственные модели распределения показателей содержания ТМ для анализа региональных и межрегиональных маршрутов переноса поллютантов.

Материалы и методы

Сбор образцов лишайников выполнен в лесных, болотных (грядово-мочажинные комплексы) и горно-тундровых фитоценозах на территории государственного природного заповедника «Пасвик» и в его окрестностях на крайнем северо-западе Мурманской области на границе с Норвегией (создан в 1992 г., площадь 14,7 тыс. га). Согласно геоботаническому районированию европейской части России (1989) территория заповедника входит в состав Лотто-Тулумского округа полосы северотаежных лесов Кольско-Карельской подпровинции

североевропейской таежной провинции Евразийской таежной области.

Сбор образцов проводили в пределах участков: окр. Глухой плотины и басс. р. Мениккайоки (12–15 августа 2014 г.), окр. г. Калкупя (15–18 августа 2014 г.) и окр. пос. Раякоски и Янискоски (сборы О. А. Макаровой, июнь 2015 г.) (рис. 1). Талломы лишайника *Cladonia rangiferina*, иногда с незначительной примесью *Cladonia arbuscula*, часто образующие плохоразделимые смешанные подушки, собраны из 19 разных фитоценозов (16 лесных, 2 горно-тундровых и 1 болотный). Отбор проб растительного материала, их подготовку для количественного химического анализа проводили с участков площадью 20×20 см, в соответствии с нормативными документами [Методические..., 1992; ГОСТ..., 2002]. При выполнении пробоподготовки разделяли состав лишайниковых синузид, оставляя для анализа однородный образец. Для выполнения химико-аналитических исследований использовали верхушечные части таллома, нижние, визуально отмершие участки отделяли от живых и в дальнейшем не использовали. По количеству ответвлений подециев от основной оси возраст талломов в среднем оценен в 10–15 лет.

Образцы талломов доводили до воздушно-сухого состояния и размалывали. Пробоподготовку образцов (0,5 г сухого веса) выполняли без озоления в системе микроволнового вскрытия «Минотавр-2» («Люмэкс») при давлении 8 атм. и температуре более 100 °С (методика ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98) с добавлением 10 мл HNO₃ (конц.) и H₂O₂ (1 мл). Анализ элементов (Cu, Pb, Cd, Zn, Ni, Co, Mn, Fe, As) выполняли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС ИСП, ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 (ФР.1.31.2006.02149), ртути – методом атомно-абсорбционной спектроскопии на основе эффекта Зеемана (М 04-46-2007 (ФР.1.31.2007.03904)) в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

По результатам аналитических исследований разработана пространственная модель переноса и распределения ТМ в напочвенном лишайниковом покрове с учетом отдельных факторов, среди которых в качестве основных выбраны:

- удаленность от источников эмиссии (пром-площадка «Никель» АО «Кольская ГМК» ПАО «Норникель»);
- принадлежность модельного участка к разным фитоценозам. В ходе выполнения полевых работ для территории заповедника подготовлена карта распределения домини-

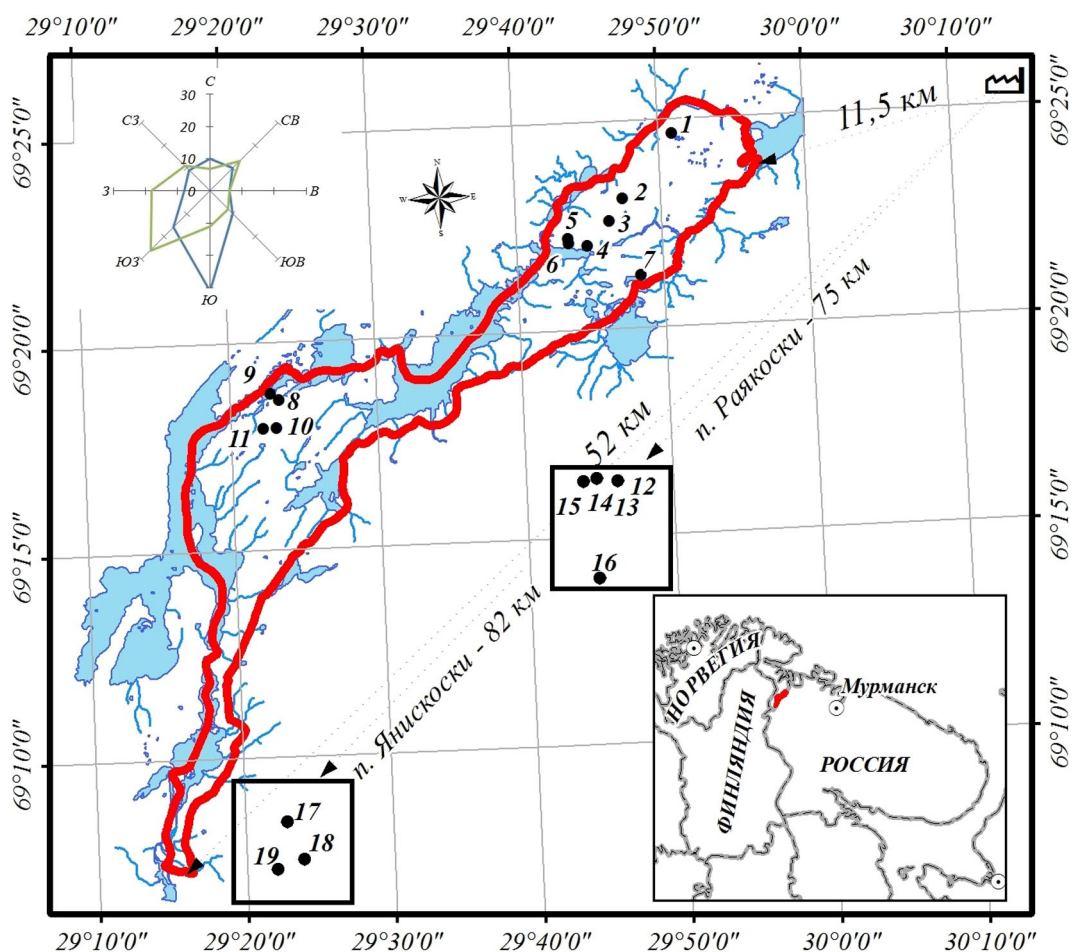


Рис. 1. Местоположение участков отбора образцов в границах заповедника «Пасвик» (участки: окр. Глухой плотины и басс. р. Мениккайоки (1–7), окр. г. Калкупя (8–11), окр. пос. Раякоски (12–16) и Янискоски (17–19)). Отмечена удаленность от комбината АО «Кольская ГМК» ПАО «Норникель» в пгт. Никель. Показана годовая роза ветров (%) для участков Никель (синий) и пос. Янискоски (зеленый)

Fig. 1. Location of the sampling sites within the Pasvik Reserve (sites: near the Glukhaya Plotina and the Menikkajoki River basin (1–7), near the Kalkupya Mountain (8–11), near the Rajakoski (12–16) and Janiskoski (17–19) villages). The distance from the Kola MMC plant in Nickel is marked. The annual rose of winds (%) is shown for the sites of Nickel (blue) and Janiskoski (green)

рующих классов растительности [Елсаков, Поликарпова, 2015];

- положение участков сбора в рельефе (экспозиция склонов и углы наклона, высота над уровнем моря) по цифровой модели рельефа SRTM. Перепад высот участков составляет от 30 до 323 м н. у. м., экспозиции склонов достаточно равномерно охватывают все направления.

Ближайшая точка отбора проб расположена в 15,3 км, наиболее удаленная – в 80 км от источника эмиссии. Выбор промплощадки «Никель» АО «Кольская ГМК» в качестве источника эмиссии элементов обусловлен опубликованными ранее исследованиями [Щербенко и др., 2008; Ежов, 2011; Кузьменкова и др., 2015; Сухарева, 2016], показавшими, что растительный

покров в 15-километровой зоне влияния источника техногенного загрязнения – предприятия цветной металлургии в пгт. Никель – испытывает дополнительный приток минеральных веществ, в том числе ТМ, в количествах, значительно превышающих санитарные показатели. Отмечено поступление основных элементов-загрязнителей (Ni, Cu) и сопутствующих (Cd, Pb), обладающих высокой токсичностью [Щербенко и др., 2008]. Не следует исключать роль глобального трансграничного переноса воздушных масс, дополнительно привносящих минеральные элементы, в т. ч. ТМ. Непосредственно примыкающие к промплощадке АО «Кольская ГМК» участки характеризуются выпадением напочвенных лишайников из фитоценозов. Так, на спутниковых изображениях

ях высокого разрешения Landsat наблюдается формирование участков протяженностью до 7,5 км от источника эмиссии с устойчивым снижением проективного покрытия напочвенных лишайников [Елсаков, Поликарпова, 2015].

Математическую модель распределения содержания ТМ в талломах лишайников строили на основе нелинейного регрессионного анализа. Выбор формы регрессионного уравнения определяли на основе стандартных статистических критериев согласия модели (F – критерий Фишера, R^2 – доля объясненной дисперсии). Расчет коэффициентов корреляции, оценка статистических параметров и построение модели проводились в пакете IBM SPSS Statistic 19.

Результаты и обсуждение

Среди выделяемых в научной печати основных компонентов атмосферных выбросов комбината АО «Кольская ГМК» отмечены SO_2 , Ni, Cu. Несмотря на модернизацию производства и снижение выбросов SO_2 в 2,5 раза (с 1990 по 2011 г.), здесь по-прежнему сохраняются высокие объемы эмиссии ТМ (примерно 150–200 т/год для Cu и 300–350 т/год для Ni) [Сухарева, 2016]. По данным метеостанций «Никель» и «Янискоски», в долине реки Паз, включая территорию заповедника «Пасвик», в течение года преобладают ветры южного и юго-западного направлений (рис. 1).

Зольность лишайников ниже, чем растений, и в большинстве случаев не превышает 1 % [Табаленкова и др., 2016]. Значения содержания элементов в талломах лишайников на участках сбора образцов на территории заповедника и к юго-западу от него представлены в таблице 1. По усредненному содержанию исследованные элементы представлены в виде ряда (по убыванию концентрации): Fe → Ni → Mn → Cu → Zn → Co → Cr → Pb → As → Cd → Hg. Для территории заповедника и его окрестностей образцы из наиболее удаленных от источников эмиссии участков с минимальными показателями содержания Ni, Cu, Co и Cd превышали «фоновые» концентрации элементов, полученные для тундровых сообществ смежных регионов (Канинская тундра, Ненецкий автономный округ) [Наземное..., 2014].

Диапазоны варьирования концентраций элементов у лишайников из разных участков (величина, характеризующая коэффициентом вариации показателя C_v , %), различны, что использовано для выделения нескольких групп загрязнителей: 1) элементы (Hg, Zn

и Cr), содержание которых варьирует в меньшей степени (C_v ниже 30 %), их содержание определяется преимущественно природными факторами, равномерно действующими на всей территории заповедника, и приближено к «фоновым» показателям; 2) элементы (Cd, Pb и Mn) со средними значениями коэффициента вариации (C_v от 30 до 60 %), на диапазон варьирования показателя влияют сборы из отдельных участков с высоким содержанием элементов; 3) элементы (Fe, Co, Ni, Cu и As), существенно варьирующие по концентрациям (C_v выше 60 %), их содержание существенно возрастает при приближении к источникам эмиссии.

Анализ установленных корреляций между концентрациями элементов (табл. 2) показал, что наиболее высокие значимые связи ($r > 0,9$; $p < 0,001$) прослеживаются в отношении элементов Ni, Cu, Co и As. Выявленная зависимость обусловлена тесной связью с расстоянием от источника загрязнения. Установлена отрицательная связь между содержанием Mn и других ТМ (прежде всего Pb, Fe и Co). Ингибирование аккумуляции Mn под влиянием роста концентраций катионов других ТМ отмечено и в отношении сосудистых растений [Ежов, 2011].

Выполнение статистического анализа связей выделенных групп факторов и концентраций элементов показало, что причиной, влияющей на аккумуляцию ТМ в талломах лишайников, является расстояние до АО «Кольская ГМК» (рис. 2). Остальные факторы оказались незначимыми (табл. 3) и не могут быть включены в результирующую модель. Приуроченность лишайников к различным фитоценозам территории (лесным, горно-тундровым, болотным) не оказывала влияния на накопление элементов, что подтверждает основной источник их поступления из атмосферных выпадений (рис. 2).

Наилучшая аппроксимация достигается при использовании экспоненциальной функции вида:

$$y = e^{a+bx}, \quad (1),$$

где a , b – коэффициенты модели, e^a – начальная концентрация элемента в точке с минимальным удалением от источника загрязнения, b – скорость убывания концентрации с расстоянием, x – расстояние до источника загрязнения, y – результирующая концентрация.

Полученные модели подтверждены данными других исследований по содержанию элементов в различных растениях и лишайниках [Ежов, 2011], выполненных в градиентах удаленности

Таблица 1. Средние показатели содержания тяжелых металлов и As в талломах *Cladonia rangiferina*
 Table 1. Average values of heavy metal contents and As in the *Cladonia rangiferina* thalli

	Fe, мг/кг mg/kg	Ni, мг/кг mg/kg	Cu, мг/кг mg/kg	Mn, мг/кг mg/kg	Zn, мг/кг mg/kg	Co, мг/кг mg/kg	Cr, мг/кг mg/kg	Pb, мг/кг mg/kg	As, мг/кг mg/kg	Cd, мг/кг mg/kg	Hg, мкг/кг mcg/kg
мин min	74	9,0	5,1	10,0	9,3	0,3	1,5	0,5	0,1	0,1	14,0
макс max	930	160,0	109,0	120,0	19,0	6,4	2,9	3,3	1,7	0,3	46,0
среднее average	417	65,2	44,4	55,2	14,6	2,3	2,3	1,5	0,7	0,2	27,0
ст. откл. standard deviation	279	55,1	39,3	32,4	3,3	2,1	0,5	0,7	0,6	0,1	8,0
Cv (%)	66,9	84,5	88,5	58,7	22,6	91,3	21,7	46,7	85,7	50,0	29,6
n, проб n, samples	19	19	19	19	19	19	11	19	19	19	15
заповедник «Пасвик» Pasvik Reserve											
п-ов Канин, фон (n=5)* Kanin Peninsula, intact territory											
мин min	87,0	1,1	1,37	24,0	9,5	<0,1	-	0,79	0,1	<0,08	<18

Примечание. *Для сравнения приведены показатели минимального содержания элементов в талломах *Cladonia rangiferina* из тундровых фитоценозов п-ова Канин [Наземное..., 2014]. Прочерк – нет данных.

Note. *The minimum content of elements in the *Cladonia rangiferina* thalli from the tundra phytocenoses of the Kanin Peninsula are given for comparison [Nazemное..., 2014]. «-» – data are not available.

Таблица 2. Корреляции между содержанием тяжелых металлов и As в талломах *Cladonia rangiferina* заповедника «Пасвик»

Table 2. Correlations between the heavy metal contents and As in the *Cladonia rangiferina* thalli in the Pasvik Reserve

	Pb	Cd	Zn	Ni	Co	Mn	Fe	As	Hg	Cr
Cu	0,83***	0,84***	0,59**	0,99***	0,98***	-0,41	0,78***	0,94***	0,31	0,90**
Pb		0,64**	0,13	0,85***	0,87***	-0,57*	0,78***	0,76***	0,00	0,58
Cd			0,47*	0,85***	0,83***	-0,41	0,65**	0,84***	0,05	0,70
Zn				0,56*	0,51*	0,23	0,41	0,59**	0,66**	0,79*
Ni					0,99***	-0,46*	0,84***	0,95***	0,30	0,96***
Co						-0,49*	0,82***	0,93***	0,31	0,99***
Mn							-0,50*	-0,45	0,11	0,05
Fe								0,74***	0,18	0,99***
As									0,30	0,89**
Hg										0,95**

Примечание. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Note. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Таблица 3. Описание моделей содержания загрязнителей в талломах *Cladonia rangiferina* в зависимости от рельефа и расстояния до источника загрязнения

Table 3. Description of the model of pollutants content in the *Cladonia rangiferina* thalli depending on the relief and the distance to the pollution source

	Fe	Ni	Cu	Mn	Zn	Co	Cr	Pb	As	Cd	Hg
свободный член (коэф. a в (1)) constant	6,86*	5,53*	5,29*	3,11*	2,64*	2,27*	1,39	1,14*	1,00*	-1,34*	2,95*
высота н. у. м. altitude	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
угол наклона slope	-0,04	-0,01	0,00	0,06	0,01	-0,01	0,08	-0,01	-0,03	-0,01	0,06
экспозиция exposition	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
расстояние (коэф. b в (1)) distance	-0,02*	-0,04*	-0,05*	0,02	0,00	-0,04*	-0,03	-0,02*	-0,04*	-0,01*	0,00
R^2	0,65	0,94	0,95	0,29	0,41	0,95	0,88	0,72	0,92	0,59	0,36
F	6,51	59,64	74,24	1,41	2,10	70,23	3,69	8,97	41,31	4,96	1,41
p	0,004	0,000	0,000	0,280	0,143	0,000	0,224	0,001	0,000	0,011	0,301

Примечание. *Коэффициент регрессии является значимым на уровне $p < 0,01$. R^2 – общая доля дисперсии, объясненная моделью; F – значение критерия Фишера; p – уровень значимости модели в целом.

Note. *The regression coefficient is significant at $p < 0,01$. R^2 – the total proportion of variance explained by the model; F – F -test; p – significance level of the model.

от комбината (рис. 2). Для исследованных указанных автором образцов лишайника отмечено снижение содержания Ni с 88,3 мг/кг (удаленность 12 км от участков эмиссии) до 21,7 мг/кг (85 км), Cu с 95,9 до 11,1 мг/кг соответственно. Незначительное снижение величин концентраций при приближении к источнику эмиссии, в сравнении с нашими результатами, вероятно, связано с отличающимся видовым составом лишайниковых синузий. Сосудистые растения (черника *Vaccinium myrtillus* и береза пушистая *Betula pubescens*) демонстрировали значения Co, Cu, Ni и Fe существенно ниже, чем в талломах лишайников.

По выявленной пространственной приуроченности концентраций все рассмотренные элементы разделены на две группы:

- имеющие пространственную зависимость распределения на градиенте удаленности от комбината;
- проявляющие отсутствие статистически значимых закономерностей в пространственном распределении показателя.

Максимальное содержание элементов первой группы (Cr, Fe, Co, Cu, Ni, Cd, Pb, As) достигается в северной части заповедника «Пасвик», к югу их содержание заметно снижается. В среднем концентрации загрязнителей в тал-

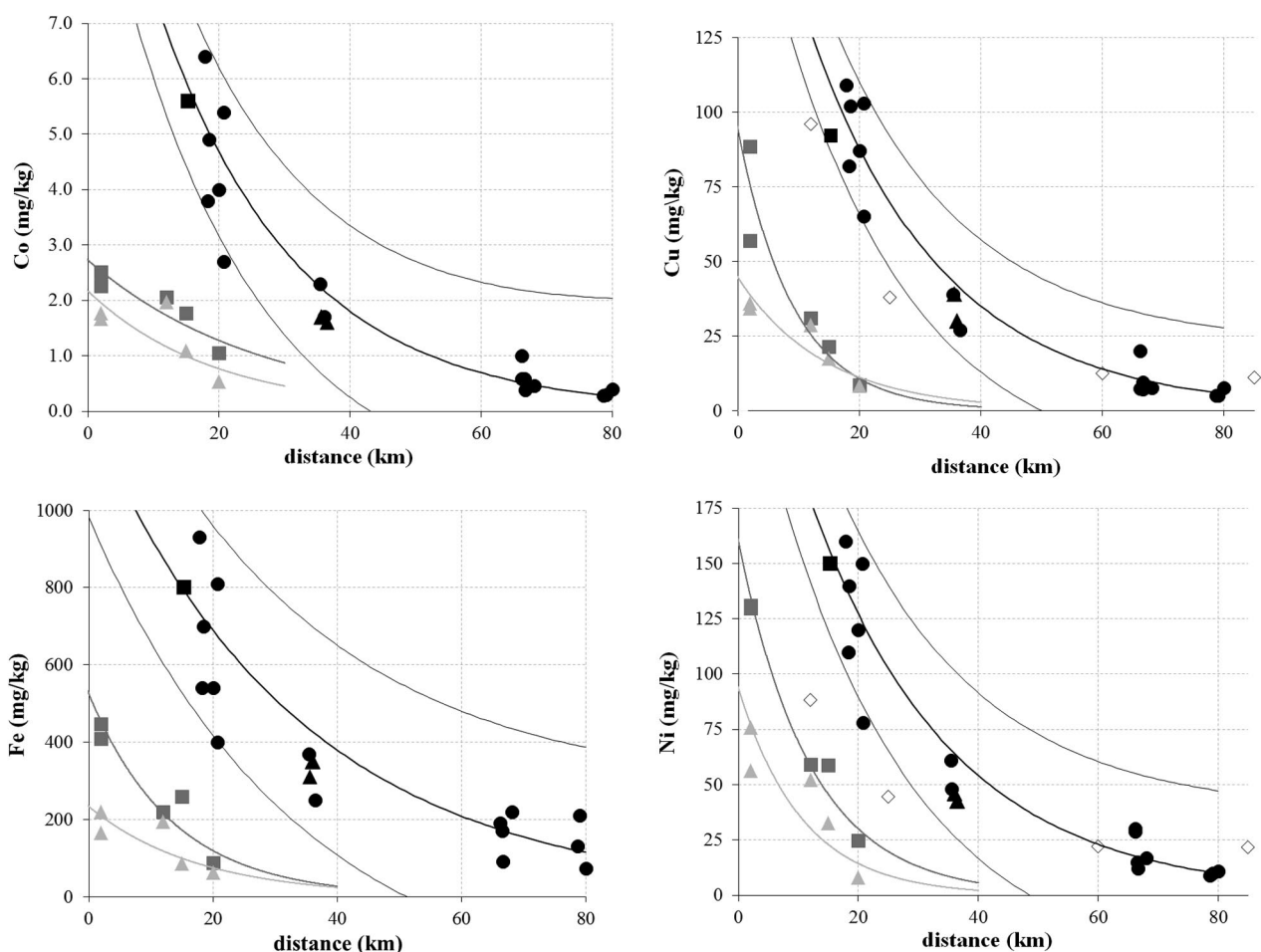


Рис. 2. Зависимость концентрации некоторых элементов-загрязнителей в талломах *Cladonia rangiferina* от расстояния до промплощадки в Никеле АО «Кольская ГМК» ПАО «Норникель». Представлены значения концентраций, центральная линия – аппроксимирующая экспонента, верхняя и нижняя линии – интервал прогнозирования ($p = 0,95$). Для сравнения представлены значения концентраций, полученные сотрудниками заповедника для листьев березы пушистой (◻) и черники (▲). Отмечены значения для талломов напочвенных кустистых лишайников (◻) [по: Ежов, 2011]. Классы различных фитоценозов: лесные (●), горно-тундровые (▲), болотные (■)

Fig. 2. Dependence of the some pollutants concentration in the *Cladonia rangiferina* thalli on the distance from the Kola MMC plant in Nikel. The concentration values are presented, the central line is the approximating exponent, the upper and lower lines are the prediction interval ($p = 0.95$). For comparison, the concentration values for birch leaves (◻) and blueberry (▲) are presented. The values for thalli of ground bushy lichens (◻) are given after [Ezhov, 2011]. Classes of different vegetation types are marked: forest (●), mountain-tundra (▲), mire (■)

ломах лишайника уменьшаются с интенсивностью 2–5 % значений показателя на каждый километр (рис. 3).

Элементы второй группы (Zn, Mn, Hg) не показали значимого изменения концентрации при продвижении с севера на юг, не зависят от удаленности от источника загрязнения (незначимые регрессионные коэффициенты, низкие значения детерминации модели R^2). Содержание ТМ находится в концентрациях, близких к природным фоновым значениям, а их присутствие в аэротехногенных выбросах на промплощадке АО «Кольская ГМК» в Никеле минимально.

На основании полученных зависимостей для территории заповедника «Пасвик» построено растровое изображение с размером ячейки 30×30 м, для каждой ячейки рассчитано значение возможного содержания элементов (потенциальная аккумуляция элементов, ПАЭ) с последующим построением изоплет теоретического содержания ТМ в талломах лишайников (рис. 3).

Заключение

Выявлены особенности пространственного распределения элементов-загрязнителей

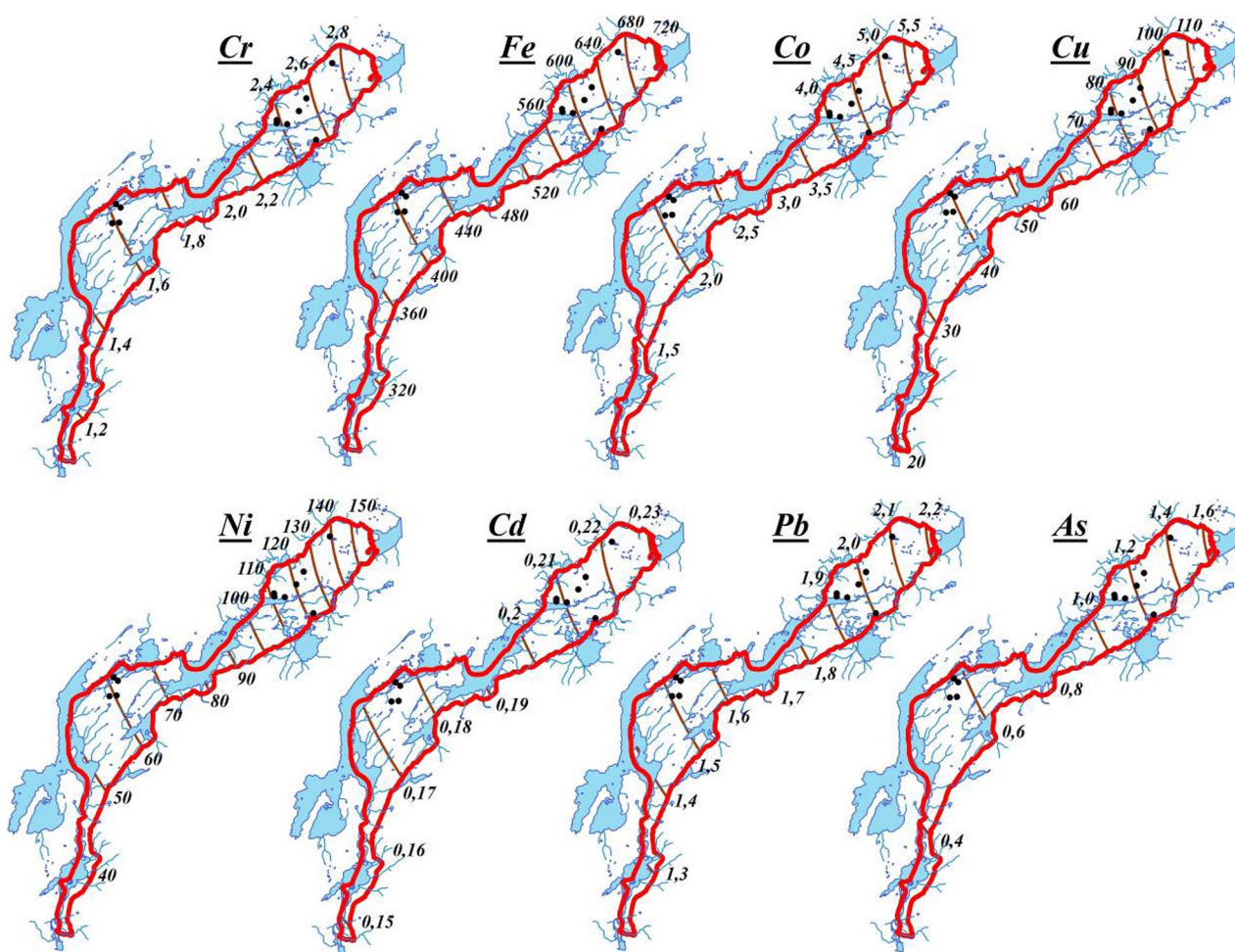


Рис. 3. Изоплеты аккумуляции элементов-загрязнителей в талломах *Cladonia rangiferina* в заповеднике «Пасвик» (мг/кг)

Fig. 3. Isoleths of accumulation of pollutant elements in the *Cladonia rangiferina* thalli in the Pasvik Reserve (mg/kg)

в талломах напочвенного лишайника *Cladonia rangiferina* на крайнем северо-западе Мурманской области в заповеднике «Пасвик» и прилегающих южных участках (окр. пос. Раякоски и Янискоски). По изменениям концентрации элементов в пространстве и установленным коэффициентам вариации между ними ТМ могут быть объединены в группы: 1) зависящие от удаленности от источника промышленных выбросов (Cr, Fe, Co, Cu, Ni, Cd, Pb, As) и 2) не зависящие от таковой (Zn, Mn, Hg). Для территории заповедника «Пасвик» важным предиктором содержания ТМ в талломах напочвенных лишайников является их поступление от АО «Кольская ГМК». Содержание ряда элементов превышает фоновые значения на всем протяжении территории заповедника: в сравнении с европейским северо-востоком России они превышают показатели для Ni (9 раз), Cu (5 раз), Co (2–3 раза) [Елсаков, Макаркин, 2016]. Построенная модель позволяет выпол-

нить анализ потенциального содержания элементов в талломах лишайника *Cladonia rangiferina* в любом фитоценозе и на прилегающих к заповеднику территориях.

На примере заповедника «Пасвик» показано, что компоненты природных сред особо охраняемых природных территорий в настоящее время не могут считаться геохимическими эталонами экосистем по содержанию загрязнителей в связи с близостью расположения к промышленным объектам и наличием дальних (глобальных) и региональных переносов. Начатые исследования актуально продолжить в направлении кросс-анализа содержания загрязнителей в различных компонентах экосистем: почвах, грибах, лишайниках и растениях разных жизненных форм.

Авторы благодарят сотрудников Государственного природного заповедника «Пасвик» за помощь, оказанную при проведении поле-

вых работ, выполнение отбора образцов; сотрудников экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН за выполнение анализа химического состава талломоов.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН 2018–2020 гг. Подпрограмма Арктика. Проект № 18-9-4-5.

Литература

Андреев В. Н. Растительность и природные районы восточной части Большеземельской тундры // Труды Полярной комиссии. М.; Л.: АН СССР, 1935. Вып. 22. 97 с.

Бязров Л. Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.

Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Состав и соотношение химических элементов на разных по высоте поверхностях подстилки ягельного лишайника *Cladonia rangiferina* // Принципы экологии. 2016. № 2. С. 27–42. doi: 10.15393/j1.art.2016.4983

ГОСТ Р 51419-99 (ИСО 6498-98) «Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Подготовка испытуемых проб». М.: Госстандарт России, 2002. 8 с.

Дедов А. А. Растительность Малоземельской и Тиманской тундр. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2006. 160 с.

Ежов А. Ю. Тяжелые металлы в растительном покрове северо-запада Кольского полуострова // Преподаватель XXI век. 2011. № 1. С. 221–226.

Елсаков В. В., Макаркин В. П. Контаминанты в продуктах оленеводства хозяйств Республики Коми: анализ источников поступления // Решение актуальных проблем продовольственной безопасности Крайнего Севера: Сб. статей, посв. 90-летию создания Мурман. гос. сельскохозяйственной опытной станции. Мурманск: МАГУ, 2016. С. 58–62.

Елсаков В. В., Поликарпова Н. В. Спутниковые методы в анализе изменений запаса лишайников в фитоценозах заповедника «Пасвик» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 87–97.

Загороднева И. М., Михайлов Н. Г., Полежаев А. Н., Картузова Л. Т. Микроэлементный состав кормовых лишайников лесотундровой зоны Магаданской области // Кормовая база и продуктивность северных оленей. Новосибирск: СО РАН, 1988. С. 78–80.

Кузьменкова Н. В., Кошелева Н. Е., Асадулин Э. Э. Тяжелые металлы в почвах и лишайниках тундровой и лесотундровой зон (северо-запад Кольского полуострова) // Почвоведение. 2015. № 2. С. 244–256. doi: 10.7868/S0032180X14100062

Ларионова Е. А. Тяжелые металлы в горно-таежных ландшафтах: на примере заповедников «Басеги» и «Вишерский»: дис. ... канд. геогр. наук. Пермь, 2004. 158 с.

Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 63 с.

Михайлова И. Н., Шарунова И. П. Динамика аккумуляции тяжелых металлов в талломах эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes* // Экология. 2008. № 5. С. 366–372.

Наземное геоботаническое обследование земельных участков, арендуемых СПК община «Канин», для целей северного оленеводства. Отчет по теме договора № 37-2014 / Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. 2014. 82 с.

О высокой концентрации диоксинов, полихлорированных бифенилов, кадмия и ртути в печени северных оленей с Кольского полуострова [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fsvps.ru/fsvps/news/ld/150574.html> [дата обращения: 20.04.2017].

Подкорытов Ф. М. Микроэлементный состав основных видов лишайников Потаповского опытно-производственного хозяйства Таймырского национального округа // Микроэлементы в биосфере и их применение в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ: БИЕН СО РАН, 1967. С. 202–205.

Сухарева Т. А. Элементный состав талломоов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 4. С. 70–82. doi: 10.17076/есо259

Табаленкова Г. Н., Далькэ И. В., Головки Т. К. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на европейском северо-востоке // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 2. С. 221–225.

Хренов В. Я. Геохимическая экология растений северной тайги // Проблемы географии Западной Сибири. Тюмень: ТГУ, 1993. С. 137–143.

Шевченко В. П., Гордеев В. В., Демина Л. Л. Элементный состав лишайников как индикатор золотых потоков // Геохимия биосферы: Докл. междунауч. конф. М.; Смоленск, 2006. С. 387–389.

Щербенко Т. А., Копчик Г. Н., Гроненберг Б.-Я., Лукина Н. В., Ливанцова С. Ю. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения // Вестн. Моск. ун-та. Почвоведение. 2008. Сер. 17, № 2. С. 9–16.

Grodzinska K., Godzik B., Szarek G. Heavy metals and sulphur in lichens from Southern Spitsbergen // Fragm. Florist. Geobot. 1993. Suppl. 2/2. P. 699–708.

Поступила в редакцию 17.05.2017

References

Andreev V. N. Rastitel'nost' i prirodnye raiony vostochnoi chasti Bol'shezemel'skoi tundry [Vegetation and natural areas of the eastern part of the Bolshezemel'skaya tundra]. *Trudy Polyarnoi komissii* [Proceed. Polar Comm.]. Moscow; Leningrad: AN SSSR, 1935. Iss. 22. 97 p.

Byazrov L. G. Lishainiki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in ecological monitoring]. Moscow: Nauchnyi mir, 2002. 336 p.

Byazrov L. G., Pel'gunova L. A. Sostav i sootnoshenie khimicheskikh elementov na raznykh po vysote poverkhnostyakh podetsiev yagel'nogo lishainika *Cladonia rangiferina* // *Principy ekologii*. 2016. No. 2. P. 27–42. doi: 10.15393/j1.art.2016.4983

donia rangiferina [Reindeer lichen *Cladonia rangiferina*: composition and proportion of chemical elements in the podetium surfaces of different height]. *Printsipy ekol.* [Principles of Ecol.]. 2016. No. 2. P. 27–42. doi: 10.15393/j1.art.2016.4983

Dedov A. A. Rastitel'nost' Malozemel'skoi i Timanskoj tundry [Vegetation of the Malozemel'skaya and Timanska-tundras]. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 2006. 160 p.

Ezhov A. Yu. Tyazhelye metally v rastitel'nom pokrove severo-zapada Kol'skogo poluostrova [Heavy metals in the vegetation cover in the north-west of the Kola Peninsula]. *Prepodavatel' XXI vek* [Academics of the 21st Cent.]. 2011. No. 1. P. 221–226.

Elsakov V. V., Makarkin V. P. Kontaminanty v produktakh olenevodstva khozyaistv Respubliki Komi: analiz istochnikov postupleniya. Reshenie aktual'nykh problem prodovol'stvennoi bezopasnosti Krainego Severa [Contaminants in deer farming products of the Komi Republic: analysis of sources. Solutions of topical problems of food security of Russian High North]. *Sbornik statei, posvyashchennyi 90-letiyu sozdaniya Murmanskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi opytnoi stantsii* [Coll. Papers Dedicated to the 90th Anniv. of the Murmansk St. Agr. Exp. Station]. Murmansk, 2016. P. 58–62.

Elsakov V. V., Polikarpova N. V. Sputnikovye metody v analize izmenenii zapasa lishainikov v fitotsenozakh zapovednika Pasvik [Satellite methods for analyzing the changes in lichens stock in the phytocenoses of the Pasvik Nature Reserve]. *Sovr. probl. distantsionnogo zond. Zemli iz kosmosa* [Topical Problems of Remote Sensing of the Earth from Space]. 2015. Vol. 12, no. 3. P. 87–97.

GOST R 51419-99 (ISO 6498-98). Korma, kombikorma, kombikormovoe syr'e. Podgotovka ispytuemykh prob [Feeds, mixed feeds and raw material. Preparation of test samples]. Moscow: Gosstandart Rossii, 2002. 8 p.

Khrenov V. Ya. Geokhimicheskaya ekologiya rastenii severnoi taigi [Geochemical ecology of plants in northern taiga]. *Problemy geografii Zapadnoi Sibiri* [Iss. of Geography of Western Siberia]. Tyumen': TGU, 1993. P. 137–143.

Kuz'menkova N. V., Kosheleva N. E., Asadulin E. E. Tyazhelye metally v pochvakh i lishainikakh tundrovoi i lesotundrovoi zon severo-zapada Kol'skogo poluostrova [Heavy metals in soils and lichens in the tundra and forest-tundra zones (North-West of the Kola Peninsula)]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science]. 2015. No. 2. P. 244–256. doi: 10.7868/S0032180X14100062

Larionova E. A. Tyazhelye metally v gorno-taezhnykh landshaftakh: na primere zapovednikov "Basegi" i "Visherskii" [Heavy metals of mountain-taiga landscapes: the cases of the Basegi and Vishersky Nature Reserves]. DSc (Cand. of Geogr.) thesis. Perm', 2004. 158 p.

Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodii i produktsii rastenievodstva [Guidelines for determining heavy metals in soils of agricultural lands and products of crop farming]. Moscow: TsINAO, 1992. 63 p.

Mikhailova I. N., Sharunova I. P. Dinamika akumulyatsii tyazhelykh metallov v tallomakh epifitnogo lishainika *Hypogymnia physodes* [Dynamics of heavy metals accumulation in thalli of the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes*]. *Ekologiya* [Ecology]. 2008. No. 5. P. 366–372.

Nazemnoe geobotanicheskoe obsledovanie zemel'nykh uchastkov, arenduemykh SPK obshchina "Kanin", dlya tselei severnogo olenevodstva. Otchet po teme dogovora № 37-2014. In-t biologii Komi NTs UrO RAN [Ground-based geobotanical study of the areas leased by the Kanin APC for reindeer farming: a report on the project in accordance with the contract № 37-2014. IB Komi SC UB RAS]. 2014. 82 p.

O vysokoi kontsentratsii dioksinov, polikhlorirovannykh bifenilov, kadmiya i rtuti v pecheni severnykh olenei s Kol'skogo poluostrova [On high concentration of dioxin, polychlorinated biphenyl, cadmium, and mercury in livers of the reindeers from the Kola Peninsula]. URL: <http://www.fsvps.ru/fsvps/news/ld/150574.html> [accessed: 20.04.2017].

Podkorytov F. M. Mikroelementnyi sostav osnovnykh vidov lishainikov Potapovskogo opytno-proizvodstvennogo khozyaistva Taimyrskogo natsional'nogo okruga [Microelement composition of main species of lichens in the Potapovskoe experimental production farm of Taimyr national district]. *Mikroelementy v biosfere i ikh primenenie v sel'skom khozyaistve i meditsine Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Microelements in Biosphere and their Use in Agriculture and Medicine of Siberia and the Far East]. Ulan-Ude: BIEN SO RAN, 1967. P. 202–205.

Sukhareva T. A. Elementnyi sostav tallomov lishainika *Cladonia stellaris* v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya [Elemental composition of thalli of the lichen *Cladonia stellaris* under air pollution]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 4. P. 70–82. doi: 10.17076/eco259

Tabalenkova G. N., Dal'ke I. V., Golovko T. K. Elementnyi sostav biomassy nekotorykh vidov lishainikov boreal'noi zony na evropeiskom severo-vostoke [Elemental composition of the biomass of some lichen species in the boreal zone of the European North-East]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceed. Samara Sci. Center RAS]. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 221–225.

Shevchenko V. P., Gordeev V. V., Demina L. L. Elementnyi sostav lishainikov kak indikator eolovykh potokov [Elemental composition of lichens as an indicator of eolian flows]. *Geokhimiya biosfery: Dokl. Mezhd. nauchn. konf. [Geochem. of Biosphere: Reports Int. Sci. Conf.]*. Moscow; Smolensk, 2006. P. 387–389.

Shcherbenko T. A., Koptsik G. N., Gronenberg B.-Ya., Lukina N. V., Livantsova S. Yu. Pogloshchenie elementov pitaniya i tyazhelykh metallov sosnoi v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya [Uptake of nutrients and heavy metals by pine trees under atmospheric pollution]. *Vestn. Mosk. un-ta. Pochvovedenie* [Moscow Univ. Soil Sci. Bull.]. 2008. Ser. 17, no. 2. P. 9–16.

Zagorodneva I. M., Mikhailov N. G., Polezhaev A. N., Kartuzova L. T. Mikroelementnyi sostav kormovykh lishainikov lesotundrovoi zony Magadanskoi oblasti [Microelement composition of forage lichens of the forest-tundra zone of the Magadan Region]. *Kormovaya baza i produktivnost' severnykh olenei* [Forage Reserve and Productivity of Reindeers]. Novosibirsk: SO RAN, 1988. P. 78–80.

Grodzinska K., Godzik B., Szarek G. Heavy metals and sulphur in lichens from Southern Spitsbergen. *Fragm. Florist. Geobot.* 1993. Suppl. 2/2. P. 699–708.

Received May 17, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Елсаков Владимир Валериевич

заведующий лаб. компьютерных технологий
и моделирования, к. б. н.
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения РАН
ул. Коммунистическая, 28, ГСП-2, Сыктывкар, Республика
Коми, Россия, 167982
эл. почта: elsakov@ib.komisc.ru
тел.: (8212) 216752

Новаковский Александр Борисович

научный сотрудник лаборатории компьютерных технологий
и моделирования, к. б. н.
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения РАН
ул. Коммунистическая, 28, ГСП-2, Сыктывкар, Республика
Коми, Россия, 167982
эл. почта: novakovsky@ib.komisc.ru
тел.: (8212) 440322

Поликарпова Наталья Владимировна

зам. директора по научной работе, к. г. н.
Государственный природный заповедник «Пасвик»
пос. Раякоски, Печенгский район, Мурманская область,
Россия, 184404
эл. почта: polikarpova-pasvik@yandex.ru
тел.: 89212887800

CONTRIBUTORS:

Elsakov, Vladimir

Institute of Biology, Komi Science Centre,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
28 Kommunisticheskaya St., GSP-2, 167982 Syktyvkar,
Komi Republic, Russia
e-mail: elsakov@ib.komisc.ru
tel.: (8212) 216752

Novakovskiy, Alexander

Institute of Biology, Komi Science Centre,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
28 Kommunisticheskaya St., GSP-2, 167982 Syktyvkar,
Komi Republic, Russia
e-mail: novakovsky@ib.komisc.ru
tel.: (8212) 440322

Polikarpova, Natalia

Pasvik State Nature Reserve
184404 Rajakoski, Pechengsky District, Murmansk Region,
Russia
e-mail: polikarpova-pasvik@yandex.ru
tel.: +79212887800