



УДК 582.29: 502.53:581.5

СОСТАВ И СООТНОШЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАЗНЫХ ПО ВЫСОТЕ ПОВЕРХНОСТЯХ ПОДЕЦИЕВ ЯГЕЛЬНОГО ЛИШАЙНИКА *CLADONIA RANGIFERINA*

БЯЗРОВ
Лев Георгиевич

Институт проблем экологии и эволюции РАН,
lev.biazrov@rambler.ru

ПЕЛЬГУНОВА
Любовь Андреевна

Институт проблем экологии и эволюции РАН,
platon@sevin.ru

Ключевые слова:
лишайники
Cladonia rangiferina
поверхность подециев
 μ -РФС
состав элементов
распределение элементов
вертикальный градиент
137Cs/90Sr
K/Ca
фактор обогащения
Баргузинский хребет

Аннотация: Сравнили состав атомов 21 химического элемента – Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Ba, Pb – на поверхностях верхушечной, средней и нижней частей подециев ягельного лишайника *Cladonia rangiferina*, собранных на склоне Баргузинского хребта. Измерение соотношения долей (%) элементов проведено неразрушающим образец микрорентгеновским спектрометром (μ -РФС). Установлено, что величины долей (%) большинства элементов, за исключением Cu и Zn, на поверхностях подециев лишайника очень вариабельны. Доли (%) элементов на поверхностях различаются между измеренными частями подециев *C. rangiferina*: количественные показатели долей (%) P, S, Cl, K были значимо выше на поверхности верхушечной части подециев, тогда как Al, Si, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Co и суммарной доли – на поверхности нижней части. Очень высокие значения фактора обогащения на всех частях подециев установлены для As и Pb, повышенные – для P, Co, Ni, Cu, Zn.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: А. В. Сонина

Получена: 21 марта 2016 года

Подписана к печати: 19 мая 2016 года

Введение

Концентрация и состав элементов в телах растений, грибов, в том числе и лихенизованных (лишайников), – предмет изучения обширного числа исследований, затрагивающих, например, биогеохимические циклы в экосистемах, физиологическую устойчивость организмов, качество кормовых ресурсов, биомониторинг, биологическую очистку загрязненных объектов, разведку рудных месторождений, ги-

иеническую оценку среды (Саэт и др., 1990; Бязров, 2002; Бязров, 2005; Nash, 2008; Backor et al., 2010; Kumar et al., 2012; Бязров, Пельгунова, 2015г). Относительно лишайников значительнейшая часть опубликованных данных информирует о содержании элементов во всем слоеище лишайника (Михайлова, Шарунова, 2008; Михайлова, Кшнясов, 2012; Бязров, Пельгунова, 2015а, г). Меньше сведений о концен-

трации элементов в разных по возрасту частях их слоевищ (Bargagli et al., 1987; Loppi et al., 1997; Nimis et al., 2001). Форма роста лишайников признается очень важным фактором, влияющим на поглощение элементов из среды; как правило, кустистые лишайники считаются более слабыми аккумуляторами в сравнении с листоватыми и накипными формами (St. Clair et al., 2002a, b). Ряд представителей напочвенных кустистых лишайников могут достигать значительных размеров, из-за чего содержание некоторых элементов в нижних и верхних частях их слоевищ может быть различным, что было показано как для стабильных изотопов на примере *Cladonia furcata* (Tuba et al., 1994), *C. cariosa*, *C. ruixidata*, *C. rei* (Osyczka et al., 2016), так и для радионуклидов относительно многих видов (обзор см.: Бязров, 2005). Тем не менее исследований накопления элемента разными по высоте частями кустиков лишайников очень мало, нет информации об элементах непосредственно на их поверхности, хотя именно поверхность слоевища является акцептором жидких и сухих осадков, компоненты которых далее попадают в тела лишайника (Williamson et al., 2004; Purvis et al., 2013). Появление приборов, позволяющих проводить измерение состава химических элементов, не разрушая образцы, дает возможность определить соотношение состава ряда элементов на поверхности слоевища лишайника. Кроме того, сохранение целостности измеряемого образца позволяет использовать для целей мониторинга материал из научных коллекций, поскольку образцы при измерении не повреждаются. Было показано, что результаты не разрушающего образец измерения состава элементов в слоевищах лишайников сопоставимы с результатами, полученным на приборах, для измерения на которых необходимо разрушение образца измельчением, прессованием, растворением (Bontempi et al., 2008; Бязров, Пельгунова, 2013, 2015б, в, д). Целью нашего исследования было выявление возможных количественных различий между химическими элементами на поверхностях верхней, средней и нижней частей кустиков слоевища кормового ягельного лишайника *Cladonia rangiferina*, чтобы установить особенности распределения элементов по вертикальному градиенту слоевища. Анализируемые показатели — состав и не нормализованное к суммар-

ной величине соотношение (%) элементов на поверхностях различных частей слоевищ (подециев) кустистого напочвенного лишайника.

Материалы

Объектом изучения были 10 экземпляров одного вида лихенизированных грибов из семейства Cladoniaceae — *Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F. H. Wigg. Они были собраны из одной дернины (куртины) 10 × 20 см на почве среди мхов в лиственничном (*Larix dahurica*) лесу на пологом северном склоне Баргузинского хребта (Республика Бурятия) в экорегионе хвойных лесов Забайкалья (Ecoregions, 2001). *C. rangiferina* принадлежит к жизненной форме эпигенных кустистых прямостоячих лишайников (Голубкова, Бязров, 1989). Следы первичного слоевища в месте сбора образцов отсутствовали, а были представлены разветвленные кустики (подеции), не имеющие корового слоя, с паутинисто-войлочной, гладкой, пепельно-серой поверхностью. Высота изученных образцов от 7 до 10 см (рис. 1). Ареал вида включает ряд биомов всех континентов суши, кроме Австралии, его представители занимают заметное место в некоторых экосистемах тундр и бореальных хвойных лесов на почвах легкого механического состава. Этот ягельный лишайник служит источником корма для северного оленя и ряда других животных (Андреев, 1954; Aastrup et al., 2000; Courtois et al., 2007).

Методы

На поверхности каждого из 10 подециев *C. rangiferina* измерения проведены на трех высотных уровнях (верхняя часть — 0.5 см от верхушки подециев, средняя часть — 2 см от верхушки подециев, нижняя часть — 5 см от верхушки подециев) в 5 точках на каждом уровне (рис. 2). Таким образом, на каждом высотном уровне подециев сделано 50 измерений. Одноковое расстояние точек измерения от верхушки подециев обеспечивало примерно сходный возраст каждого высотного уровня на разных подециях, поскольку у ягельных лишайников рост преимущественно верхушечный (Андреев, 1954), а нижний уровень 5 см связан с размерами самого небольшого подеция.

Перед измерением состава элементов с поверхности подециев мягкой кисточкой и феном удаляли песок, пыль и

другие твердые частицы, осевшие на поверхность. Затем измеряемые образцы



Рис. 1. Объект измерений – 10 подециев *C. rangiferina*

Fig. 1. Measurement object – 10 podetia of *C. rangiferina*



Рис. 2. Расположение 5 точек измерения на поверхности подеция № 1, верхушечная часть

Fig. 2. The location of 5 points of the measurement on the surface of podetia № 1, upper part

трижды обмывали дейонизированной водой. Высохший подеций закреплялся на предметном столике в вакуумной камере (2 мбар) микрорентгенофлуоресцентного спектрометра μ -XRF M4 Tornado (Bruker AXS, Германия). Микрорентгенофлуорес-

центный анализ элементов на этом приборе основан на взаимодействии элементов, содержащихся в образце, с высокоэнергетическим рентгеновским излучением, которое приводит к испусканию образцом вторичногорентгеновского излучения рентгеновская флуоресценция). Ис-

точник рентгеновского излучения (Rh) работал при 50 кВ, 200 мкА, более 100 импульсов, время взаимодействия с образцом 1 сек. Пучок рентгеновского излучения направлялся в намеченную точку поверхности подеция, и состав элементов определялся для пятна размером 20 $\mu\text{м}$. При этом образец не разрушался.

Компьютер, являющийся частью прибора, по специальной программе выдавал результат измерения в выбранной

точке как среднее значение для числа импульсов в виде спектра обнаруженных элементов, который затем трансформировался в таблицу со отношений (%) элементов и масс их атомов в измеряемой точке (рис. 3). В данной работе использованы показатели колонки Net unnn. [wt.%] таблицы, приведенной на рис. 3. Точность измерения – 0.01 %.

Spectrum: 1b1

E1	AN	Series	Net unnn.	C norm.C	Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Mg	12	K-series	15	0.74	21.42	32.86
Al	13	K-series	3	0.07	1.90	2.62
Si	14	K-series	13	0.11	3.08	4.09
P	15	K-series	13	0.06	1.60	1.93
S	16	K-series	94	0.22	6.27	7.29
Cl	17	K-series	77	0.20	5.94	6.24
K	19	K-series	214	0.61	17.76	16.94
Ca	20	K-series	251	0.60	17.34	16.13
Ti	22	K-series	29	0.04	1.05	0.82
V	23	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Cr	24	K-series	18	0.01	0.36	0.26
Mn	25	K-series	43	0.03	0.74	0.50
Fe	26	K-series	209	0.10	3.01	2.01
Co	27	K-series	31	0.01	0.41	0.26
Ni	28	K-series	77	0.03	0.93	0.59
Cu	29	K-series	113	0.05	1.37	0.80
Zn	30	K-series	256	0.11	3.11	1.77
As	33	K-series	207	0.12	3.47	1.73
Sr	38	K-series	126	0.18	5.34	2.27
Rh	45	K-series	206	0.00	0.00	0.00
Ba	56	K-series	0	0.00	0.00	0.00
Pb	82	K-series	447	0.17	4.91	0.88
<hr/>						
Total:						
3.44 100.00 100.00						

Рис.3. Количественные показатели элементов, полученные на спектрометре μ -XRF M4 Tornado для точки №1 на поверхности подеция № 1, верхушечная часть

Fig. 3. Quantitative values of the elements measured by the spectrometer μ -XRF M4 Tornado for point №1 on the surface of podetia № 1, upper part

Соответствующие приложения программы Microsoft Office Excel 2003 использовали для вычисления средних значений долей элементов, ошибки среднего, коэффициентов корреляции Пирсона ($p \leq 0.05$), различий по ряду этих показателей между сравниваемыми уровнями подециев (критерий t Стьюдена, $p \leq 0.05$).

Для определения вклада различных источников в формирование элементного состава на поверхности апотециев лишайников был рассчитан фактор обогащения элементов (EFT_i) относительно среднего состава элемента (Эл) в верхней части континентальной земной коры, нормализованный относительно Ti :

$$EF_{Ti} = (\text{Эл}/Ti)\text{проба} / (\text{Эл}/Ti)\text{земная кора}.$$

При вычислениях EF_T использованы опубликованные сведения о содержании элементов в верхней части континентальной земной коры (Григорьев, 2003).

Все измеренные подеции *C. rangiferina* хранятся в Лаборатории экологического мониторинга в регионах АЭС и биоиндикации Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН и пригодны для изучения.

Результаты

На поверхностях всех частей подециев обследованного вида лишайника обнаружен 21 элемент (табл. 1). Согласно Общероссийскому классификатору ингредиентов выбросов вредных веществ в воздух

(Общероссийский..., 2016), Cr, Co, Pb при- надлежат к классу опасности 1. Элементы Mg, Cl, V, Mn, Ni, Cu, Zn, As относят к классу опасности 2, а кремниевая и кальциевая пыли, а также ряд соединений Fe – к классу опасности 3.

Таблица 1. Средняя доля (%) и стандартная ошибка ($M \pm m$) элементов, коэффициент вариации ($CV, \%$), фактор обогащения (EF_{Ti}) на поверхности верхней, средней и нижней частей подециев *C. rangiferina*; n – число точек, измеренных на каждом высотном уровне

Table 1. Mean proportion (%) and standard error ($M \pm m$) elements, the coefficient of variation ($CV, \%$), enrichment factor (EF_{Ti}) on the surface of the upper, middle and lower parts podetia *C. rangiferina*; n – the number of points measured at each level of height

Элемент Element	Верх Upper (n = 50)			Середина Middle (n = 50)			Низ Lower (n = 50)		
	$M \pm m$	$CV, \%$	EF_{Ti}	$M \pm m$	$CV, \%$	EF_{Ti}	$M \pm m$	$CV, \%$	EF_{Ti}
Mg	0.33±0.05	103	1.9	0.26±0.04	108	3.7	0.28±0.05	114	0.8
Al	0.16±0.03	112	0.2	0.11±0.02	104	0.4	0.21±0.03	86	0.1
Si	0.33±0.05	106	0.1	0.31±0.03	74	0.3	0.60±0.09	103	0.1
P	0.09±0.01	54	153.0	0.06±0.01	69	256.8	0.07±0.01	67	61.8
S	0.17±0.02	76	12.0	0.11±0.01	68	20.1	0.12±0.01	55	0.4
Cl	0.14±0.01	57	9.7	0.12±0.01	66	19.5	0.12±0.01	60	4.0
K	0.38±0.03	47	1.7	0.30±0.05	107	3.5	0.24±0.02	67	0.5
Ca	0.77±0.05	47	2.0	1.74±0.24	97	11.4	3.04±0.28	67	4.0
Ti	0.03±0.01	162		0.01±0.00	131		0.07±0.01	114	
V	0.01±0.00	121	12.2	0.01±0.00	158	24.7	0.02±0.00	133	7.8
Cr	0.01±0.00	109	7.4	0.01±0.00	107	24.4	0.02±0.00	88	5.6
Mn	0.04±0.00	45	6.1	0.05±0.00	46	19.8	0.07±0.01	67	5.7
Fe	0.12±0.01	36	0.3	0.15±0.01	47	0.9	0.34±0.02	50	0.4
Co	0.03±0.00	39	173.8	0.03±0.00	61	465.7	0.04±0.00	43	105.7
Ni	0.04±0.00	45	62.8	0.04±0.00	50	165.8	0.04±0.00	41	33.1
Cu	0.06±0.00	32	169.9	0.07±0.00	28	443.7	0.07±0.00	25	100.8
Zn	0.11±0.00	23	145.7	0.11±0.00	25	361.5	0.12±0.00	25	79.5
As	0.09±0.01	47	1469.3	0.09±0.01	46	3707.8	0.09±0.01	51	726.7
Sr	0.20±0.01	42	75.3	0.17±0.01	35	164.0	0.18±0.01	36	33.6
Ba	0.03±0.01	129	5.6	0.04±0.01	143	20.9	0.04±0.01	116	4.3
Pb	0.32±0.02	50	1878.6	0.32±0.02	42	4725.4	0.29±0.02	52	882.8
Всего Total	3.48±0.10	20		4.13±0.25	42		6.06±0.28	32	

Последовательность расположения (по убыванию) средних долей элементов на поверхностях верхней, средней и нижней частей подециев *C. rangiferina* по местам их в этих рядах как одинакова, так и различна (табл. 2). Так, каждый ряд начинает каль-

ций (Ca), а заканчиваются ванадий (V) и хром (Cr). Первые 6 элементов на верхнем и среднем высотных уровнях подециев, наряду с Ca, в разной последовательности формируют Mg, Si, K, Sr, Pb. На поверхности нижней части увеличивается значение Fe и

уменьшается доля Sr. На этом уровне положение железа соответствует его положению в последовательности расположения измеренных на поверхности подеция элементов в верхней части континентальной земной коры (см. табл. 2; Григорьев, 2003). Но последовательность расположения других элементов в земной коре существенно отличается от их места в рядах, относящихся к поверхности *C. rangiferina*. Последовательность долей элементов для земной коры начинают кремний (Si) и алюминий (Al), а заканчивают свинец (Pb) и мышьяк (As), тогда как на поверхности подециев Al не

входит в первую шестерку элементов, а Pb, наоборот, входит в первую пятерку, и в средней части этот элемент располагается на втором месте (см. табл. 2). Положение As на всех высотных уровнях подециев стабильное в середине рядов. И мышьяк, и свинец на всех высотных уровнях подециев *C. rangiferina* выделяются самыми высокими величинами фактора обогащения (см. табл. 1). Относительно высокие значения этого показателя у P, Co, Ni, Cu и Zn (см. табл. 1). Практически все они располагаются в конце ряда последовательности доли элементов в земной коре (см. табл. 2).

Таблица 2. Последовательность расположения средних долей (по убыванию) элементов на поверхностях верхней, средней и нижней частей подециев *C. rangiferina* и в верхней части континентальной земной коры (кора)

Верх Upper	Ca > K > Mg, Si > Pb > Sr > S > Al > Cl > Fe > Zn > P, As > Cu > Mn, Ni > Ti, Co, Ba > V, Cr
Середина Middle	Ca > Pb > Si > K > Mg > Sr > Fe > Cl > Al, S, Zn > As > Cu > P > Mn > Ni, Ba > Co > Ti, V, Cr
Низ Lower	Ca > Si > Fe > Pb > Mg > K > Al > Sr > S, Cl, Zn > As > P, Ti, Mn, Cu > Co, Ni, Ba > V, Cr
Кора Crust	Si > Al > Fe > Ca > K > Mg > Mn > Ti > Cl > S > Mn > P > Ba > Sr > Cr > V > Zn > Ni > Cu > Co, Pb > As

При высоком числе измерений на каждом высотном уровне (50) изменчивость величин долей элементов на поверхности подециев очень велика, о чем свидетельствуют значительные величины коэффициентов вариации. Только у Cu и Zn этот показатель 32 % и менее, а у трети элементов коэффициент вариации превышает 100 (см. табл. 1).

Доля ряда элементов на поверхностях разных частей подециев *C. rangiferina* неодинакова (см. табл. 1). Достоверность различий между количественными показателями долей элементов на поверхностях с разных высотных уровнях подециев оценивали критерием Стьюдена t для $p \leq 0.05$. Между верхней и средней частями подециев выявлены значимые различия значений для Al, P, S, Cl, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr и суммарной доли, причем доли Al, P, S, Cl, Ti были выше на поверхности верхней части подециев. Между верхней и нижней частя-

ми обнаружены значимые различия величин для Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co и суммарной доли. Значения P, S, Cl, K были выше на поверхности также верхней части подециев. Между средней и нижней частями различия значимы для Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn и суммарной доли. У всех них количественные показатели были выше в нижней части подециев.

Значимые ($p \leq 0.05$) величины коэффициента корреляции Пирсона между долями элементов на поверхности верхней части подециев зафиксированы в 117 случаях, из них 75 положительные. Наибольшее число значимых положительных значений здесь имеет Fe, а отрицательных – Si (табл. 3), но максимальная величина коэффициента 0.63 здесь между Ca и Ti, а минимальная (-0.70) – между As и Pb. На поверхности средней части подециев значимых величин коэффициента корреляции 141, из которых 83 положительные. На этом высотном уровне наибольшее число зна-

чимых положительных значений имеет Ni, отрицательных – вновь Si (см. табл. 3). Максимальная величина коэффициента 0.51 здесь между Ni и Zn, а минимальная (-0.58), как и в верхней части, между As и Pb. На поверхности нижней части подециев значимых величин коэффициента корреляции

135, из которых 94 положительные. Здесь наибольшее число значимых положительных значений, как и в верхней части, имеет Fe, а отрицательных – Mn (см. табл. 3). Максимальная положительная величина коэффициента 0.75 между долями Al и Si, а минимальная (-0.53) – вновь между As и Pb.

Таблица 3. Элементы со значимыми ($p \leq 0.05$) положительными и отрицательными величинами коэффициента корреляции Пирсона между их долями (%) на поверхностях верхней, средней и нижней частей подециев *C. rangiferina* (n = 50)

Table 3. Chemical elements with significant ($p \leq 0.05$) positive and negative values of the Pearson correlation coefficient between their proportion (%) on the surfaces of upper, middle and lower parts of *C. rangiferina* podetia (n = 50)

Элемент Element	Часть подеция Parts	Положительные с Positive with	Отрицательные с Negative with
Mg	верх upper	Al	Si, Mn, Co, Cu, As, Sr
	середина middle	–	Cl, Cr, Zn, As
	низ lower	Fe, Pb	–
Al	верх upper	Mg, Si, Ca, Ti, Cr, Fe	Ni, Cu
	середина middle	S	Sr
	низ lower	Si, S, K, Ti, Fe	Ca, Mn, Zn, As
Si	верх upper	Al, Ti, Fe	Mg, S, K, Ni, Zn, Sr, Pb
	середина middle	As	Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb
	низ lower	Al, S, Cl, K, Ti, Fe, Ba	Ca, Mn, Zn
P	верх upper	S, Cl	Ni, Pb
	середина middle	S, Cl, Ni	Cr
	низ lower	S, V, Ni, Cu, Sr, Ba, Pb	–
S	верх upper	P, Cl, Zn, Sr	Si, As
	середина middle	Al, P, Mn, Co	–
	низ lower	Al, Si, P, Cl, K, Sr	–
Cl	верх upper	P, S, Co	–
	середина middle	P, Ni, Sr	Mn, K
	низ lower	Si, S, K, Ti, Fe	Mn, As
K	верх upper	Fe, Ni, Cu	Si
	середина middle	Cr	Cl, Zn, As
	низ lower	Al, Si, S, Cl, Ti, Fe, Ba	Ca, Cr, Mn, Zn, Sr
Ca	верх upper	Al, Ti, Cr, Mn, Fe, Zn	–
	середина middle	Mn, Fe, Cu, Zn, Ba, Pb	Si, Ti, As
	низ lower	Ni, Zn	Al, Si, K, Ti, Fe
Ti	верх upper	Al, Si, Ca, Fe	Ni, Pb
	середина middle	–	Ca, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ba
	низ lower	Al, Si, Cl, K, Fe	Ca, Mn, Sr

Таблица 3.Продолжение

Элемент Element	Часть подоцис Parts	Положительные с Positive with	Отрицательные с Negative with
V	верх upper	Cu	—
	середина middle	Ni, Ba, Pb	Cr, As
	низ lower	P, Mn, Ba	—
Cr	верх upper	Al, Ca, Fe	-
	середина middle	K, Fe, Co	Mg, P, V
	низ lower	Co, Zn	K, Ba
Mn	верх upper	Ca, Fe, Cu, Sr	Mg
	середина middle	S, Ca, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ba	Si, Ti
	низ lower	V	Al, Si, Cl, K, Ti, Fe
Fe	верх upper	Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Zn	S
	середина middle	Ca, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Pb	Si, As
	низ lower	Mg, Al, Si, Cl, K, Ti, Cu, Pb	Ca, Mn
Co	верх upper	Cl, Zn	Mg
	середина middle	S, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr	Si, Ti
	низ lower	Cr, Cu, Zn	—
Ni	верх upper	K, Sr	Al, Si, P, Ti
	середина middle	P, Cl, V, Mn, Fe, Cu, Zn, Ba, Pb	Si, Ti
	низ lower	P, Ca, Zn, Sr, Pb	—
Cu	верх upper	K, V, Mn, Ba, Pb	Mg, Al
	середина middle	Ca, Mn, Co, Ni, Zn, Ba, Pb	Si, Ti
	низ lower	P, Fe, Co, Zn, As	—
Zn	верх upper	S, Ca, Fe, Co, Sr, Ba	Si
	середина middle	Mn, Fe, Co, Ni, Cu	Mg, Si, K, Ti
	низ lower	Ca, Cr, Co, Ni, Cu, Sr	Al, Si, K
As	верх upper	—	Mg, S, Ba, Pb
	середина middle	Si	Mg, K, Ca, V, Fe, Pb
	низ lower	Cu	Al, Cl, Pb
Sr	верх upper	S, Mn, Ni, Zn, Ba, Pb	Mg, Si
	середина middle	Cl, Co	Al
	низ lower	P, S, Ni, Zn, Pb	K, Ti
Ba	верх upper	Cu, Zn, Sr, Pb	As
	середина middle	Ca, V, Mn, Ni, Cu	Ti
	низ lower	Si, P, K, V	Cr
Pb	верх upper	Cu, Sr, Ba	Si, P, Ti, As
	середина middle	Ca, V, Fe, Ni, Cu	Si, As
	низ lower	Mg, P, Fe, Ni, Sr	As

Обсуждение

Впервые приводятся количественные сведения о распределении 21 элемента на поверхности разных частей подециев напочвенного кустистого лишайника *C. rangiferina*. Последовательность расположения по убыванию долей (%) элементов на поверхности подециев лишайника с Баргузинского хребта отличается от аналогичного показателя для верхней части континентальной земной коры (см. табл. 2). Имеются определенные различия и с соотношением совпадающих с нашими данными элементов в телах того же вида из заповедных территорий США, в которых последовательность расположения по убыванию концентрации элементов выглядит как K > Ca > P > S > Fe > Al > Mg > Mn > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr (Bennett, 2008), хотя Ni и Cr, как и на поверхности лишайника с Баргузинского хребта, также находятся в конце ряда, соответствующего той или иной высоте подеция (см. табл. 2). Обращает на себя внимание, что в измеренных нами образцах мышьяк (As) и, особенно, свинец (Pb), в сравнении с земной корой, на всех высотных уровнях находятся ближе к началу рядов последовательностей по убыванию (см. табл. 2). И именно у этих элементов наиболее высокие значения фактора обогащения (EFT_i) на поверхностях всех частей подециев (см. табл. 1). Повышенные величины EFT_i также у P, Co, Ni, Cu, Zn. Подобный показатель элементов обычно интерпретируют как дополнительное поступление таких элементов от источников загрязнения (Garty, 2001; Osyczka et al., 2016). Поскольку в радиусе около 100 км от места сбора измеренных нами лишайников такие источники отсутствовали, можно предполагать, что высокие величины EFT_i у названных выше элементов обусловлены дальним переносом выбросов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината в Бурятии или предприятий, расположенных западнее озера Байкал в Иркутской области. Нельзя исключать и то, что высокие величины EFT_i в месте сбора лишайников свидетельствуют о возможном залегании здесь полиметаллических руд (Брукс, 1986; Ковалевский, 1991; Саэт и др., 1990). У всех элементов величина EFT_i наиболее высокая на поверхности средней части подециев и наименьшая – в нижней (см. табл. 1).

Величина суммарной доли обнаруженных на поверхностях подециев элементов и вносящих в нее основной вклад Ca, Si, Fe, а также Ti, Cr, Mn, Co, Cu, Ba увеличивается с удалением от верхушки подециев к их нижней части, тогда как величины долей P, S, Cl, K значимо выше на поверхности верхней части подециев (см. табл. 1). Между величинами долей Mg, V, Ni, As, Pb с разных высотных уровней статистически значимых различий не обнаружено. Поскольку сведения о распределении элементов на поверхности разных частей кустистых лишайников нам не доступны, мы вынуждены сравнивать наши результаты с данными о концентрации элементов в телях разных частей подециев представителей видов рода *Cladonia*, четко представляя различия между механизмами поступления элементов на поверхность подециев и в их тела (обзоры см.: Бязров, 2002, 2005). В Венгрии в 27 км южнее города Будапешта после 10 недель экспонирования вида *C. furcata* концентрации большинства элементов (Al, Fe, Co, Cr, Cu, Mn, Pb, Ti), как и сумма элементов, были значимо выше в массе нижних частей подециев, и только концентрация K в массе верхней части подециев на 23 % превышала этот показатель для нижней части (Tuba et al., 1994). У лишайников *C. cariosa*, *C. pyxidata*, *C. rei*, собранных в Польше с территорий, где прежде добывали и перерабатывали цинк и свинец, концентрации Zn, Pb, Cd, As, Cu (другие элементы не измеряли) были значимо выше в массе также нижних частей подециев (Osyczka et al., 2016).

Гораздо больше сведений о вертикальном градиенте распределения радионуклидов в подециях ягельных лишайников, являющихся частью пищевой цепи «лишайник → олень → человек» (обзор см.: Бязров, 2005). В Российской Арктике в конце 1964 г. активность ^{137}Cs в массе верхней части подециев ягельных лишайников была почти в 5 раз выше, чем в нижней; в то же время распределение ^{90}Sr , ^{210}Pb , ^{210}Po по высоте тех же лишайников было относительно равномерным. Эксперименты подтвердили натурные наблюдения. После погружения в водные растворы с ^{137}Cs и ^{90}Sr талломов кустистого лишайника *C. rangiferina* радиоцезий в основном накапливался в верхушечных, наиболее

молодых, частях слоевища, а в нижних, самых старых, частях содержание этого изотопа составляло лишь 5 % от его содержание в верхушечных частях, тогда как содержание радиостронция во всех частях слоевища было примерно одинаковым. Измерение активностей тех же радионуклидов в разных по высоте кустика чащах слоевищ *C. rangiferina*, собранных зимой 1964/65 г. в тундре, дало сходные результаты: отношение активностей $^{137}\text{Cs}:^{90}\text{Sr}$ в 1-см отрезках от вершины до основания было 10; 6.1; 4.5; 3.2 (Nevstrueva et al., 1967), что свидетельствует о более высокой подвижности ^{90}Sr в сравнении с ^{137}Cs . Разная степень подвижности в телах лишайников установлена и для других радиоизотопов (обзор см.: Бязров, 2005).

Наблюдаемые количественные различия в распределении отдельных радионуклидов, например ^{137}Cs , связывают с морфологией конкретных особей – чем плотнее, компактнее верхушечная часть растений, тем меньше ^{137}Cs в нижних частях подециев ягельных лишайников. Такое объяснение создает впечатление, что плотная компактная верхушечная часть механически препятствует проникновению некоторых радионуклидов в нижележащие слои лишайникового покрова. Но не всех, поскольку некоторые радиоизотопы (^{90}Sr , ^{210}Pb , ^{210}Po и др.) распределены по высоте подециев кладоний либо равномерно, либо больше в нижней их части. Радионуклиды, в зависимости от глубины их проникновения в покров ягельных лишайников, ранжируют следующим образом: $^{144}\text{Ce} > ^{95}\text{Zr} > ^{137}\text{Cs} > ^{106}\text{Ru} > ^{155}\text{Eu} > ^{210}\text{Pb} > ^{99}\text{Tc} > ^{238}\text{Pu} > ^{125}\text{Sb} > ^{239,240}\text{Pu}$, т. е. в этом ряду наименее подвижен радиоцерий (Holm, Rioseco, 1987). Подобное ранжирование после накопления достаточных данных, вероятно, можно будет установить и для стабильных изотопов, поскольку наши результаты свидетельствуют, что ряд элементов (Р, S, Cl, K) сконцентрированы на поверхности верхушечных частей подециев.

Известно, что ^{137}Cs является химическим аналогом стабильного К, и в биогеохимическом обмене, в том числе и в тканях живых организмов, первый может занять место второго. Поэтому интересно, что как К на поверхности подециев наших образцов, так и ^{137}Cs из глобальных выпадений после ядерных испытаний в середине XX века имеют более высокие количественные показатели в верхней части ягельного лишайника, а Са, химический аналог ^{90}Sr , – в нижней части подециев. Как и приведенное ранее отношение $^{137}\text{Cs}:^{90}\text{Sr}$ в разных по высоте частях *C. rangiferina* из тундры, отношение К:Са на поверхности измеренных нами подециев из Бурятии последовательно уменьшается от верхушки к основанию (0.49; 0.17; 0.08).

Полагают, что значимые ($p \leq 0.05$) величины коэффициента корреляции Пирсона между количественными показателями элементов в телах лишайников указывают на общий источник поступления таких элементов (Adamo et al., 2003; Garty, 2001). В нашем случае (см. табл. 3), вероятно, Mg, Al, Si, K, Ca, Cr, Mn, Fe попали на поверхность подециев с поверхности почвы. Другой общий источник у Р и S, между величинами долей которых на поверхности всех трех высотных уровней подециев *C. rangiferina* значения коэффициента корреляции ($p \leq 0.05$) положительные, а отрицательные его значения на всех уровнях выявлены между долями Si и Zn, а также между As и Pb, причем у последней пары, судя по приведенным ранее величинам коэффициента, среди выявленных элементов наиболее высокая степень антагонизма на всех уровнях. А в Тибете между количественными показателями этих элементов в слоевищах лишайников связь очень высокая ($p \leq 0.01$) (Shao et al., 2016). В верхушечной части только у As не обнаружено значимых положительных величин коэффициента, в средней части – у Mg, Ti. В нижней части у всех элементов в той или иной степени были значимые положительные показатели коэффициента. Значимые отрицательные величины коэффициента корреляции в верхушечной части подециев не показали Cl, Ca, V, Fe; в нижней – Mg, P, S, V, Co, Cu; в средней части такие элементы отсутствовали.

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют, что не разрушающая образец микрорентгеновская флуоресцентная спектроскопия позволяет получать количественные и качественные сведения о составе, соотношении химических элементов и их распределении на поверхности подециев на почвенного ягельного лишайника *C. rangiferina*. Величины долей большинства

измеренных нами элементов выше на поверхности нижней части подециев, старшей по возрасту, в сравнении с верхушечной. Однако выявлены элементы, доля которых больше на поверхностях верхушечной части подециев. Эти данные в целом соответствуют характеру распределения стабильных и радиоактивных изотопов в массе подециев как ягельных, так и других видов лишайников рода *Cladonia*, установленному исследователями, использовавшими инструментарий, требующий разрушения образца при его подготовке для измерения.

Соотношение выявленных химических элементов на поверхностях *C. rangiferina* отличается от их соотношения в верхней части континентальной земной коры. Вероятно, это связано как с региональными особенностями, так и свойствами биологического субстрата, каковым для элементов является поверхность лишайника. Очень высокие величины фактора обогащения у As, Pb и повышенные у P, Co, Ni, Cu, Zn дают основание предполагать, что часть их количества поступила в место сбора лишайников либо в результате дальнего переноса выбросов предприятий Бурятии и Иркутской области, либо вблизи имеется месторождение полиметаллической руды.

Использование микрорентгенофлуоресцентного спектрометра упростило проподготовку и значительно снизило затраты времени на измерение. Исследованные подеции *C. rangiferina* остались неповрежденными, и они могут быть использованы для выяснения других особенностей распределения элементов в слоевище, в том числе и в их массе.

Уместно предупредить, что при рассмотрении представленных здесь данных следует иметь в виду, что химические элементы, размер частиц которых был менее 20 μm , использованный нами спектрометр количественно не фиксировал, поэтому ряд элементов на поверхности подециев, вероятно, остались неучтеными.

Результаты исследования подтверждают высказанные ранее рекомендации (Бязров, 2002, 2005; Бязров, Пельгунова, 2013), что при использовании лишайников в сравнительных исследованиях как акцепторов элементов и соединений для измерения необходимо ориентироваться на слоевища одного возраста, поскольку наблюдаются количественные различия между элементами в молодых (верхушечных) и более старых (нижних) частях слоевищ кустистых лишайников.

Библиография

- Андреев В. Н. Прирост кормовых лишайников и приемы его регулирования // Труды Ботанического института АН СССР. Сер. 3. Геоботаника. 1954. Вып. 9. С. 11–74.
- Брукс Р. Р. Биологические методы поиска полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 311 с.
- Бязров Л. Г. Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения. М.: КМК, 2005. 476 с.
- Бязров Л. Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
- Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Оценка соотношения некоторых элементов и их распределения на поверхности слоевища лихенизированного гриба *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. не разрушающим образец микрорентгенофлуоресцентным спектрометром (μ -РФС) M4 Tornado // Принципы экологии. 2013. Т. 2. № 3. С. 37–52. URL: <http://ecopri.ru> (дата обращения 15.05.2014).
- Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Концентрация свинца (Pb) в слоевищах лишайника *Xanthoria parietina* с разных участков присоединенной в 2012 г. к Москве территории // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. биол. 2015а. Т. 120. Вып. 2. С. 49–57.
- Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Микрорентгенофлуоресцентная спектрометрия содержания химических элементов на поверхностях вегетативных частей и плодовых органов лихенизированных грибов семейства *Teloschistaceae* // Журнал прикладной спектроскопии. 2015б. Т. 82. С. 883–887.
- Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Об аккумулировании элементов на поверхностях вегетативного тела и плодовых органов (апотециев) лихенизированного гриба *Xanthoria parietina* // Современная микология в России: Материалы III Международного микологического форума. М.: Нац. акад. микологии, 2015в. Т. 4. С. 334–336.
- Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Пространственное распределение концентрации ряда элементов в слоевищах лишайника *Xanthoria parietina* на присоединенной в 2012 году к Москве территории // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2015г. Т. 25. С. 123–144.
- Бязров Л. Г., Пельгунова Л. А. Состав и соотношение элементов на поверхности корковых лишайников с опытного поля бывшего Семипалатинского испытательного полигона и из

- города Курчатов (Республика Казахстан) // Аридные экосистемы. 2015д. Т. 21. № 2 (63). С. 62–70.
- Голубкова Н. С., Бязров Л. Г. Жизненные формы лишайников и лихеносинузии // Ботанический журнал. 1989. Т. 74. С. 794–805.
- Григорьев Н. А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих верхнюю часть континентальной коры // Геохимия. 2003. № 7. С. 785–792.
- Ковалевский А. Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. 294 с.
- Михайлова И. Н., Кшнясов И. А. Содержание тяжелых металлов в талломах лишайника *Hypogymnia physodes*: источники гетерогенности // Сибирский экологический журнал. 2012. № 3. С. 423–428.
- Михайлова И. Н., Шарунова И. П. Динамика аккумуляции тяжелых металлов в талломах эпифитного лишайника *Hypogymnia physodes* // Экология. 2008. № 5. С. 366–372.
- Общероссийский классификатор ингредиентов выбросов вредных веществ . URL: <http://citysoft.mosmap.ru/ClassIng/ClassIng.htm> (дата обращения 15.02.2016).
- Саэт Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Л. Н., Трефилова Н. Я., Ачкасов А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды . М.: Недра, 1990. 335 с.
- Aastrup P., Riget F., Dietz R., Asmund G. Lead, zinc, cadmium, mercury, selenium and copper in Greenland caribou and reindeer (*Rangifer tarandus*) // The Science of the Total Environment. 2000. Vol. 245. P. 149–159.
- Adamo P., Giordano S., Vingiani S., Cobianchi R.C., Violante P. Trace element accumulation by moss and lichen exposed in bags in the city of Naples (Italy) // Environmental Pollution. 2003. Vol. 122. P. 91–103.
- Backor M., Kovacik J., Piovar J., Pisani T., Loppi S. Physiological aspects of cadmium and nickel toxicity in the lichens *Peltigera rufescens* and *Cladina arbuscula* subsp. *mitis* // Water Air Soil Pollut. 2010. Vol. 207. P. 253–262. doi: 10.1007/s11270-009-0133-6.
- Bargagli R., Iosco F. P., D'Amato M. L. Zonation of trace metal accumulation in three species of epiphytic lichens belonging to the genus *Parmelia* // Cryptogamie, Bryologie, Lichenologie. 1987. Vol. 8. P. 331–337.
- Bennett J. P. Discrimination of lichen genera and species using element concentrations // Lichenologist. 2008. Vol. 40. P. 135–151. doi: 10.1017/S0024282908007445.
- Bontempi E., Bertuzzi R., Ferretti E., Zucca M., Apostoli P., Tenini S., Depero L. E. Micro X-ray fluorescence as a potential technique to monitor in-situ air pollution // Microchim Acta. 2008. Vol. 161. P. 301–305. doi: 10.1007/s00604-007-0903-z.
- Courtois R., Ouellet J. P., Breton L., Gingras A., Dussault C. Effects of forest disturbance on density, space use, and mortality of woodland caribou // Ecoscience. 2007. Vol. 14. P. 491–498.
- Ecoregions. World Wildlife Funds. 2001. URL: www.worldwildlife.org/ ecoregions/ ecoregions_map.htm (дата обращения 23.06.2004).
- Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application // Crit. Rev. Plant Sci. 2001. Vol. 20. P. 309–371. doi: 10.1080/20013591099254.
- Holm E., Rioseco J. 99Tc in the sub-arctic food chain lichen-reindeer-man // J. Environ. Radioact. 1987. Vol. 5. P. 343–357.
- Kumar A., Singh N., Gaurav S. S. Bioremediation of metal contaminated sites by natural growing lichens found in hilly areas of Himachal Pradesh // Int. J. Curr. Res. 2012. Vol. 4. P. 167–168.
- Loppi S., Nelli L., Ancora S., Bargagli R. Accumulation of trace elements in the peripheral and central parts of a foliose lichen thallus // Bryologist. 1997. Vol. 100. P. 251–253.
- Nash T. H. Lichen Biology. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 486 p.
- Nevstrueva M. A., Ramzaev P. V., Moiseev A. A., Ibatullin M. S., Teplykh L. A. The nature of 137Cs and 90Sr transport over the lichen-reindeer-man food chain // Radioecological concentration Processes: Proceedings of International Symposium held in Stockholm 25–29 April, 1966. Oxford: Pergamon Press, 1967. P. 209–215.
- Nimis P. L., Andreussi S., Pittao E. The performance of two lichen species as bioaccumulators of trace metals // The Science of the Total Environment. 2001. Vol. 275. P. 43–51.
- Oszyczka P., Rola K., Jankowska K. Vertical concentration gradients of heavy metals in *Cladonia* lichens across different parts of thalli // Ecological Indicators. 2016. Vol. 61. P. 766–776. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.028.
- Purvis O. W., Williamson B. J., Spiro B., Udachin V., Mikhailova I. N., Dolgopolova A. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash. Russia // Pirrie D., Ruffell A., Dawson L. A. (eds.). Environmental and criminal geoforensics. Geological society. London, 2013. Special publications № 384. URL: <http://dx.doi.org/10.1144/SP384.6> (дата обращения 29.02.2016).
- Shao J. J., Shi J. B., Duo B., Liu C. B., Gao Y., Fu J. J., Yang R. Q., Cai Y., Jiang G. B. Trace metal profiles in mosses and lichens from the high-altitude Tibetan Plateau // RSC Advances. 2016. Vol. 6. P. 541–546. doi: 10.1039/c5ra21920e.

- St. Clair S. B., St. Clair L. L., Mangelson N. F., Weber D. J. Influence of growth form on the accumulation of airborne copper by lichens // Atmos. Environ. 2002a. Vol. 36. P. 5637–5644.
- St. Clair S. B., St. Clair L. L., Mangelson N. F., Weber D. J., Eggett D. L. Element accumulation patterns in foliose and fruticose lichens from rock and bark substrates in Arizona // Bryologist. 2002b. Vol. 105. P. 415–421.
- Tuba Z., Csintalan Z., Nagy Z., Szente K., Takacs Z. Sampling of terricolous lichen and moss species for trace element analysis, with special reference to bioindication of air pollution // Markert B. (ed.). Environmental Sampling for Trace Analysis. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Weinheim, 1994. P. 415–434.
- Williamson B. J., Mikhailova I., Purvis O. W., Udachin V. SEM-EDX analysis in the source apportionment of particulate matter on *Hypogymnia physodes* lichen transplants around the Cu smelter and former mining town of Karabash, South Urals, Russia // The Science of the Total Environment. 2004. Vol. 322. P. 139–154. doi: 10.1016/j.scitotenv.2003.09.021.

Благодарности

Работа выполнена по плану НИР Лаборатории экологического мониторинга в регионах АЭС и биоиндикации Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН.

COMPOSITION AND RATIO OF THE CHEMICAL ELEMENTS ON THE SURFACES DIFFERENT BY HEIGHT OF REINDEER LICHEN PODETIA *CLADONIA RANGIFERINA*

BYAZROV
Lev

Institute of ecology & evolution RAS, lev.biazrov@rambler.ru

PEL
Lyubov

Institute of ecology & evolution RAS, platon@sevin.ru

Key words:
Lichens
Cladonia rangiferina
surface of podetia
 μ -XRF
composition of elements
distribution of elements
vertical gradient
 $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$
 K/Ca
enrichment factor
Barguzinsky chain

Summary: In the paper the composition of 21 elements – Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Ba, Pb – was compared in the upper, central, and lower parts of podetia surfaces of the reindeer lichen *Cladonia rangiferina*, sampled on the slope of Barguzinsky chain. For the measurement of the elements content (%), a sample-nondestructive μ -XRF spectrometer was used. It was stated that the share (%) of the most elements, except for Cu and Zn, was highly variable. The content of the elements on the surfaces differs significantly between the studied parts of *C. rangiferina* podetia: mean values of the content of P, S, Cl, and K were statistically higher on the surface of the upper part of podetia, while those of Al, Si, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Co, and the total content – on the surface of the lower part of podetia. On all the parts of podetia very high value of the enrichment factor for As and Pb was established, and it was increased for P, Co, Ni, Cu, Zn.

Reviewer: A. V. Sonine

Received on: 21 March 2016

Published on: 19 May 2016

References

- Andreev V. N. Growth of forage lichens and methods of improving it, Trudy Botanicheskogo instituta AN SSSR. Ser. 3. Geobotanika. 1954. Vyp. 9. P. 11–74.
- Bruks R. R. Biological approaches to the vast fossil hunt. M.: Nedra, 1986. 311 p.
- Byazrov L. G. Lichens as indicators of radioactive contamination. M.: KMK, 2005. 476 p.
- Byazrov L. G. Lichens in ecological monitoring. M.: Nauchnyy mir, 2002. 336 p.
- Byazrov L. G. Pel'gunova L. A. Estimation of the proportion of some elements and their distribution on a surface of thallus of lichenized fungus *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. using sample-nondestructive μ -XRF spectrometer M4 Tornado, Principy ekologii. 2013. T. 2. No. 3. P. 37–52. URL: <http://ecopri.ru> (data obrascheniya 15.05.2014).
- Byazrov L. G. Pel'gunova L. A. Concentration of lead (Pb) in thalli of lichen *Xanthoria parietina* from different plots of area integrated to Moscow city territory in 2012, Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otd. biol. 2015a. T. 120. Vyp. 2. P. 49–57.
- Byazrov L. G. Pel'gunova L. A. Micro-X-Ray fluorescence spectrometry of the chemical elements composition on the surfaces of the vegetative parts and terfases of lichenized fungi of the family Teloschistaceae, Zhurnal prikladnoy spektroskopii. 2015b. T. 82. P. 883–887.
- Byazrov L. G. Pel'gunova L. A. About accumulation of elements on surfaces of vegetative parts and fruit bodies (apothecia) of lichenized fungi *Xanthoria parietina*, Sovremennaya mikologiya v Rossii: Materialy III Mezhdunarodnogo mikologicheskogo foruma. M.: Nac. akad. mikologii, 2015v. T. 4. P. 334–336.

- Byazrov L. G. Pel'gunova L. A. Spatial distribution of concentrations of some elements in thalli of lichen *Xanthoria parietina* at the area merged with the Moscow city in 2012, Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. 2015g. T. 25. P. 123–144.
- Byazrov L. G. Pel'gunova L. A. Composition and proportion of elements on apothecia discus of crustose lichens from an experimental field of the former Semipalatinsk test site and from Kurchatov town (the Republic of Kazakhstan), Aridnye ekosistemy. 2015d. T. 21. No. 2 (63). P. 62–70.
- Golubkova N. S. Byazrov L. G. The life forms of lichens and lichen synusium, Botanicheskiy zhurnal. 1989. T. 74. P. 794–805.
- Grigor'ev N. A. The mean chemical composition of rocks of upper continental crust, Geohimiya. 2003. No. 7. P. 785–792.
- Kovalevskiy A. L. Biogeochemistry of plants. Novosibirsk: Nauka, 1991. 294 p.
- Mihaylova I. N. Kshnyasev I. A. Heavy metals content in thalli of Hypogymnia physodes lichen: sources of heterogeneity, Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2012. No. 3. P. 423–428.
- Mihaylova I. N. Sharunova I. P. Dynamics of heavy metal accumulation in thalli of the epiphytic lichen Hypogymnia physodes, Ekologiya. 2008. No. 5. P. 366–372.
- Russian classificatory of ingredients of unsalutary substances emissions. URL: <http://citysoft.mosmap.ru/ClassIng/ClassIng.htm> (data obrascheniya 15.02.2016).
- Saet Yu. E. Revich B. A. Yanin E. P. Smirnova R. S. Basharkevich I. L. Onischenko T. L. Pavlova L. N. Tre-filova N. Ya. Achkasov A. I. Sarkisyan S. Sh. Geochemistry of an environment. M.: Nedra, 1990. 335 p.
- Aastrup P., Riget F., Dietz R., Asmund G. Lead, zinc, cadmium, mercury, selenium and copper in Greenland caribou and reindeer (*Rangifer tarandus*), The Science of the Total Environment. 2000. Vol. 245. P. 149–159.
- Adamo P., Giordano S., Vingiani S., Cobianchi R.C., Violante P. Trace element accumulation by moss and lichen exposed in bags in the city of Naples (Italy), Environmental Pollution. 2003. Vol. 122. P. 91–103.
- Backor M., Kovacik J., Piovar J., Pisani T., Loppi S. Physiological aspects of cadmium and nickel toxicity in the lichens *Peltigera rufescens* and *Cladina arbuscula* subsp. *mitis*, Water Air Soil Pollut. 2010. Vol. 207. P. 253–262. doi: 10.1007/s11270-009-0133-6.
- Bargagli R., Iosco F. P., D'Amato M. L. Zonation of trace metal accumulation in three species of epiphytic lichens belonging to the genus *Parmelia*, Cryptogamie, Bryologie, Lichenologie. 1987. Vol. 8. P. 331–337.
- Bennett J. P. Discrimination of lichen genera and species using element concentrations, Lichenologist. 2008. Vol. 40. P. 135–151. doi: 10.1017/S0024282908007445.
- Bontempi E., Bertuzzi R., Ferretti E., Zucca M., Apostoli P., Tenini S., Depero L. E. Micro X-ray fluorescence as a potential technique to monitor in-situ air pollution, Microchim Acta. 2008. Vol. 161. P. 301–305. doi: 10.1007/s00604-007-0903-z.
- Courtois R., Ouellet J. P., Breton L., Gingras A., Dussault C. Effects of forest disturbance on density, space use, and mortality of woodland caribou, Ecoscience. 2007. Vol. 14. P. 491–498.
- Ecoregions. World Wildlife Funds. 2001. URL: www.worldwildlife.org/ ecoregions/ ecoregions_map.htm (data obrascheniya 23.06.2004).
- Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: theory and application, Crit. Rev. Plant Sci. 2001. Vol. 20. P. 309–371. doi: 10.1080/20013591099254.
- Holm E., Rioseco J. ⁹⁹Tc in the sub-arctic food chain lichen-reindeer-man, J. Environ. Radioact. 1987. Vol. 5. P. 343–357.
- Kumar A., Singh N., Gaurav S. S. Bioremediation of metal contaminated sites by natural growing lichens found in hilly areas of Himachal Pradesh, Int. J. Curr. Res. 2012. Vol. 4. P. 167–168.
- Loppi S., Nelli L., Ancora S., Bargagli R. Accumulation of trace elements in the peripheral and central parts of a foliose lichen thallus, Bryologist. 1997. Vol. 100. P. 251–253.
- Nash T. H. Lichen Biology. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 486 p.
- Nevstrueva M. A., Ramzaev P. V., Moiseev A. A., Ibatullin M. S., Teplykh L. A. The nature of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr transport over the lichen-reindeer-man food chain, Radioecological concentration Processes: Proceedings of International Symposium held in Stockholm 25–29 April, 1966. Oxford: Pergamon Press, 1967. P. 209–215.
- Nimis P. L., Andreussi S., Pittao E. The performance of two lichen species as bioaccumulators of trace metals, The Science of the Total Environment. 2001. Vol. 275. P. 43–51.
- Osyczka P., Rola K., Jankowska K. Vertical concentration gradients of heavy metals in *Cladonia* lichens across different parts of thalli, Ecological Indicators. 2016. Vol. 61. P. 766–776. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.028.
- Purvis O. W., Williamson B. J., Spiro B., Udachin V., Mikhailova I. N., Dolgopolova A. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash. Russia, Pirrie D., Ruffell A., Dawson L. A. (eds.). Environmental and criminal geoforensics. Geological society. London, 2013. Special publications No. 384. URL: <http://dx.doi.org/10.1144/SP384.6> (data obrascheniya 29.02.2016).

- Shao J. J., Shi J. B., Duo B., Liu C. B., Gao Y., Fu J. J., Yang R. Q., Cai Y., Jiang G. B. Trace metal profiles in mosses and lichens from the high-altitude Tibetan Plateau, RSC Advances. 2016. Vol. 6. P. 541–546. doi: 10.1039/c5ra21920e.
- St. Clair S. B., St. Clair L. L., Mangelson N. F., Weber D. J. Influence of growth form on the accumulation of airborne copper by lichens, Atmos. Environ. 2002a. Vol. 36. P. 5637–5644.
- St. Clair S. B., St. Clair L. L., Mangelson N. F., Weber D. J., Eggett D. L. Element accumulation patterns in foliose and fruticose lichens from rock and bark substrates in Arizona, Bryologist. 2002b. Vol. 105. P. 415–421.
- Tuba Z., Csintalan Z., Nagy Z., Szente K., Takacs Z. Sampling of terricolous lichen and moss species for trace element analysis, with special reference to bioindication of air pollution, Markert B. (ed.). Environmental Sampling for Trace Analysis. VCH Verlagsgesellschaft mbH. Weinheim, 1994. P. 415–434.
- Williamson B. J., Mikhailova I., Purvis O. W., Udachin V. SEM-EDX analysis in the source apportionment of particulate matter on *Hypogymnia physodes* lichen transplants around the Cu smelter and former mining town of Karabash, South Urals, Russia, The Science of the Total Environment. 2004. Vol. 322. P. 139–154. doi: 10.1016/j.scitotenv.2003.09.021.