

ГЕОГРАФИЯ

УДК 574.4:581.5

М. Г. Опекунова, М. Ю. Гизетдинова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИШАЙНИКОВ В КАЧЕСТВЕ БИОИНДИКАТОРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Российская Федерация

В статье представлены результаты исследования содержания Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Pb и Cd в почвах и 5 видах лишайников р. *Cetraria* и р. *Cladonia*, отобранных на северо-западе РФ на фоновых и антропогенно нарушенных участках в зонах воздействия ОАО «Карельский Окамыш» (Республика Карелия) и комбината «Североникель» (Мурманская область). Установлено, что химический состав лишайников формируется под влиянием комплекса внешних и внутренних факторов и зависит, прежде всего, от их видовой принадлежности и антропогенного загрязнения. В районе Костомукши лишайники характеризуются накоплением типоморфных элементов — Fe и Mn, в зоне воздействия комбината «Североникель» — Cu, Ni и Co. Наибольшей сорбционной способностью и устойчивостью к техногенезу на всех участках обладает вид *Cetraria islandica*.

Показано, что применение лишайноиндикации для оценки степени техногенной трансформации ландшафтов в районах размещения горнорудного производства существенно ограничено из-за низкой устойчивости лишайников к техногенезу и формирования «лишайниковой пустыни». Библиогр. 30 назв. Ил. 4. Табл. 2.

Ключевые слова: биоиндикация, лишайники, горнорудное производство, загрязнение, тяжелые металлы.

USING OF LICHENS AS BIOINDICATORS OF ENVIRONMENTAL POLLUTION

M. G. Opekunova, M. Ju. Gizetdinova

St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Results of investigations of soils and five species of lichens at natural and anthropogenic polluted areas of the Nord-West of Russian Federation envired mining industrial centrals "Karelian Okatysh" and "Severonikel" are represented in the article. The article presents the content of Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Pb and Cd in soils and 5 *Cetraria* and *Cladonia* lichen species from in northwestern Russia on the background and anthropogenically disturbed areas in the zones of influence "Karelian Pellet" (Republic of Karelia) and combine "Severonikel" (Murmansk region). It is shown that the chemical composition of lichens is influenced by a complex of external and internal factors, varies by species and depends on anthropogenic pollution. In the area of Kostomuksha, the lichens are characterized by accumulation of typomorphic elements — Fe and Mn, in the zone influenced by the plant "Severonikel" — Cu, Ni and Co. The species of *Cetraria islandica* has the highest sorption capacity and resistance to technogenesis in all areas.

It is shown that the use of lichen-indication to assess the degree of anthropogenic transformation of landscapes in these areas with mining industry is severely restricted due to the low resistance of the lichen to technogenesis and the formation of "lichen desert". Refs 30. Figs 4. Tables 2.

Keywords: bioindication, lichens, mining industry, pollution, heavy metals.

Введение. В настоящее время разработаны различные подходы к оценке экологического состояния окружающей среды, среди которых одним из перспективных направлений является биоиндикация загрязнений [1, 2]. Она включает в себя ряд относительно простых, дешевых и информативных методов оценки экологического состояния окружающей среды, основанных на изучении реакций живых организмов на антропогенное воздействие. В мониторинговых исследованиях экологического состояния антропогенно нарушенных природно-территориальных комплексов (ПТК) издавна используются лишайники. В литературе накоплен обширный материал о состоянии эпифитного лишайникового покрова территорий [3–8]. Установлены основные факторы условий местообитания, определяющие зависимость его развития, — расположение лишайников на стволе (угол наклона, высота над землей и экспозиция), вид, возраст дерева, условия увлажнения и др.

Отличительной особенностью лишайников является их очень высокая чувствительность к состоянию атмосферного воздуха. Его загрязнение ведет к снижению проективного покрытия эпифитных лишайников и сокращению участия напочвенных (эпигейных) видов в составе мохово-лишайникового яруса. На первых этапах воздействия наблюдается увеличение концентрации поллютантов в талломах. В дальнейшем при нарастании интенсивности техногенной нагрузки лишайники полностью исчезают, и образуется «лишайниковая пустыня».

Исходя из этого, важным показателем техногенного воздействия на ПТК является изменение химического состава лишайников. Накопление тяжелых металлов (ТМ) и серы, степень повреждения слоевищ эпифитных лишайников позволяют определять влияние эмиссий на ранней стадии деградации, когда изменение на уровне фитоценоза в целом еще не регистрируется. Особое значение в этом отношении имеют напочвенные лишайники. Они не имеют организованной корневой и сосудистой систем, легко поглощают химические вещества не только из подстилающего субстрата, но и из воздуха и атмосферных осадков. Содержание химических элементов зависит от вида лишайника, возраста таллома, от состава почвообразующих пород, положения ПТК в элементарном геохимическом ландшафте, влажности и других внутренних и внешних факторов. Во многих работах признается преимущество анализа химического состава лишайников по сравнению с другими растениями в условиях антропогенного загрязнения [3, 9–11]. Лишайники хорошо показали себя как биомониторы загрязнения ТМ в различных частях Земного шара: в урбанизированных районах Италии [12], в зонах воздействия электростанций в Португалии [7], сельской местности в Турции [13] и т. д.

Исследования особенностей накопления ТМ лишайниками на северо-западе РФ проводились различными научными коллективами [14–18]. Согласно данным, полученным М. Л. Раменской [14], содержание микроэлементов в эпигейных лишайниках определяется химическим составом подстилающего субстрата. В фоновых условиях основную роль играют подстилающие горные породы, в то время как при антропогенном загрязнении прослеживается четкая аккумуляция поллютантов в связи с высоким содержанием их в поверхностном горизонте почв. В работе В. А. Орлова и др. [15], обобщающей многолетний опыт исследований на Кольском полуострове, вслед за [19] лишайники отнесены к группе растений с атмосферной стратегией питания, химический состав которых определяется атмосферными выпадениями. Часто лишайники рассматриваются как единая группа видов в сравнении с мхами,

травянистыми растениями, кустарничками, кустарниками или деревьями. В литературе можно встретить указания на изучение смешанных проб, состоящих из *Cladonia mitis*, *C. rangiferina* и др. [14, 20]. Таким образом, межвидовые различия аккумуляции микроэлементов, необходимые для оценки индикаторных возможностей видов при диагностике техногенной трансформации ПТК, нивелируются и определены недостаточно.

Объект и методика исследований. Изучение индикаторных свойств эпигейных лишайников проводилось в 2009–2011 г. на северо-западе РФ в северной тайге на фоновых и антропогенно нарушенных участках в зонах воздействия ОАО «Карельский Окатыш» (Республика Карелия) и комбината «Североникель» (Мурманская область). Исследовались фоновые ПТК Государственного природного заповедника (ГПЗ) «Костомукшский» и международного заповедника «Дружба» (Финляндия, вблизи г. Кухмо), а также территория г. Костомукша. На Кольском полуострове сравнивались фоновые ПТК Полярно-Альпийского Ботанического сада (ПАБСИ, склоновые ПТК западной и восточной экспозиций горного массива Хибин) и антропогенно нарушенные ПТК на склоне горы Ньюдоайвенч, обращенные к комбинату «Североникель» и г. Мончегорску, и на удалении 25 и 40 км к югу от комбината и города.

На каждом ключевом участке для изучения изменения концентрации химических элементов в пространственной дифференциации природной среды и выявления особенностей миграции химических элементов в пределах элементарного геохимического ландшафта применялись методы экологического профилирования и эталонных площадей (ЭП). На ЭП размером 20×25 м осуществлялись детальное физико-географическое описание и отбор проб почв и растений на химический анализ (в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83). Для исследования свойств различных типов почв было изучено 8 почвенных разрезов и отобраны образцы на химический анализ из всех генетических горизонтов. На остальных ЭП почвы отбирались методом конверта из органогенного (О) и иллювиального (BF/BHF) горизонтов (ГОСТ 5180-75). Средняя проба лишайников (кладонии альпийской *Cladonia alpestris* (L.) Rabenh., к. мягкой *Cladonia mitis* Sandst.; к. оленьей *Cladonia rangiferina* (L.) Web., цетрарии исландской *Cetraria islandica* (L.) Ach., ц. снежной *Cetraria nivalis* (L.) Ach.) включала только верхнюю часть слоевища; нижняя его часть, соприкасающаяся с субстратом, удалялась. Таким образом было исследовано 72 эталонных площади, отобрано 144 пробы почв и 203 пробы лишайников.

Химический анализ проб почв и растений проведен в лаборатории Геоэкологического мониторинга СПбГУ. В почвах определен механический состав, величина рН, содержание гумуса и подвижных форм тяжелых металлов (ТМ — Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, Pb и Cd), извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, в лишайниках — общее содержание ТМ. Анализ проб на содержание ТМ осуществлен на атомно-абсорбционном спектрометре NOVAA 300. Относительная погрешность метода составляет 8–10%, предел обнаружения — 0,05 мг/кг.

Результаты и их обсуждение. Одним из критериев антропогенной нарушенности ПТК служит изменение химического состава почв и биоты по сравнению с фоновыми условиями. Содержание химических элементов в лишайниках зависит от двух групп факторов: внутренних — биологических особенностей вида, его систематической принадлежности, и внешних — химизма среды обитания [21–23].

На территории государственного заповедника «Костомукшский» лишайники характеризуются невысоким содержанием ТМ. Концентрация Pb, Co и Cd в большинстве опробованных растений ниже предела обнаружения прибора, а среднее содержание Zn, Ni, Cu, Fe и Mn значительно меньше средней их концентрации в растительности суши (кларка растительности) по В. В. Добровольскому [24] (табл. 1). Это подтверждает опубликованные в литературе данные о низком содержании микроэлементов в лишайниках Карелии [14, 16, 18, 25].

Слабая аккумуляция ТМ лишайниками обусловлена в целом низкой минерализацией почв в условиях промывного режима северотаежных ПТК. Почвообразующие породы Карелии в целом обеднены микроэлементами [2, 26, 27], что определяет низкое содержание ТМ в почвах фоновых ПТК. Однако в межхолмовых понижениях в результате латеральной миграции элементов отмечается накопление Fe, Mn, Cr, Cu, Zn и др. Как показал анализ полученных данных, содержание подвижных форм Fe, Mn, Cr, Cu, Zn и Pb, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, в изученных почвах невелико и в целом ниже ПДК (табл. 2). Максимальные их концентрации установлены в почвах на моренных отложениях. В верхних генетических горизонтах отмечается биогенная аккумуляция Fe и Mn, что объясняется их способностью к комплексообразованию с органическими веществами (рис. 1). Кроме того, наблюдается значительное накопление соединений этих элементов в иллювиальном горизонте на глеевом барьере. Смена теплового, водного и окислительно-восстановительного режимов, доступа кислорода, слабая минерализация органики, деятельность железобактерий неизбежно ведут к осаждению значительной части подвижных соединений Fe и Mn в транзитных и, особенно, в аккумулятивных ландшафтах. Сходные закономерности прослеживаются и в распределении Cu и Zn. В почвах заповедника концентрация подвижных форм Pb, Ni и Co в основном ниже порога обнаружения.

В аккумуляции химических элементов лишайниками наблюдаются определенные различия, обусловленные как их межвидовыми особенностями, так и геохимическими особенностями различных местообитаний. Вместе с тем, как показал расчет статистических параметров, значения коэффициентов вариации ТМ (V) в изученных видах на территории ГПЗ «Костомукшский» составляют от 10 до 28%, что свидетельствует об относительно однородных выборках.

Наибольшей аккумулялирующей способностью среди изученных видов в фоновых условиях заповедных ПТК отличается цетрария *Cetraria islandica*. Расчет F-критерия Фишера и t-критерия Стьюдента показал, что содержание ТМ в талломах этого вида математически достоверно превышает их концентрацию в лишайниках рода *Cladonia*. Исключение составляет только Cu, содержание которой достоверно выше в *Cladonia mitis*. Вместе с тем во всех изученных таксонах не только средние содержания ТМ, но и максимальные их значения не превышают кларк по В. В. Добровольскому (1998). Так, например, средняя концентрация Zn в *Cladonia rangiferina* составляет 16 мг/кг сухого вещества (далее — мг/кг), Cu — 1,4 мг/кг, что соответственно в 1,9 и 5,7 раз ниже кларка растительности по В. В. Добровольскому. Максимальные содержания при этом равны 19 и 2,1 мг/кг, что также в 1,6 и 3,8 раза ниже кларка.

Содержание Fe, элемента типоморфного для рудопроявлений района Костомукши и обладающего высокой подвижностью в альфегумусовых почвах северной тайги, в пробах *Cetraria islandica* изменяется от 40 до 90 мг/кг, при средней величине — 65 мг/кг. В лишайниках р. *Cladonia* средняя концентрация его почти в 1,5 раза ниже

Таблица 1. Статистические параметры содержания ТМ в лишайниках

Параметр	Zn	Cu	Ni	Fe	Mn	Zn	Co	Ni	Fe	Mn
Государственный заповедник «Костомукшский»										
<i>Cetraria islandica</i> (n = 37)										
x̄±λ5% min—max	22±0,7 18-28	1,9±0,2 0,7-3,1	1,7±0,1 1,2-2,2	65±3,7 40-90	19±0,9 13-25	16±0,6 12-19	1,4±0,1 0,7-2,1	1,4±0,15 0,7-2,1	57±3 34-80	16±0,6 13-20
	V	10	28	14	17	9	25	26	15	9
<i>Cladonia mitis</i> (n = 24)										
x̄±λ5% min—max	13±0,4 11-15	2,25±0,2 1,2-3,3	0,9±0,1 0,3-1,5	53±4 36-70	16±0,7 13-19	15±0,7 14-17	1,8±0,2 1,3-2,3	1,1±0,1 0,8-1,4	51±3 45-57	16±0,7 14-18
	V	7	18	33	19	7	17	18	8	7
<i>Cladonia rangiferina</i> , г. Костомукша (n = 6)										
x̄±λ5% min—max	35±10 18-51	2,4±0,3 1,3-3,4	2,7±0,8 1,3-4,1	107±45 38-176	38±3,9 17-58	15±1,7 12-18	2,2±0,5 1,2-3,2	1,4±0,5 0,7-2,2	62±19 34-89	22±3,5 17-27
	V	33	15	34	47	14	30	45	37	19
Окрестности г. Кухмо, международный заповедник «Дружба», Финляндия										
<i>Cetraria islandica</i> (n = 7)										
x̄±λ5% min—max	29±8 22-51	2,0±0,6 1,3-3,2	2,0±0,8 1,2-4,1	100±32 66-176	28±11 13-58	16±1 15-19	1,6±0,6 1-3,2	1,6±0,4 1,1-2,2	68±11 54-89	20±3 15-27
	V	37,40	36,19	55,02	41,79	10,83	47,92	30,85	21,83	22,25
<i>Cladonia mitis</i> (n = 4)										
x̄±λ5% min—max	14±1 12-15	1,6±0,2 1,2-1,8	1,4±0,3 1,1-1,9	71±18 54-107	17±2 14-21	19±3 14-24	1,3±0,2 1-1,5	1,6±0,4 1,1-2,3	74±32 45-123	19±4 14-27
	V	10,02	17,07	25,42	34,68	21,20	15,03	30,30	52,73	27,33

Окончание табл. 1										
Кольский полуостров, ПАБСИ										
Cetraria islandica (n = 13)					Cladonia alpestris (n = 12)					
$\bar{x} \pm \Delta 5\%$	24 ± 2,2	4,4 ± 0,5	5,9 ± 1,3	93 ± 12	34 ± 4	15 ± 0,7	2,7 ± 0,5	3,05 ± 0,6	67 ± 7	22 ± 2,7
min—max	20–33	2,2–5,8	3,2–11,6	65–118	25–43	13–17	1,3–4,2	1,3–4,8	46–87	17–27
V	16	22	39	22	20	10	30	30	21	24
Cladonia mitis (n = 8)					Cetraria nivalis (n = 12)					
$\bar{x} \pm \Delta 5\%$	13 ± 0,5	2,3 ± 0,2	2,45 ± 0,4	63 ± 7,9	19 ± 2,3	23 ± 1,8	3,2 ± 0,4	5,6 ± 0,6	82 ± 11,9	31 ± 3,8
min—max	12–14	1,7–2,9	1,7–3,2	47–79	14–24	17–28	2,4–4,5	3,8–7,9	51–114	23–47
V	6	13	20	17	17	14	22	19	25	19
Cladonia rangiferina, ЭП 14 средняя часть склона южной экспозиции г. Юксторр; березовое криволесье										
n = 1	13,6	1,4	1	56	17,2	19	4,5	3,1	80	21,4
Водосбор р. Курка, 25 км от комбината «Североникель»										
Cetraria islandica					Cladonia alpestris					
n = 1	39,3	7,6	15,4	137,4	38,5	25,7	5,1	6,7	111,2	27,8
Окрестности г. Мончегорска										
Cetraria islandica (n = 9)					Cladonia alpestris (n = 10)					
$\bar{x} \pm \Delta 5\%$	32 ± 4	6,6 ± 1,4	14 ± 3	133 ± 21	36 ± 5	20,2 ± 2,8	3,5 ± 0,9	4,2 ± 1,2	86 ± 14	25 ± 3
min—max	25–40	3,5–10	6–22	78–187	25–47	17–26	2,5–5,1	2,9–6,7	62–111	18–28
V	19	29	35	22	20	17	31	36	20	15
Cetraria nivalis (n = 6)										
$\bar{x} \pm \Delta 5\%$	27 ± 3,6	4,5 ± 0,6	7,7 ± 0,8	110 ± 17,8	34 ± 4,5					
min—max	22–33	3,6–5,5	6,8–8,5	76–143	27–40					
V	16	18	13	20	16					
Кларк растительности суши по В.В. Добровольскому (1998)										
				30	8	2				205

Примечание. $\bar{x} \pm \Delta 5\%$ — среднее ± ошибка на 5% уровне значимости, min — минимальное значение, max — максимальное значение, мг/кг сухого вещества, V — коэффициент вариации, %.

Таблица 2. Статистические параметры содержания подвижных форм ТМ в почвах

Параметр	Zn	Cu	Ni	Fe	Mn	Zn	Co	Ni	Fe	Mn
Государственный заповедник «Костомукшский»										
Органогенные горизонты (n = 9)						Иллювиальные горизонты (n = 9)				
$\bar{x} \pm \lambda 5\%$	4,9 ± 2,1	0,4 ± 2,1	<0,05	53 ± 19	106 ± 122	2,0 ± 0,7	7,4 ± 4,1	<0,05	85 ± 29	72 ± 13
min — max	1,7–12	0,2–1,0		36–124	37–558	0,9–3,6	0,2–20		5,7–16	37–93
σ	3,21	0,27	–	29,07	182,71	1,03	6,22	–	44,11	19,38
V	65,45	69,63	–	55,08	172,53	52,29	83,83	–	52,04	26,77
Окрестности г. Кухмо, международный заповедник «Дружба», Финляндия										
Органогенные горизонты (n = 3)						Иллювиальные горизонты (n = 3)				
$\bar{x} \pm \lambda 5\%$	8,6	0,5	<0,05	6,2	170	1,1 ± 0,4	0,6 ± 0,2	<0,05	88 ± 28	15 ± 9
min — max	4,3–12	0,2–0,7		4–9,9	78–293	0,7–1,7	0,2–0,8		57–129	4,9–29
Кольский полуостров, ПАБСИ										
Органогенные горизонты (n = 6)						Иллювиальные горизонты (n = 6)				
$\bar{x} \pm \lambda 5\%$	18 ± 6,6	2,5 ± 0,9	7,7 ± 4,4	24 ± 8	127 ± 26	1,5 ± 0,8	1,3 ± 0,4	2,5 ± 1,5	121 ± 14	18 ± 11
min — max	12–32	1,4–4,5	2,4–15,6	12–37	84–165	1,0–3,4	0,6–1,7	0,7–4,9	108–153	1,0–52
σ	8,04	1,15	5,39	9,68	32,30	0,92	0,43	1,78	16,69	26,53
V	45,66	45,74	70,27	39,58	25,47	60,15	33,58	71,72	13,80	145,33
Окрестности г. Мончегорска										
Органогенные горизонты (n = 6)						Иллювиальные горизонты (n = 6)				
$\bar{x} \pm \lambda 5\%$	2,9 ± 1,0	59 ± 30	42 ± 17	102 ± 58	10,4 ± 1,2	0,5 ± 0,2	1,6 ± 0,8	8,6 ± 5,8	47,4 ± 15,5	2,5 ± 1,1
min — max	1,3–5	11,4–120	19–63	14–202	8–12	0,2–0,8	0,4–2,9	2,7–20,5	33–84	0,6–4,2
σ	1,27	36,91	20,34	71,31	1,41	0,26	1,00	7,08	19,03	1,35
V	44,09	62,20	48,31	69,68	13,55	53,39	61,50	82,59	40,17	52,90
ПДК	23,0	3,0	4,0	–	60	23,0	3,0	4,0	–	60

Примечание. $\bar{x} \pm \lambda 5\%$ — среднее ± ошибка на 5% уровне значимости, max — максимальное значение, min — минимальное значение, мг/кг, σ — стандартное отклонение, V — коэффициент вариации, %.

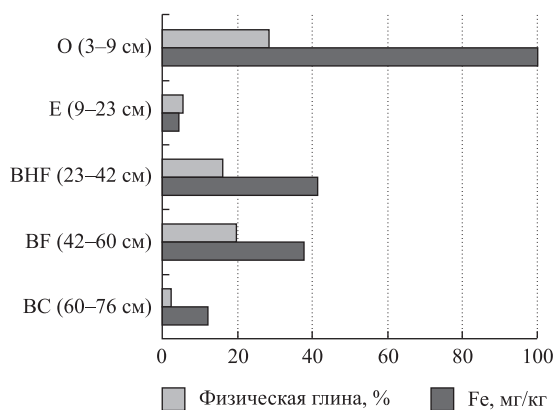


Рис. 1. Распределение подвижных форм железа, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, в профиле подзола иллювиально-железистого на моренных суглинках на территории государственного заповедника «Костомукшский»

и составляет 51–57 мг/кг. Анализ пространственного распределения Fe в пробах цетрарии показал, что максимальная его аккумуляция отмечена в талломах в елово-сосновых бруснично-зеленомошных сообществах на склонах моренных холмов юго-западной, западной и северо-западной экспозиции. Это может быть связано как с природными, так и с антропогенными факторами. С одной стороны, повышенная подвижность и доступность Fe лишайникам объясняется транзитными ландшафтно-геохимическими условиями склоновых ПТК, где отмечается увеличение содержания металла в результате латеральной миграции. С другой стороны, подкисляющий эффект загрязненных воздушных масс, поступающих при трансграничном переносе и осаждающихся на склонах западной экспозиции, также способствует увеличению доли подвижных соединений Fe и более активному его поступлению в биомассу.

Сходные закономерности отмечены и в накоплении **Zn**, **Mn** и **Ni**. Содержание их в талломах *Cetraria islandica* в фоновых условиях достоверно превышает аналогичные показатели в трех изученных видах рода *Cladonia*. Средние концентрации Zn и Ni в *Cetraria islandica* составляют 22 и 1,7 мг/кг, а в *Cladonia mitis* эти значения почти в 2 раза меньше — 13 и 0,9 мг/кг, в *C. rangiferina* и *C. alpestris* они равны соответственно 16 и 1,4 мг/кг, 15 и 1,1 мг/кг (см. табл. 1). Обращает на себя внимание незначительная изменчивость содержания Mn в лишайниках рода *Cladonia*, коэффициенты вариации его в пробах составляют 7–11%. Среднее его количество во всех трех видах одинаково и равно 16 мг/кг, а диапазон концентраций составляет от 13 до 20 мг/кг.

Низким содержанием ТМ характеризуется большинство проб лишайников, отобранных на территории Финляндии в пределах международного заповедника «Дружба» и в лесных массивах вблизи г. Кухмо. Средние концентрации их также ниже кларка растительности по В. В. Добровольскому, но превышают соответствующие показатели в лишайниках ГПЗ «Костомукшский». Подтверждаются отмеченные выше межвидовые различия аккумуляции микроэлементов лишайниками — концентрация ТМ в талломах *Cetraria islandica* в 1,5–2 раза выше, чем в видах кладонии.

Содержание подвижных форм ТМ в почвах при этом невелико и не превышает ПДК (см. табл. 2). Следует отметить, что в пробах, отобранных на территории Финляндии, увеличивается разброс концентраций, о чем свидетельствуют значения коэффициентов вариации, возросшие до 37–55%. Анализ полученных данных показал, что повышение содержания всех изученных ТМ отмечается вблизи автомобильных дорог и обусловлено аэротехногенными выбросами. Индикатором антропогенного загрязнения служит аккумуляция Zn, Fe и Ni в *Cetraria islandica* и *Cladonia alpestris* (рис. 2). Так, например, на зарастающей вырубке на барьере с лесным массивом содержание их в цетрарии составляет соответственно 31, 140 и 2,8 мг/кг. Еще больше оно на свежей вырубке, расположенной вдоль трассы Кухмо — Костомукша, и равно 51, 176 и 4,1 мг/кг, что превышает кларк по В. В. Добровольскому в 2 раза.

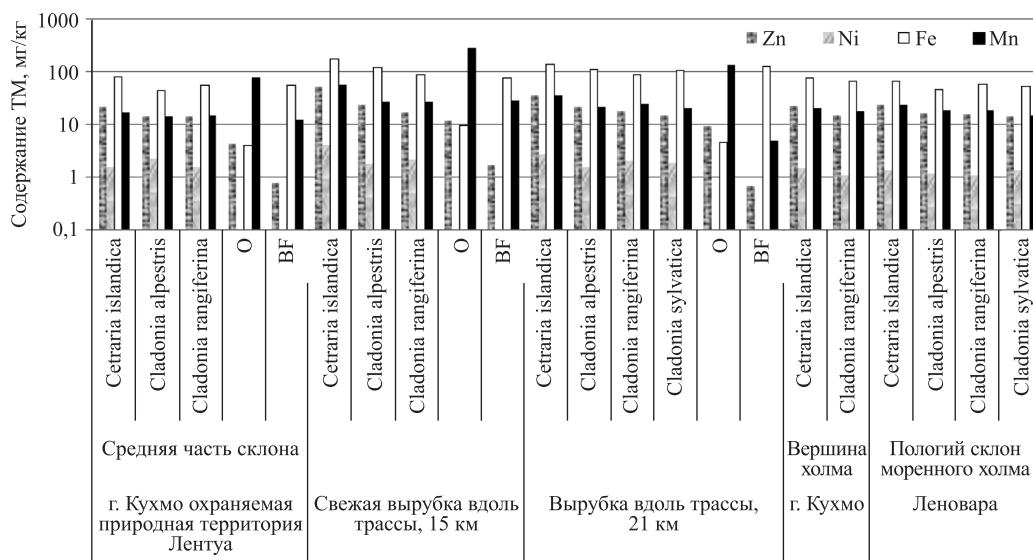


Рис. 2. Изменение содержания ТМ в лишайниках и подвижных форм ТМ в поверхностном (О) и иллювиальном (BF) горизонтах почв на ЭП в Финляндии

В центральной части г. Костомукши и в промышленной зоне ОАО «Карельский Окатыш» в результате комплексного воздействия урбанизации, автотранспорта, вырубки и загрязнения атмосферного воздуха промышленными выбросами сформировались участки «лишайниковой пустыни». Здесь отсутствуют как эпифитные, так и напочвенные виды, что указывает, с одной стороны, на сильную трансформацию природной среды под влиянием техногенеза, а с другой стороны, подчеркивает ограниченные возможности применения лишайноиндикации в этих условиях.

Репрезентативные пробы напочвенных лишайников были отобраны только в лесном массиве на берегу оз. Контактки в г. Костомукша. Наибольшей аккумулирующей способностью здесь, также как и на территории заповедника, обладает *Cetraria islandica*, накапливающая под воздействием аэротехногенных выбросов в 2 раза больше Zn, Ni и Fe, чем в фоновых ПТК. Однако уровень содержания ТМ в талломах цетрарии незначительно превышает кларк растительности по В. В. Добровольскому, что свидетельствует о слабом загрязнении компонентов ПТК. В окрестностях

г. Костомукша в зеленой зоне около Центральной усадьбы ГПЗ «Костомукшский» содержание ТМ в *Cladonia rangiferina* близко к фоновым показателям. Исключение составляет лишь незначительное увеличение концентрации Ni, указывающее на возрастание техногенной нагрузки.

Сравнительный анализ химического состава лишайников фоновых ПТК района Костомукши и ПАБСИ (Кольский полуостров) показывает, что лишайники Кольского полуострова в ПТК Хибин характеризуются увеличением содержания ТМ типоморфных для источника загрязнения. Почвы в окрестностях ПАБСИ испытывают аэротехногенное воздействие со стороны комбината «Североникель», а также источников загрязнения, расположенных в г. Кировске, и могут быть приняты лишь за условно фоновую территорию. Как показал сравнительный анализ химического состава почв различных ЭП, на склонах западной экспозиции, обращенных к комбинату «Североникель», отмечается повышенное содержание подвижных форм Ni и Cu. Так, например, содержание их в органическом горизонте почв на западном склоне г. Кукисвумчорр в 2–5 раз выше, чем в почвах сходных ПТК, расположенных на противоположном склоне восточной экспозиции г. Вудъяврчорр (рис. 3). Наиболее показательным изменением распределения подвижного Ni, содержание которого в поверхностном горизонте почв горных тундр возрастает с 2,4 мг/кг до 12,6 мг/кг и превышает ПДК в 3 раза. Кроме того, на ЭП вблизи пос. 25-й км наблюдается превышение ПДК по Zn, что обусловлено локальным загрязнением от объектов инфраструктуры поселения, автомобильной дороги и Кировского рудника.

Загрязнение почв отражается в увеличении содержания ТМ в талломах лишайников. Так, например, среднее содержание Ni в цетрарии исландской в 3 раза больше,

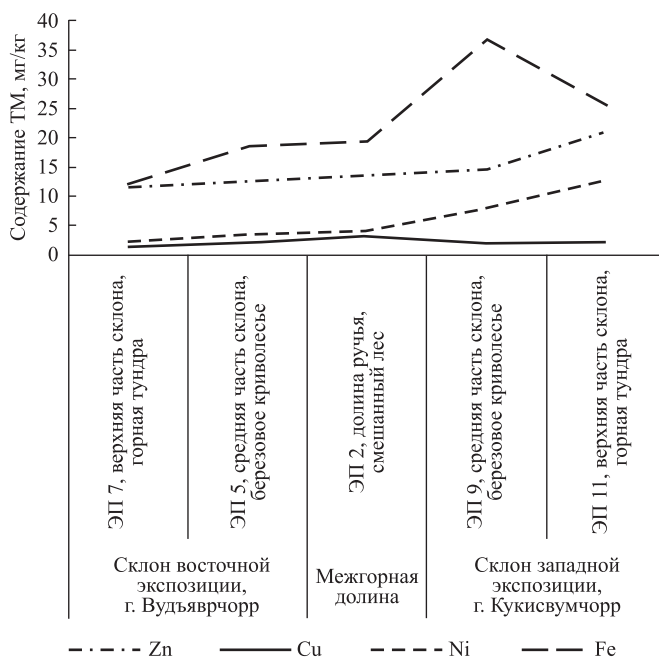


Рис. 3. Распределение подвижных форм ТМ, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, в поверхностном горизонте почв по профилю г. Вудъяврчорр — г. Кукисвумчорр (ПАБСИ)

чем в Костомукшском заповеднике и превышает кларк по В.В. Добровольскому в 3,5 раза. Максимальное его значение, обнаруженное в лишайнике в верхней части склона западной экспозиции г. Кукисвумчорр, превосходит кларковое значение в 6 раз и достигает 12 мг/кг, что подтверждает поступление загрязненных воздушных масс со стороны г. Мончегорска.

На Кольском полуострове, также как и на модельных площадях в Карелии и Финляндии, наблюдается повышенная аккумуляция ТМ видами р. цетрария. Среднее содержание металлов в них в 1,5–2 раза больше, чем в видах *Cladonia sp.* (см. табл. 1). Средняя концентрация Zn в *Cetraria islandica* на территории ПАБСИ составляет 24 мг/кг, в *Cetraria nivalis* — 23 мг/кг, а в *Cladonia alpestris* и *C. mitis* — соответственно 14 и 13 мг/кг.

Изменение лишайникового покрова под влиянием техногенеза отчетливо проявляется на примере исследований, проведенных в зоне воздействия комбината «Североникель» в г. Мончегорске и по «Мончегорскому градиенту» на водосборах рек Вите и Нюд. Сплошная вырубка, выпадение кислотных дождей и загрязнение ТМ привели к иссушению тайги и формированию техногенной пустоши. Частые пожары препятствуют естественному восстановлению растительности, так что, несмотря на реконструкцию предприятия в начале 1990-х годов и значительное снижение объема токсичных выбросов, существенного улучшения экологического состояния ПТК не наблюдается. Здесь под действием комплекса антропогенных факторов сформировалась «лишайниковая пустыня», так что к югу от города достоверную пробу лишайников можно отобрать лишь на удалении 20–25 км на водосборе р. Курка. Многочисленные исследования [14, 17, 28–30] показывают, что почвы содержат аномально высокое валовое содержание Ni, Cu и Co, в несколько раз превышающее ОДК. Концентрация подвижных форм Ni и Cu в почвах на расстоянии 6–12 км к югу от комбината достигает 30–160 ПДК. Отсутствие лишайников в этих условиях не позволяет эффективно использовать лишеноиндикацию для оценки трансформации ПТК.

Вместе с тем в 5–6 км к востоку от г. Мончегорска в сопках на берегу оз. Имандра и на склоне западной экспозиции г. Ньюдоайвенч в составе еловых редколесий, березового криволесья и горной тундры хорошо выражен лишайниковый покров. Почвы изученных ПТК отличаются высоким содержанием Ni и Cu, но значительно уступающим по абсолютным показателям значения для почв на водосборах рек Вите и Нюд. Об аэротехногенном их поступлении свидетельствует поверхностное распределение поллютантов. Среднее содержание подвижных форм Ni и Cu в поверхностных горизонтах обследованных почв достигает соответственно 42 и 59 мг/кг, что превышает ПДК в 10 и 20 раз. Максимальные их концентрации обнаружены в органогенном горизонте почв на ЭП, расположенной в нижней части склона г. Ньюдоайвенч, и составляют 63 и 120 мг/кг, превосходя норматив соответственно в 15 и 40 раз.

Среднее содержание всех ТМ в лишайниках на сопках в окрестностях г. Мончегорска в 2–3 раза больше полученных данных для условно фоновой территории в ПАБСИ. Исключение составляет только Mn, концентрация которого практически не изменилась.

Наиболее показательно накопление Ni и Cu в талломах лишайников, произрастающих на склоне западной экспозиции сопки по берегу оз. Имандра и в нижней части склона г. Ньюдоайвенч (рис. 4). Среднее содержание Ni в цетрарии *Cetraria islandica* по профилю, проложенному от вершины сопки с телевизионной вышкой

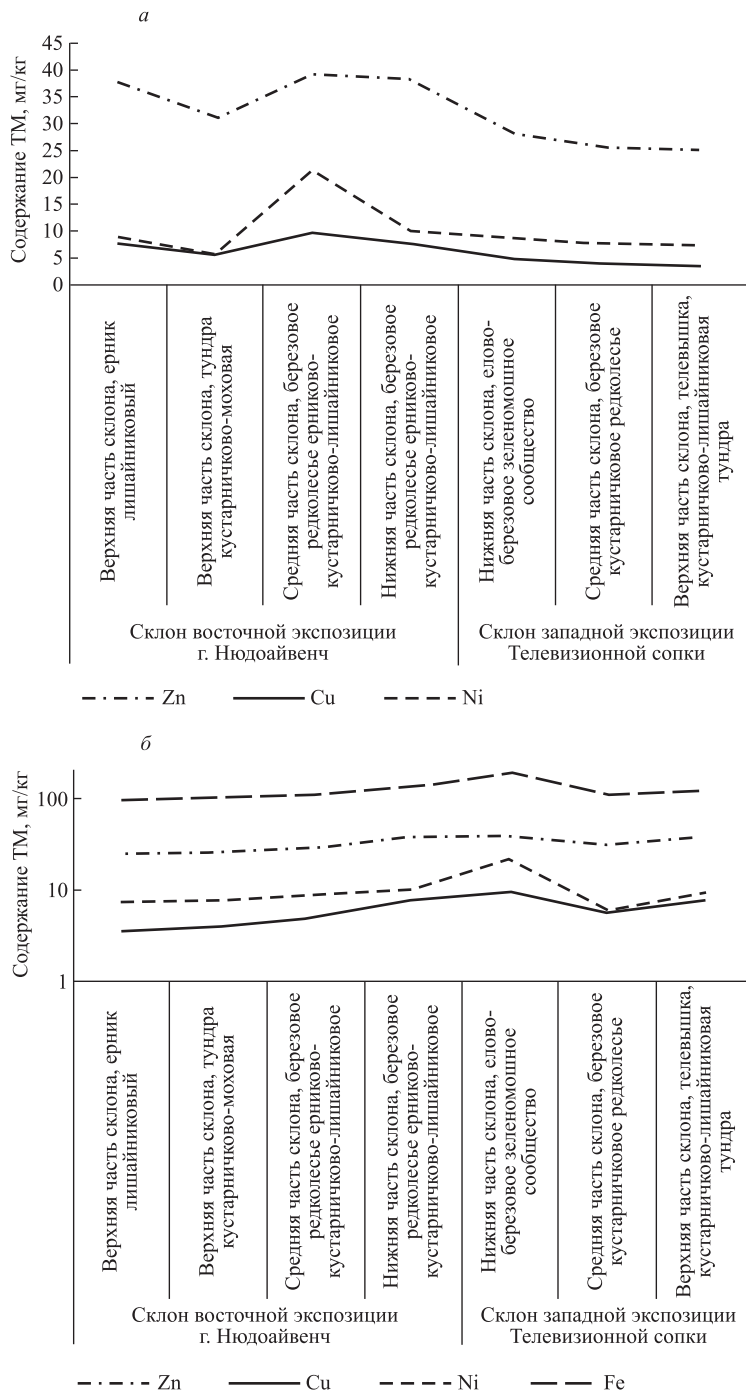


Рис. 4. Распределение содержания ТМ в *Cetraria islandica* (а) и их подвижных форм, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером, в поверхностном горизонте почв (б) по профилю г. Ньюдайвенч — Телевизионная сопка (г. Мончегорск)

к вершине г. Ньюдайвенч в 2 раза больше, чем на сходном профиле в ПАБСИ. Максимальная его концентрация (20 мг/кг) на порядок превышает кларк растительности по В. В. Добровольскому.

Сравнительный анализ показал, что полученные содержания ТМ в лишайниках значительно ниже приводимых в литературе данных. Так, например, по материалам М. Л. Раменской в период 1960–1970 гг., средняя концентрация Ni, Cu и Fe в *Cetraria islandica* составляла соответственно 97, 40 и 310 мг/кг, в *Cetraria nivalis* — 51, 33 и 149 мг/кг, а в *Cladonia alpestris* среднее содержание Ni и Cu было 88 и 30 мг/кг. По данным В. А. Орлова и др. (2004) в конце 1990-х годов в центральной и западной областях Хибин концентрации элементов в лишайниках *Cladonia mitis* и *C. rangiferina* изменялись в широких пределах (мг/кг): Cu — 3–109; Ni — 3–73; Fe — 30–662; Zn — 10–31 мг/кг. Как видно из приведенных данных, за последние годы произошло значительное снижение концентрации ТМ в талломах лишайников. Это может быть связано как с уменьшением уровня содержания металлов в поверхностном горизонте почв после сокращения объема аэротехногенных выбросов комбината «Североникель», так и с вымыванием поллютантов из слоевищ лишайников в дождливый период, предшествующий отбору проб.

Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта сопровождается увеличением концентрации Pb в талломах лишайников, что подтверждает их высокую индикаторную значимость для оценки аэротехногенного загрязнения. Во всех лишайниках, произрастающих в окрестностях г. Мончегорска и вдоль трассы «Кола» Санкт-Петербург — Мурманск, отмечается накопление Pb, превышающее кларк растительности по В. В. Добровольскому [24] в 5–7 раз. Максимальное его количество отмечено в цетрарии *Cetraria islandica* и достигает 6,7 мг/кг, в то время как на условно фоновой территории содержание его ниже порога обнаружения (<0,05 мг/кг). Обращает на себя внимание тот факт, что в условиях гумидного климата в эродированных иллювиально-железистых подзолах вдоль автотрассы концентрация подвижного Pb также меньше 0,05 мг/кг, что, по-видимому, связано с выносом его из легких по механическому составу почв при промывном режиме.

Корреляционный анализ показал, что в фоновых ПТК Костомукшского заповедника концентрация большинства ТМ в *Cladonia rangiferina* и *C. alpestris* напрямую не зависит от количества их подвижных форм в субстрате ($r < |0,37|$). В то же время наблюдается прямая зависимость аккумуляции Cu и Zn в талломах *Cetraria islandica* и *Cladonia mitis* от концентрации их подвижных форм в почвах. Последнее хорошо согласуется с представлением о том, что в условиях недостатка элементов минерального питания необходимые лишайникам микроэлементы быстро поглощаются и вовлекаются в биологический круговорот. В то время как Fe и Mn, находящиеся в почвах в избытке, во всех изученных видах характеризуются достоверной обратной пропорциональной связью их аккумуляции — значение коэффициента корреляции (r) изменяется от $-0,63$ до $-0,84$. Анализ химического состава лишайников подтверждает известное родство в накоплении Cu и Zn, а также Fe и Mn ($r = 0,57–0,88$). В *Cladonia alpestris* отмечена достоверная положительная связь в аккумуляции Zn и Ni с Mn, а в *Cladonia rangiferina* и *Cetraria islandica* — высокая отрицательная зависимость между Cu и Fe ($r = -0,57 — -0,84$). Во всех таксонах обнаружена отрицательная зависимость накопления Fe с Ni и Zn. В естественных условиях наблюдаются хорошо выраженные видовые особенности аккумуляции ТМ лишайниками, вне

зависимости от их близкого систематического положения. Интенсивность вовлечения элементов в биологический круговорот позволяют оценить коэффициенты биологического поглощения. По интенсивности накопления ТМ в талломах лишайников можно составить следующие ряды:

Ряд интенсивности поглощения Cu: *Cladonia mitis* > *Cetraria nivalis* > *Cetraria islandica* > *Cladonia alpestris* > *Cladonia rangiferina*.

Ряд интенсивности поглощения Fe, Mn, Ni, Zn: *Cetraria islandica* > *Cetraria nivalis* > *Cladonia rangiferina* > *Cladonia mitis* > *Cladonia alpestris*.

Следует отметить, что обилие лишайников на модельных площадях значительно варьируется. Причем значимую роль играют как природные, так и техногенные факторы. Примером может служить распространение бореального вида лишайника *Cladonia rangiferina*, который отсутствует на антропогенно нарушенной территории в окрестностях г. Мончегорска, что подтверждает его повышенную чувствительность к загрязнению на границе ареала. Ограниченное распространение арктоальпийского вида *Cetraria nivalis* в северной тайге Карелии в целом обусловлено естественными эколого-географическими причинами. В то же время он был встречен на площадках в лесных сообществах со слабым аэротехногенным загрязнением, где ослаблена конкурентная способность видов лишайников основных ценозообразователей — *Cladonia mitis*, *C. rangiferina* и *C. alpestris*.

Выводы.

1. Химический состав лишайников формируется под влиянием комплекса внешних и внутренних факторов. Содержание ТМ в исследованных видах лишайников различно и зависит, прежде всего, от их видовой принадлежности. Наибольшей сорбционной способностью на всех участках обладает вид *Cetraria islandica*. Он же является и наиболее устойчивым к антропогенному воздействию: на территориях, испытывающих антропогенную нагрузку, *Cetraria islandica* характеризуется большей встречаемостью и обилием, чем *Cladonia rangiferina*, *Cladonia alpestris*, *Cladonia mitis* и *Cetraria nivalis*. На основании проведенных исследований, можно рекомендовать анализ изменения химического состава *Cetraria islandica* в качестве показателя загрязнения окружающей среды.

2. Накопление химических элементов зависит от субстрата, на котором произрастает лишайник, ландшафтно-геохимических условий, рельефа местности, определяющего латеральную миграцию микроэлементов, погодных условий. Большое влияние оказывают атмосферные осадки. Обильные дожди во время проведения натурных исследований способствуют вымыванию микроэлементов из талломов лишайников и, как следствие, не было обнаружено связи между накоплением ТМ в почве и лишайнике.

3. На химический состав лишайников в районах размещения горнорудного производства существенное влияние оказывает антропогенное загрязнение. Увеличение концентраций ТМ на территориях, испытывающих техногенную нагрузку, отмечается во всех исследованных видах. Типоморфными элементами в районе Костомукши являются Fe и Mn.

В зоне воздействия комбината «Североникель» прослеживается значительное увеличение концентрации Cu, Ni и Pb. В некоторых случаях отмечается превышение фоновых значений этих металлов от 2 до 8 раз. Максимальное содержание Ni и Pb обнаружено на ЭП, расположенной в окрестностях г. Мончегорск у подножья

г. Ньюодайвенч, где содержания всех ТМ в 3 раза превышают значения фоновых площадей ПАБСИ и кларковых величин. В связи с этим можно говорить о значительном влиянии комбината «Североникель» на прилегающие территории.

4. Применение лишеноиндикации для оценки степени техногенной трансформации ландшафтов существенно ограничено. В зоне влияния комбинатов ОАО «Карельский Окамыш» и «Североникель», в г. Костомукша и г. Мончегорск отмечается выпадение лишайников из состава растительных сообществ, что говорит о существенном нарушении изученных территорий. Однако провести зонирование этих участков по степени нарушенности невозможно из-за низкой устойчивости лишайников к техногенезу.

Литература

1. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / под. ред. Р.Шуберта. М.: Мир, 1988. 350 с.
2. *Опекунова М.Г.* Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2013. 36 с.
3. *Трасс Х.Х.* Криптоиндикационные методы определения степени загрязненности атмосферного воздуха и экологический мониторинг // Охраняемые природные территории Советского Союза, их задачи и некоторые итоги исследования. М.: Наука, 1983. С. 130–139.
4. *Adamo P., Giordano S., Vingiani S., Castaldo Cobianchi R., Violante P.* Trace element accumulation by moss and lichen exposed in bags in the city of Naples (Italy) // *Environ. Pollut.* 2003. Vol. 122. P.91–103.
5. *Баргальи Р.* Биогеохимия наземных растений: Экофизиологический подход к биомониторингу и биовосстановлению. М.: ГЕОС, 2005. 456 с.
6. *Шустов М.В., Малышева Н.В.* Лишайники Санкт-Петербурга // *Ботан. журн.* 2006. Т.91, № 3. С.510–513.
7. *Baptista M. S., Teresa M., Vasconcelos S. D., Carbral J. P., Freitas C. M., Pacheco A. M. G.* Copper, nickel, lead in lichens and tree bark transplants over different period of time // *Environ. Pollut.* 2008. Vol. 151. P. 408–413.
8. *Aslan A., Çiçek A., Yazıcı K., Karagöz Y., Turan M., Akku F., Yildirim O. S.* The assessment of lichens as bioindicator of heavy metal pollution from motor vehicles activities // *African J. Agricultural Research.* 4 April, 2011. Vol. 6(7). P. 1698–1706.
9. *LeBlanc F., Rao D.N., Comeau G.* Indices of atmospheric purity and fluoride pollution pattern in Arvida, Quebec // *Canadian J. Botany.* 1972. Vol. 50. P. 991–998.
10. *Бязров Л.Г.* Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
11. *Малышева Н.В.* Лишайники городов Европейской России. 3. Географический анализ // *Ботан. журн.* 2007. Т. 92, № 2. С. 254–263.
12. *Loppi S., Nelli L., Ancora S., Bargagli R.* Passive monitoring of trace elements by means of tree leaves, epiphytic lichens and bark substrate // *Environmental Monitoring and Assessment.* 1997. Vol. 45. P. 81–88.
13. *Aslan A., Araydin G., Yazıcı K., Cengiz E., Aylıkçı V., Trsasoglu E.* Analysis of trace element concentrations of some lichens of turkey // *Asian J. Chem.* 2010. Vol. 22(1). P. 389–400.
14. *Раменская М.Л.* Микроэлементы в растениях Крайнего Севера. Л.: Наука, 1974. 159 с.
15. *Орлов В. А., Орлова М. А., Лукина Н. В., Никонов В. В., Владыченский А. С.* Оценка состояния высокогорных экосистем Хибин на основе химического состава эпигейных лишайников // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17: Почвоведение.* 2004. № 2. С. 48–53.
16. *Пантелеева Я.Г.* Геохимические изменения окружающей среды в зоне влияния горнопромышленного комплекса ОАО «Карельский окамыш» (г. Костомукша, Республика Карелия): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2009. 22 с.
17. *Лянгузова И.В.* Толерантность компонентов лесных экосистем севера России к аэротехногенному загрязнению: автореф. дис. ... д-ра биол.наук. СПб., 2010. 39 с.
18. *Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Кутенков С.А., Виноградова А.А., Гордеев В.В., Демин 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. URL: <http://www.science-education.ru/97-4692> (дата обращения: 20.01.2013).

19. Nieboer E., Richardson D. H. S., Tomassini F. D. Mineral uptake and release by lichens: an overview // *The Bryologist*. 1978. Vol. 81. P. 226–246.
20. Андрианова Г. А. Содержание микроэлементов в почвообразовательных породах, почвах и растениях Центральной Якутии // *Геохимия*. 1971. № 4. С. 463–476.
21. Парибок Т. А., Алексеева-Попова Н. В. Содержание химических элементов в растениях Полярного Урала в связи с проблемой серпентинитовой растительности // *Ботан. журнал*. 1966. Т. 51, № 3. С. 339–352.
22. Брукс Р. Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 326 с.
23. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях / пер. с англ. Д. В. Гринчука, Е. П. Янина; под ред. Ю. Е. Саета. М.: Мир, 1989. 439 с.
24. Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Высш. школа, 1998. 413 с.
25. Вершинина С. Э., Кравченко О. Ю., Вершинин К. Е., Чебыкин Е. П., Воднева Е. Н. Элементный состав лишайников р. *Setragia* Ach. из различных регионов России // *Растит. ресурсы*. 2009. Вып. 2. С. 105–109.
26. Тойка М. А. Микроэлементы в горных породах и почвообразующих породах Северо-запада и Севера европейской части СССР // *Микроэлементы в биосфере Карелии и сопредельных районов*. Ч. 1. Петрозаводск: Петрозаводский ун-т, 1976. С. 5–66.
27. Федорец Н. Г., Башмет О. Н., Солодовиков А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии. Геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 47 с.
28. Никонов В. В., Лукина Н. В. Биогеохимические циклы в лесах севера в условиях аэротехногенного загрязнения: в 2 ч. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. 213 с.
29. Reitmann C., Ayras M., Chekushin V. et al. Environmental geochemical atlas of the central Barents region. Trondheim, Grytting, 1998. 398 p.
30. Опекунова М. Г., Елсукова Е. Ю., Чекушин В. А. и др. Мониторинг изменения состояния окружающей среды в зоне воздействия комбината «Североникель». II. Миграция и аккумуляция химических элементов в почвах // *Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7: Геология, география*. 2006. Вып. 3. С. 39–49.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2013 г.

Контактная информация

Опекунова Марина Германовна — доктор географических наук, доцент;

e-mail: m.opekunova@mail.ru

Гизетдинова Марина Юрьевна — студент; e-mail: vorobjovamu-89@inbox.ru

Opekunova M. G. — Doctor of Geographic Sciences, Associate Professor; e-mail: m.opekunova@mail.ru

Gizetdinova M. Ju. — Student; e-mail: vorobjovamu-89@inbox.ru