

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ  
РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ  
В ТАЛЛОМАХ ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКОВ  
В СОСНЯКЕ КУСТАРНИЧКОВО-ЗЕЛЕНОМОШНОМ  
(ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ПРИЛАДОЖЬЕ)

© 2022 г. М. Н. Катаева<sup>1</sup> \*, А. И. Беляева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: mkmarikat@gmail.com

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

После доработки 06.04.2022 г.

Принята к публикации 06.10.2022 г.

Изучено содержание металлов (Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Pb и Cd) в талломах лишайников *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. и *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb., растущих в кустарничково-зеленомошном сосняке на стволах сосны (*Pinus sylvestris* L.) и можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.). В талломах изученных видов лишайников, произрастающих на можжевельнике в ярусе подлеска соснового леса по сравнению с лишайниками на стволах сосны, повышено содержание биогенного элемента – Fe (в 1.7–2.2 раза), а также тяжелых металлов – Ni (во всех изученных видах), Pb и Cd (в *Hypogymnia physodes*). В талломах лишайников листоватой жизненной формы (*Hypogymnia physodes* и *Platismatia glauca*) содержание Fe, Ni, Pb и Cd является более высоким, чем в талломах кустистого лишайника *Bryoria fuscescens*. Концентрации тяжелых металлов в эпифитных лишайниках в изученном сообществе близки к соответствующим показателям, установленным в среднетаежных лесах Карелии, не испытывающих влияния загрязнения. В талломах лишайников листоватой жизненной формы, особенно *H. physodes*, выявлено более высокое содержание металлов Fe, Mn, Zn, Ni, Cu и Pb по сравнению с субстратом – коркой стволов форофитов.

**Ключевые слова:** эпифитные лишайники, *Hypogymnia physodes*, *Bryoria fuscescens*, *Platismatia glauca*, концентрации микроэлементов, подзона средней тайги, юго-восточное Приладожье

DOI: 10.31857/S0033994622040069

Техногенное загрязнение экосистем в настоящее время становится все более значимым экологическим фактором. Интерес к изучению экологических особенностей эпифитных лишайников определяется их особой ролью в лесных сообществах, как компонента наиболее чувствительного к действию загрязнения.

В лесных экосистемах определяющую роль в биогеохимическом круговороте элементов играют эдификаторы – древесные растения [1, 2]. Структура древесного яруса фитоценоза и строение крон – фактор, определяющий состояние эпифитных лишайников, содержание в них зольных элементов, накопление тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd, Pb). С промышленными выбросами кислотообразующие вещества (диоксид серы, оксиды азота) и тяжелые металлы с высокой токсичностью распространяются на значительные расстояния, вызывая загрязнение среды в отдаленных регионах. Для оценки уровня загрязнения необходимы данные по элементному составу лишай-

ников в естественных лесных сообществах, не подверженных влиянию загрязнения.

Полог леса преобразует поток атмосферной миграции веществ. В результате прохождения осадков через лесной полог изменяется их состав и кислотность. Известно, что наиболее подвижные элементы (K, Ca, Mg, Mn, Fe) вымываются из крон [2, 3]. В лесных сообществах с атмосферными осадками, обогащенными химическими элементами природного и техногенного происхождения, в почву поступают растворенные химические вещества [2, 4–10]. Состав дождевых осадков, по сравнению со снеговыми, варьирует сильнее. Под пологом леса в осадках в наибольшей степени изменяется содержание биогенных элементов, в частности Mn и Fe, из-за вымывания из крон и с поверхности стволов. На фоновой территории в заповеднике “Кивач” (Республика Карелия) установлено, что содержание Mn в осадках под кронами сосны возрастает в 5.2 раза, Fe – в 2 раза по сравнению с открытым местом [5].

Отмечалось и более значительное увеличение концентраций Mn — в 16.6 раз (до 43.2 мкг/л), Fe — в 6.5 раз (до 120 мкг/л) [6, 7]. Для других элементов отмечено менее значительное влияние крон. Под кронами сосны была обнаружена тенденция к возрастанию в осадках концентраций Pb [6, 7]. На фоновую территорию заповедника “Кивач” выпадают слабокислые осадки, характерные для этого региона (рН 5.2). Под пологом соснового леса в сезон вегетации за счет обогащения осадков органическими и минеральными веществами с поверхности хвои выпадающие осадки подкисляются на 0.7–0.8 единиц рН [5, 6]. Кислая реакция осадков под пологом леса имеет важное экологическое значение, поскольку повышает растворимость тяжелых металлов, усиливает их вымывание из крон и миграцию.

В лесном пологе осадки задерживаются кронами и поступают к нижним ярусам неравномерно. Полог соснового леса в подзоне средней тайги задерживает в кронах 28–42% осадков [11, 12]. В северной тайге под полог редкостойного соснового леса за лето проникает значительная часть осадков, в среднем 76% от открытого места, при этом высокое расположение крон сосны способствует рассеиванию осадков [13]. У края крон сосен количество осадков выше — до 85%, в середине подкоронового пространства оно уменьшается до 72% [14].

Полог соснового древостоя создает особые экологические условия для яруса подлеска, к которому поступают осадки, прошедшие через кроны сосны. В ярусе подлеска сосновых лесов часто встречается можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.) кустарничковой жизненной формы [15]. Компактное строение кроны можжевельника и высокий индекс поверхности хвои может влиять на накопление металлов в эпифитных лишайниках, растущих на можжевельнике. Густо охвоенная крона можжевельника, по-видимому, имеет способность концентрировать осадки, в том числе конденсационные осадки из водных паров, что, вероятно, и приводит к более высокому содержанию элементов в лишайниках. По сравнению с открытым местом, в лишайниках, растущих на можжевельнике под пологом древостоя, обнаружено возрастание концентраций Mn [16]. Данные об экологических факторах, влияющих на жизнедеятельность эпифитных лишайников, растущих на можжевельнике, ограничены, и влияние этого форофита на лишайники мало изучено [15, 17–19].

Для оценки уровня загрязнения в подзоне средней тайги на северо-западе России на основе лишеноиндикации, нужны данные, характеризующие региональные фоновые концентрации тяжелых металлов в эпифитных лишайниках. В связи с этим, лишеноиндикационные исследования на юге Ладожско-Онежского перешейка в бас-

сейне р. Свирь представляют собой актуальную задачу. Разнообразие видов лишайников на этой территории связано с произрастанием здесь массивов малонарушенных, старовозрастных хвойных лесов, в том числе сосняков кустарничково-зеленомошных [1, 2].

Эпифитные лишайники *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw., *Hypogymnia physodes* L.) Nyl., *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. — типичные лесные виды, произрастающие на сосне и можжевельнике, они широко распространены в лесах среднетаежной подзоны.

Цель работы состояла в оценке особенностей аккумуляции тяжелых металлов эпифитными лишайниками сем. Parmeliaceae, произрастающими на разных форофитах — сосне обыкновенной и можжевельнике обыкновенном, в условиях среднетаежного соснового фитоценоза.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования элементного химического состава эпифитных лишайников были проведены в подзоне средней тайги на юго-восточном побережье Ладожского озера в бассейне р. Свирь (Лодейнопольский р-н Ленинградской обл.) в средневозрастном кустарничково-зеленомошном сосновом сообществе. Территория находится вне зон прямого влияния атмосферного загрязнения.

Образцы лишайников и субстратов собраны в августе 2018 г. Расстояние от берега Ладожского озера — 24 км, высота н. у. м — 25 м. Территория имеет равнинный характер. Древесный ярус изученного сообщества образует *Pinus sylvestris* L. с примесью *Betula* sp. Возраст сосны 90–100 лет, есть мелкий подрост. Средний диаметр сосны у основания стволов  $33 \pm 1$  см, на высоте 1.3 м —  $26 \pm 1.5$  см. В ярусе подлеска распространен кустарничковый можжевельник *Juniperus communis* L., присутствует рябина *Sorbus aucuparia* L. Высота можжевельника — 2.0–2.2 м, диаметр оснований стволов — 4.6–9.1 см. В напочвенном покрове преобладает *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., в травяно-кустарничковом ярусе — черника *Vaccinium myrtillus* L.

Образцы лишайников *Hypogymnia physodes*, *Bryoria fuscescens* и *Platismatia glauca* собраны со стволов 30 деревьев сосны и 8 кустов можжевельника диаметром 2.9–4.5 см в средней части кроны. Выбирали неповрежденные прямостоящие деревья сосны и крупные хорошо развитые кусты можжевельника. Высота сбора — 1.3 м по всей окружности стволов. Средняя длина таллома *Bryoria fuscescens* на сосне — 11.8 см, на можжевельнике — 8.0 см. Размеры талломов видов листоватой жизненной формы 4–5(6) см в диаметре. Для изучения свойств субстрата с каждого дерева сосны отбирали тонкий слой корки (пластины по 1–3 мм

**Таблица 1.** Содержание микроэлементов ( $m \pm sd$ , мг/кг сух. вещества) в эпифитных лишайниках на разных форофитах в сосняке кустарничково-зеленомошном на территории юго-восточного Приладожья  
**Table 1.** Content of trace elements ( $m \pm sd$ , mg/kg d.m.) in epiphytic lichens on different phorophytes in dwarf shrub-green moss pine forest of the southeastern Ladoga region

Вид, показатель Species, indicator	Элементы Element							
	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn	Fe/Mn
Ствол сосны Scots pine trunk								
<i>Bryoria fuscescens</i>	0.41 ± 0.01*	1.86 ± 0.12	0.203 ± 0.05	0.83 ± 0.01	58.9 ± 5.6*	126 ± 15	32.1 ± 1.63	0.47
<i>Hypogymnia physodes</i>	0.76 ± 0.12*	3.17 ± 0.23	0.306 ± 0.03*	2.16 ± 0.03*	197 ± 1.7	210 ± 23	46.4 ± 1.81	0.94
<i>Platismatia glauca</i>	0.66 ± 0.01*	2.25 ± 0.19	0.119 ± 0.01	1.96 ± 0.20	155 ± 3.5*	88.3 ± 3.2	20.9 ± 0.93	1.76
Среднее Mean	<b>0.61 ± 0.18</b>	<b>2.43 ± 0.67</b>	<b>0.209 ± 0.09</b>	<b>1.65 ± 0.72</b>	<b>137 ± 71</b>	<b>141 ± 62</b>	<b>33.1 ± 13</b>	1.05
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	29.6	27.7	44.7	43.5	51.7	44.0	38.6	61.9
Стволики можжевельника Juniper trunks								
<i>Bryoria fuscescens</i>	0.71 ± 0.01*	2.28 ± 0.16	0.254 ± 0.07	1.50 ± 0.12	132 ± 11*	169 ± 17	37.4 ± 1.93	0.78
<i>Hypogymnia physodes</i>	2.16 ± 0.34*	3.65 ± 0.57	0.511 ± 0.11*	4.84 ± 0.45*	358 ± 61	423 ± 183	51.8 ± 8.92	0.85
<i>Platismatia glauca</i>	1.04 ± 0.20*	2.09 ± 0.17	0.118 ± 0.01	2.77 ± 0.39	258 ± 21*	316 ± 30	22.9 ± 0.85	0.82
Среднее Mean	<b>1.30 ± 0.76</b>	<b>2.67 ± 0.85</b>	<b>0.294 ± 0.20</b>	<b>3.04 ± 1.69</b>	<b>249 ± 113</b>	<b>303 ± 128</b>	<b>37.4 ± 15</b>	0.81
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	58.3	31.8	67.8	55.5	45.4	42.1	38.7	4.0

Примечание. Звездочкой отмечены значения концентраций элементов в лишайниках на высоте 1.3 м, достоверно различающиеся на разных форофитах при  $P < 0.05$  (критерий Манна–Уитни).

Note: An asterisk marks the values of element concentrations in lichens at breast height, which differ significantly in different phorophytes at  $P < 0.05$  (Mann–Whitney test).

толщ.). У можжевельника отбирали слой корки стволиков в кроне. При низком обилии и биомассе лишайников, растущих на стволах сосны, образцы с 10 деревьев объединяли в средние пробы по видам. Анализировали образцы лишайников и корки стволиков, собранных с 8 экземпляров можжевельника, и 3 средние пробы лишайников и корки с 30 стволов сосны. В кронах сосны и можжевельника отбирали смешанные пробы хвои текущего года и однолетней хвои и в них определяли содержание химических элементов.

Образцы лишайников и их субстратов очищали от посторонних примесей, высушивали в термостате при 40 °С. Воздушно-сухую навеску 2.0–2.5 г озоляли в муфеле при 450 °С, золу растворяли в 2N HCl, образец фильтровали через фильтр “синяя лента”, объем доводили до 15 мл деионизированной водой. Содержание Mn, Fe, Zn, Cu, Ni, Cd и Pb определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре КВАНТ-АФА. Анализ образцов лишайников и субстратов делали в двукратной повторности. Кислотность водной вытяжки корки, хвои и древесины (измельченных воздушно-сухих образцов) измеряли на иономере И-160 в деионизированной воде через 24 часа в соотношении 1 : 10.

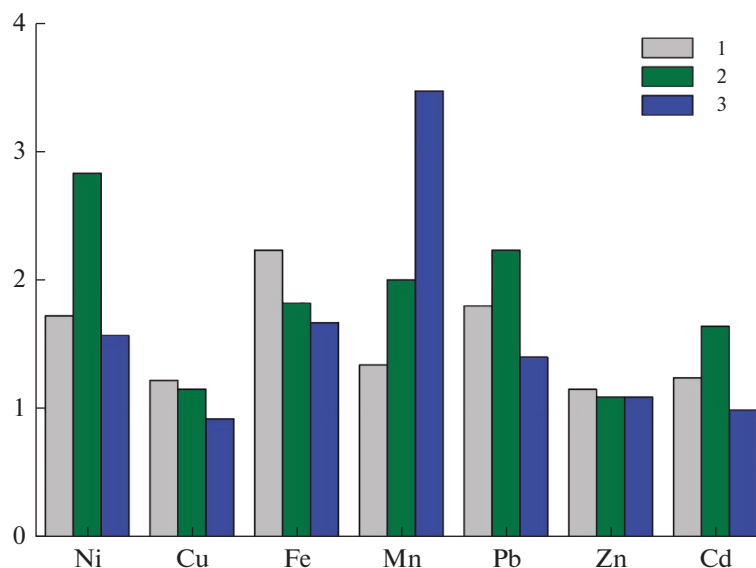
При статистической оценке различий использовали непараметрический критерий Манна–

Уитни при уровне значимости  $P < 0.05$ . Названия видов приведены согласно списку лишайников Нижне-Свирского заповедника [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа показывают, что в средне-таежном сосняке кустарничково-зеленомошном на двух изученных видах форофитов лишайники содержат довольно низкие концентрации тяжелых металлов – Ni, Cu, Cd и Pb (табл. 1). В лишайниках, растущих на разных форофитах – в кроне можжевельника и на стволах сосны, выявлены достоверные различия концентраций только четырех тяжелых металлов – Ni, Pb, Cd, а также Fe. Все виды лишайников, растущих на можжевельнике, накапливают ~ в 2 раза больше Ni, а *Hypogymnia physodes* – в 2 раза больше Pb и в 1.7 раза больше Cd, чем растущие на сосне (табл. 1). Достоверных различий в концентрациях Cu, Cd и Pb в талломах *Bryoria fuscescens* и *Platismatia glauca* на разных форофитах не выявлено.

Биогенные микроэлементы – Mn, Fe и Zn, по сравнению с более токсичными тяжелыми металлами, отличаются значительно более высокими концентрациями в эпифитных лишайниках (табл. 1). Обнаружено, что в лишайниках *Bryoria fuscescens* и *Platismatia glauca*, растущих на разных



**Рис. 1.** Соотношение средних концентраций химических элементов в эпифитных лишайниках, растущих на стволах можжевельника обыкновенного и сосны обыкновенной.

По горизонтали: химические элементы; по вертикали: соотношение концентраций.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*.

**Fig. 1.** The ratio of average concentrations of chemical elements in epiphytic lichens growing on the trunks of Scots pine and common juniper.

X-axis: chemical elements; y-axis: the ratio of concentrations.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*.

форофитах, достоверно различается содержание Fe: в кроне можжевельника оно является в 1.5–2 раза более высоким.

Соотношение концентраций изученных элементов в талломах лишайников, произрастающих на разных форофитах, представлено на рис. 1. По величине соотношения содержания элементов в лишайниках на можжевельнике и сосне выделяются Fe, Mn, Pb и Ni.

Вариабельность накопления элементов в разных видах лишайников оценивали по величине коэффициента вариации (табл. 1). Наиболее существенно варьируют концентрации Ni, Cd и Pb в лишайниках на можжевельнике (CV = 55–68%). Довольно высокий коэффициент вариации характерен для концентрации в лишайниках Fe (52% на сосне и 46% на можжевельнике), Pb (соответственно 43 и 55%) и Mn (соответственно 44 и 42%). Наиболее низкими значениями коэффициента вариации отличаются концентрации Cu в лишайниках, растущих на можжевельнике и сосне (28 и 32%) и Ni в лишайниках на сосне (~30%).

При сравнении видов лишайников, собранных в незагрязненном сообществе по накоплению металлов следует учитывать, что концентрации большинства элементов в них низкие, что приводит к трудностям в выявлении различий. Более значительные отличия обнаружены между видами лишайников разных жизненных форм. Большой способностью к биоаккумуляции ме-

таллов от других видов лишайников отличается *H. physodes*. На стволах сосны различия по содержанию Ni, Cu, Cd, Pb и Fe установлены между видами *H. physodes* и *B. fuscescens*. Листоватый лишайник *H. physodes* по сравнению с кустистым видом *B. fuscescens* накапливает в 3 раза больше Fe и в 1.5–2.6 раза больше тяжелых металлов Ni, Pb, Cu и Cd (табл. 2). Лишайники *P. glauca* и *B. fuscescens* достоверно различаются только по содержанию Cd, которое у первого вида является примерно в 2 раза более высоким.

Между видами лишайников, растущих на стволиках в кроне можжевельника, выявлено больше различий (табл. 2). В талломах *H. physodes* на можжевельнике содержание Fe и Zn является достоверно более высоким, чем в талломах *B. fuscescens* (соответственно в 2.7 и 1.4 раза) и *P. glauca* (в 1.4 и 2.3 раза). Накопление Ni и Pb достоверно различается у всех трех видов лишайников, растущих на можжевельнике. Наиболее высоким содержанием Ni и Pb, в 1.7–3 раза превышающим содержание этих элементов в талломах двух других видов, отличается *H. physodes*; наиболее низкие концентрации характерны для кустистого вида *B. fuscescens*. Концентрации Cu у *H. physodes* в 1.6–1.7 раза, а Cd – в 2–4 раза выше, чем у *B. fuscescens* и *P. glauca*. Два последних вида по содержанию этих элементов достоверно не различаются. По возрастанию концентраций ме-

**Таблица 2.** Различия концентраций микроэлементов в талломах разных видов лишайников  
**Table 2.** Differences in trace element concentrations in thalli of different lichen species

Элемент Element	<i>Bryoria fuscescens</i>	<i>Hypogymnia physodes</i>	<i>Platismatia glauca</i>
	средние концентрации ( $m \pm sd$ , мг/кг сух. вещества) mean concentration ( $m \pm sd$ , mg/kg d.m.)		
	<i>Pinus sylvestris</i>		
Ni	0.41 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.76 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.66 ± 0.01 <sup>ab</sup>
Cu	1.86 ± 0.12 <sup>a</sup>	3.17 ± 0.23 <sup>b</sup>	2.25 ± 0.19 <sup>ab</sup>
Cd	0.203 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.306 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.119 ± 0.01 <sup>c</sup>
Pb	0.83 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.16 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.96 ± 0.20 <sup>ab</sup>
Fe	58.9 ± 5.6 <sup>a</sup>	197 ± 1.7 <sup>b</sup>	155 ± 3.5 <sup>ab</sup>
Mn	126 ± 15 <sup>a</sup>	210 ± 23 <sup>a</sup>	88.3 ± 3.2 <sup>a</sup>
Zn	32.1 ± 1.63 <sup>a</sup>	46.4 ± 1.81 <sup>a</sup>	20.9 ± 0.93 <sup>a</sup>
	<i>Juniperus communis</i>		
Ni	0.71 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.16 ± 0.34 <sup>b</sup>	1.04 ± 0.20 <sup>c</sup>
Cu	2.28 ± 0.16 <sup>a</sup>	3.65 ± 0.57 <sup>b</sup>	2.09 ± 0.17 <sup>a</sup>
Cd	0.254 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.511 ± 0.11 <sup>b</sup>	0.118 ± 0.01 <sup>a</sup>
Pb	1.50 ± 0.12 <sup>a</sup>	4.84 ± 0.45 <sup>b</sup>	2.77 ± 0.39 <sup>c</sup>
Fe	132 ± 11 <sup>a</sup>	358 ± 61 <sup>b</sup>	258 ± 21 <sup>a</sup>
Mn	169 ± 17 <sup>a</sup>	423 ± 183 <sup>a</sup>	316 ± 30 <sup>a</sup>
Zn	37.4 ± 1.93 <sup>a</sup>	51.8 ± 8.92 <sup>b</sup>	22.9 ± 0.85 <sup>a</sup>

Примечание. Разными буквами в строках отмечены значения концентраций элементов, которые достоверно различаются у разных видов на каждом из форофитов при  $P < 0.05$  (критерий Манна–Уитни).

Note. Different letters in the rows indicate the values of the element concentrations that differ significantly in different species on each of the phorophytes at  $P < 0.05$  (Mann–Whitney test).

таллов в талломах изученные виды лишайников образуют ряд: *B. fuscescens* < *P. glauca* < *H. physodes*.

При использовании лишайников в целях биоиндикации загрязнения следует учитывать существенную межвидовую изменчивость накопления химических элементов. Содержание микроэлементов в талломах разных видов лишайников значительно варьирует и даже среди видов одного рода вариабельность концентраций может быть довольно высокой в связи с влиянием экологических условий. В качестве главного механизма в процессе накопления тяжелых металлов рассматриваются катионообменные свойства клеточных стенок талломов лишайников [23, 26]. Важное биологическое значение у лишайников имеет состав ферментов, их активность на разных субстратах, содержание и состав лишайниковых кислот, обладающих защитным действием от интенсивного солнечного света и испарения [27].

Накопление тяжелых металлов в лишайниках может отражать перенос промышленных выбросов с сопредельных территорий и необходимо рассмотреть роль возможных источников загрязнения. При постоянном влиянии западного пере-

носа воздушных масс в регионе [28], лесные фитоценозы вблизи Ладожского озера могут испытывать влияние аэропромвыбросов г. Санкт-Петербурга, Республики Карелии и Финляндии. Концентрации металлов в эпифитных лишайниках в изученном сообществе близки к концентрациям в средне-таежных сообществах соседнего региона Карелии. На территории Карелии в заповеднике “Кивач” концентрации металлов в лишайнике *H. physodes* близки к фоновым значениям [25]. Установленная в настоящем исследовании концентрация Cd (0.31–0.51 мг/кг) в талломах *H. physodes* не превышает концентрацию этого элемента в лишайниках на фоновых территориях Финляндии и на Европейском Северо-Востоке – 0.7 мг/кг [23, 24]. Эпифитные кустистые лишайники (*Bryoria fuscescens*, *B. capillaris*, *Usnea dasopoga*, *Alectoria sarmentosa*) в Карелии остаются сравнительно не загрязненными тяжелыми металлами [29]. Однако на широтном градиенте в Карелии выявлены территории, на которых наблюдается накопление в лишайниках загрязняющих веществ, связанное с дальним переносом от техногенных источников. Вблизи Ладожского озера в лишайниках содержится до 0.16 мг/кг Cd и 3.1 мг/кг Pb. Севернее

(Лоухский р-н Карелии, Калевальский р-н, пос. Кепа) в талломах *B. fuscescens* содержание Ni повышено до 2.8 мг/кг, Cu – до 8.4 мг/кг, что, по-видимому, связано с влиянием переноса выбросов медно-никелевых металлургических комбинатов, располагающихся на территории Кольского полуострова. В среднетаежных хвойных лесах *H. physodes* отличается более низкими концентрациями загрязнителей (Ni – в 6 раз, Cu – в 5 раз) по сравнению с северотаежным березово-сосново-еловым сообществом Кольского полуострова [16].

Условия на территории заповедников могут не соответствовать полностью фоновым в случае близкого расстояния от промышленных предприятий и при действии трансграничных переносов загрязняющих веществ. Источники загрязнения никелем, медью и свинцом в Мурманской области являются более мощными, чем в Ленинградской области. В Карелии Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК) выделяется выбросами железа, превосходящими примерно в 5 раз выбросы источников, расположенных в Санкт-Петербурге [28]. На территории, окружающей Костомукшский ГОК, поступают пыль и тяжелые металлы, в результате чего образуются зоны локального загрязнения [28, 30]. В некоторых лесных сообществах Карелии отмечались признаки влияния атмосферного загрязнения и накопление металлов (Fe, Ni, Pb, Cr, Co) во мхах и в почве [30, 31]. По элементному составу эпифитных лишайников в локальной зоне влияния на территории Карелии выявлено, в первую очередь, загрязнение Fe (превышение в 2–3 раза фоновых концентраций), в меньшей степени Ni [25, 32]. В заповеднике “Кивач” в Карелии наблюдается загрязнение эпифитных лишайников Pb (до 6.6–10 мг/кг). В южной части Карелии обнаружено повышение годового поступления со снеговыми осадками тяжелых металлов, таких как Cd и Pb [33]. Причиной, возможно, является дальний перенос загрязнителей от промышленных источников европейских стран. На большей части соседней лесной территории Финляндии в *H. physodes* выявлены, главным образом, низкие концентрации тяжелых металлов [24]. Металлургические производства на западе Финляндии и влияние городов определяют неравномерное распределение аэротехногенного загрязнения по ее территории. На юго-западе страны имеются зоны, отличающиеся наличием атмосферного загрязнения: концентрации Cd в *H. physodes* на этих территориях превышают 0.6 мг/кг, концентрации Pb – 15 мг/кг, Ni – 2.3 мг/кг, Cu – 7.6 мг/кг [24].

На территории юго-восточного Приладожья концентрации тяжелых металлов в лишайнике *H. physodes* довольно близки к характерным для фоновых территорий с уровнем Cd – 0.56 мг/кг, Ni – 1.7 мг/кг, Cu – 6.0 мг/кг [34] и к соответствующим показателям, установленным в среднета-

ежных лесах соседнего региона Карелии, не испытывающего влияния локального загрязнения [25, 29]. Выявленный в районе исследований уровень накопления металлов в талломах *P. glauca* сопоставим с наблюдаемым в фоновых условиях на территории Республики Коми, с концентрациями Cu – 3.2 мг/кг, Cd – 0.2 мг/кг, Zn – 48 мг/кг [23].

В кроновом пространстве древостоя создаются градиенты влажности и температуры [9, 35], формируется более влажный микроклимат. Сток по стволам в лесных сообществах гораздо менее значительный, чем количество осадков под кронами, он составляет не более 3% от общего количества дождевых осадков [9, 35]. В Эстонии в сосновых лесах более разнообразный видовой состав лишайников зарегистрирован в кронах сосны по сравнению со стволами на высоте менее 2 м, где условия более сухие [36]. Лишайники на стволах сосны предпочитают освещенные участки, особенно это касается *P. glauca*, этот вид относят к наиболее светолюбивым [37].

Условия местообитания лишайников на стволах сосны отличаются от условий в кронах можжевельника. На сухостое и стволках можжевельника в лесных сообществах Заонежского полуострова обнаружены охраняемые виды лишайников (*Lobaria pulmonaria*, *L. scrobiculata*) [38]. В связи с этим, определение свойств этого субстрата представляет несомненный интерес. Корка стволиков можжевельника имеет менее кислую реакцию (рН 4.1) по сравнению с коркой сосны (рН 3.3) (табл. 3). Кислотность корки можжевельника более близка к рН осадков, прошедших через кроны сосны (рН 4.6–6.7) [7, 39]. Кислотность водных вытяжек из хвои сосны и можжевельника в местообитаниях лишайников различается мало: рН составляет соответственно 4.67 и 4.66. Корка и древесина сухих ветвей можжевельника без коры имеет достоверно менее кислую реакцию, чем корка стволов сосны. Лишайники, растущие на изученных форофитах – сосне обыкновенной и можжевельнике проявляют себя как ацидофильные виды в связи с кислой реакцией их субстратов. В сосновых лесах северной тайги, не испытывающих прямого влияния загрязнения диоксидом серы и тяжелыми металлами, обнаружены сопоставимые с полученными в настоящем исследовании значения кислотности корки сосны (рН 3.42) и концентраций тяжелых металлов Ni, Cu, Cd и Pb [40]. В среднетаежных лесах территории Карелии кислотность корки стволов сосны [41] также близка к значениям, установленным в настоящем исследовании.

На древесине можжевельника отмечается иной видовой состав лишайников, по сравнению с коркой [19]. Отмерший древесный субстрат характеризуется высокой водоудерживающей способностью [42], что, по-видимому, создает благо-

**Таблица 3.** Кислотность и содержание микроэлементов ( $m \pm sd$ , мг/кг сух. в-ва) в субстратах эпифитных лишайников и хвое сосны обыкновенной и можжевельника обыкновенного в исследованном сосняке кустарничково-зеленомошном

**Table 3.** Acidity and concentration of trace elements ( $m \pm sd$ , mg/kg d.m.) in substrates of epiphytic lichens and needles of Scots pine and juniper in the investigated dwarf shrub–green moss Scots pine forest

Показатели Parameters	Типы субстратов, на высоте 1.3 м Types of substrates, at breast height			Хвоя форофитов Phorophyte needles	
	корка стволов сосны ( $D = 26.1$ см) pine outer bark ( $D = 26.1$ cm)	корка стволов можжевельника ( $D = 2.9$ см) juniper outer bark ( $D = 2.9$ cm)	древесина сухих ветвей и стволов можжевельника wood of juniper dry branches and trunks	хвоя сосны (1–2-летняя) scots pine needles, (1–2 years old)	хвоя можжевельника (1–2-летняя) juniper needles (1–2 years old)
pH	$3.33 \pm 0.03^1$ a	$4.10 \pm 0.09$ b	$4.07 \pm 0.04$ b	$4.67 \pm 0.53$ c	$4.66 \pm 0.21$ c
Ni	$0.44 \pm 0.10$ a	$1.20 \pm 0.12$ b	$0.36 \pm 0.08$ a	$0.71 \pm 0.10$ b	$2.59 \pm 1.8$ b
Cu	$2.54 \pm 0.12$ a	$3.17 \pm 0.48$ a	$1.27 \pm 0.40$ b	$1.86 \pm 0.05$ b	$1.74 \pm 0.01$ b
Fe	$89.8 \pm 14$ a	$104 \pm 19$ a	$10.3 \pm 3.8$ b	$22.3 \pm 9.3$ bc	$28.7 \pm 0.15$ c
Mn	$111 \pm 15$ a	$145 \pm 12$ a	$76.8 \pm 1.7$ b	$1240 \pm 267$ c	$2170 \pm 520$ c
Pb	$2.96 \pm 0.78$ a	$3.36 \pm 0.24$ a	$1.31 \pm 0.59$ b	$0.35 \pm 0.05$ c	$0.74 \pm 0.04$ b
Cd	$0.39 \pm 0.05$ a	$0.20 \pm 0.07$ a	$0.04 \pm 0.01$ b	$0.05 \pm 0.01$ b	$0.06 \pm 0.02$ b
Zn	$17.2 \pm 3.8$ a	$18.3 \pm 0.66$ a	$3.30 \pm 0.24$ b	$37.3 \pm 4.3$ c	$15.3 \pm 0.69$ a

Примечание. <sup>1</sup>Разными буквами отмечены значения содержания элементов на разных субстратах, достоверно различающиеся при  $P < 0.05$  (критерий Манна–Уитни).

Note. <sup>1</sup>Different letters indicate the values of the elements content on different substrates that differ significantly at  $P < 0.05$  (Mann–Whitney test).

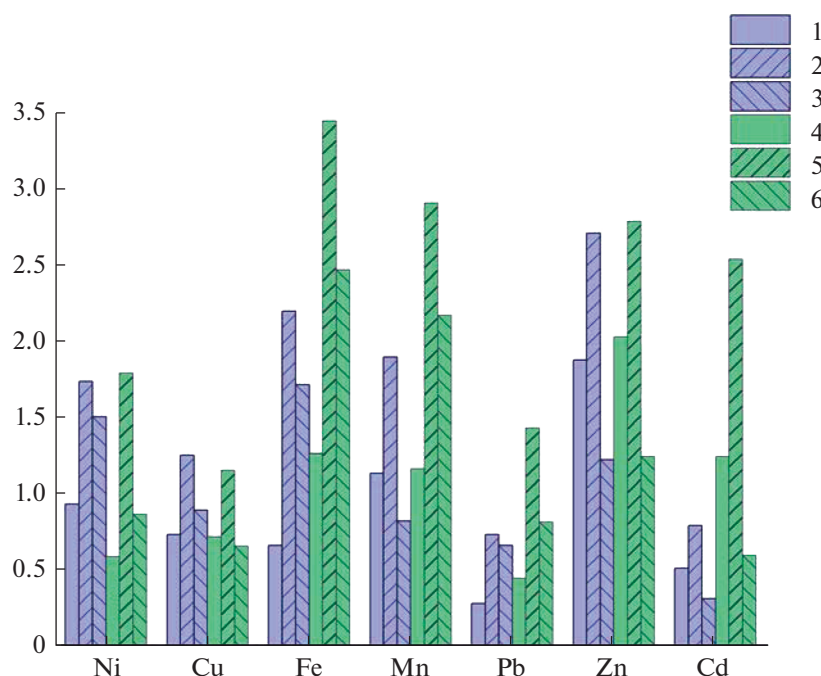
приятные условия для развития эпифитных лишайников на засохших ветвях можжевельника альварных лесов Эстонии [39, 43]. Известно, что обилие эпифитных лишайников часто возрастает на ослабленных деревьях и на сухой древесине [44]. При интенсивном росте талломов эпифитные лишайники в ряде случаев могут осваивать хвою видов форофитов в качестве субстрата [45].

Элементный состав корки стволов и ветвей можно рассматривать как показатель условий роста эпифитных лишайников. Сосна обыкновенная, можжевельник обыкновенный, ель европейская относятся к группе видов с корой, довольно обедненной по химическому составу, в отличие от лиственных пород [18]. Корка стволов хвойных отличается от древесины более высоким содержанием минеральных элементов и тяжелых металлов [40, 47, 48]. В результате проведенного анализа выявлены сходные концентрации изученных элементов в корке сосны и можжевельника, за исключением Ni, содержание которого в корке можжевельника является в 3 раза более высоким, чем в корке сосны (табл. 3). Сухие ветви можжевельника отличаются в 2.5–10 раз более низкими концентрациями Fe, Mn и Zn и тяжелых металлов – Cd, Pb, Cu и Ni, чем корка, что свидетельствует о существенном различии этих субстратов.

По сравнению с другими фракциями фитомассы древостоя, хвоя отличается более высокими концентрациями химических элементов [1, 47, 48]. Однако в корке стволов хвойных, как бо-

лее длительно существующем субстрате, по сравнению с хвоей, в большей степени накапливаются Cu, Pb, Cd и Fe (табл. 3). Хвоя сосны и можжевельника отличается от корки стволов этих видов достоверно меньшей кислотностью, в 10–15 раз более высоким содержанием Mn. Содержание Zn в корке и хвое можжевельника одинаково, а в хвое сосны является примерно в 2 раза более высоким, чем в корке ствола. В хвое обоих видов форофитов отмечаются крайне низкие концентрации Cd (0.05–0.06 мг/кг), составляющие всего 10–19% от концентраций Cd в лишайнике *H. physodes*, растущем на этих форофитах. В хвое можжевельника концентрации Pb значимо выше, чем в хвое сосны (табл. 3). Концентрации остальных элементов в хвое двух видов достоверно не различаются.

Элементный состав корки стволов сосны – субстрата, на котором произрастают эпифитные лишайники, в сосняке кустарничково-зеленомошном соответствует уровню, наблюдаемому в незагрязненных фитоценозах. Средние концентрации металлов в корке сосны в основном не превышают значений в корке на фоновых территориях заповедников Республики Карелия [25] и соседней Финляндии (Ni – 0.65, Cu – 2.72, Pb – 3.94, Cd – 0.23 мг/кг) [40]. Следует отметить, что толщина анализируемого слоя корки ствола сосны может различаться в разных работах. Кора состоит из отличающихся по химическому составу частей, и содержание элементов в коре ствола ча-



**Рис. 2.** Соотношение средних концентраций химических элементов в эпифитных лишайниках и их субстратах (корка стволов сосны и можжевельника).

По горизонтали: химические элементы; по вертикали: соотношение концентраций.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*, на стволах сосны;

4, 5, 6 – те же виды на можжевельнике. В штриховке выделена жизненная форма.

**Fig. 2.** The ratio of the average concentrations of chemical elements in epiphytic lichens and their substrates (outer bark of pine and juniper trunks).

X-axis: chemical elements; y-axis: the ratio of concentrations.

1 – *Bryoria fuscescens*, 2 – *Hypogymnia physodes*, 3 – *Platismatia glauca*, on pine trunks;

4, 5, 6 – the same species on juniper. Hatching indicates the life form.

сто трудно сопоставлять из-за отсутствия данных о вкладе в него массовых долей корки (ритидома) и флоэмы [46].

Лишайники, растущие на сосне, в большинстве случаев имеют более высокое (в 1.7–2.7 раза) или равное с субстратом содержание в талломах Fe, Mn и Zn, за исключением содержания Fe в талломах *B. fuscescens* и Mn в *P. glauca* (соотношение < 1). Соотношение содержания Ni и Cu в эпифитных лишайниках и корке ствола сосны варьирует в основном от 1 до 1.7, а соотношение Pb и Cd у всех изученных видов меньше 1 (рис. 2).

В талломах изученных видов листоватых лишайников, растущих на можжевельнике накопление Fe, Mn, а в *H. physodes* также Zn, является более высоким, чем в корке стволов, что наглядно выражено в соотношении концентраций – от 2.2 до 3.5 (рис. 2). В талломах *H. physodes* по сравнению с коркой можжевельника, выявлены значимо более высокие концентрации Fe ( $Z = -2.55$ ,  $p = 0.010$ ), Mn ( $Z = -2.45$ ,  $p = 0.014$ ), Zn ( $Z = -2.45$ ,  $p = 0.014$ ), а также тяжелых металлов – Ni ( $Z = -2.23$ ,  $p = 0.025$ ), Pb ( $Z = -2.02$ ,  $p = 0.025$ ) и Cd ( $Z = -2.45$ ,  $p = 0.014$ ); различий в содержании Cu не обнаружено.

Лишайники листоватой жизненной формы (*H. physodes*, *P. glauca*) в сравнении с кустистым лишайником *B. fuscescens* отличаются более высоким соотношением содержания тяжелых металлов Ni, Cu и Pb в талломах и корке стволов форофитов (рис. 2). Наиболее выраженную способность к биоаккумуляции тяжелых металлов среди изученных видов лишайников проявляет *H. physodes*. Лишайники *B. fuscescens* и *P. glauca* как на сосне, так и на можжевельнике отличаются более слабым накоплением Ni, Cu, Cd и Pb по отношению к субстрату, соотношение концентраций в большинстве случаев меньше 1. Эти виды в меньшей степени подходят для оценки загрязнения.

Лишайники более интенсивно, чем хвоя, аккумулируют Pb. В частности, в талломах *H. physodes* накопление этого элемента превосходит содержание в хвое можжевельника и сосны в 6–6.5 раз (табл. 1, 3), а в талломах кустистого лишайника *B. fuscescens* – в 2–2.4 раза. Листоватый лишайник *H. physodes*, по сравнению с хвоей форофитов, в большей степени накапливает Cu, концентрации Ni в его талломе сопоставимы с концентрацией в хвое сосны и можжевельника.



Значительные концентрации Mn в хвое сосны (1240 мг/кг) и хвое можжевельника (2170 мг/кг) согласуется с имеющимися в литературе оценками для фоновых территорий [1, 49]. Эти величины являются существенно более высокими, чем величины содержания Mn в талломах изученных видов лишайников (табл. 1, 3). Содержание Fe, напротив, существенно (в 3–12 раз) выше в лишайниках по сравнению с хвоей сосны и можжевельника. Содержание Zn в лишайниках сопоставимо с содержанием в хвое.

Таким образом, в фоновых условиях лишайники являются более эффективными индикаторами поступления в фитоценоз Cu, Pb, Cd и Fe с атмосферными выпадениями по сравнению с хвоей сосны и можжевельника, которая относительно слабо накапливает тяжелые металлы. При аккумуляции металлов в лишайниках сложно разделить поступление элементов в растворимой форме и в виде пылевых частиц, особенно это касается Fe [7]. В лесных экосистемах атмосферное поступление элементов – постоянный внешний источник пополнения элементами минерального питания, оказывающий влияние на биогеохимическую миграцию веществ [2]. Эпифитные лишайники позволяют выявить атмосферное поступление в фитоценоз тяжелых металлов, слабо вовлекаемых в биологический круговорот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные на юго-восточном побережье Ладожского озера в бассейне р. Свирь (Лодейнопольский р-н, Ленинградская обл.) в среднетаежном кустарничково-зеленомошном сосновом сообществе показали, что эпифитные лишайники, растущие на стволах сосны и долгоживущих экземплярах можжевельника, подходят для оценки многолетнего уровня аэротехногенного загрязнения. Содержание тяжелых металлов в лишайниках на разных видах форофитов в пределах изученного фитоценоза различно, что связано с особенностями их местообитаний. По сравнению с условиями на стволах сосны, условия для роста эпифитных лишайников в кронах можжевельника являются более благоприятными, благодаря формированию особого микроклимата. Строение кроны можжевельника, угол при-

крепления ветвей способствуют накоплению дождевых и снеговых осадков и повышению концентраций металлов, поступающих с атмосферными выпадениями, в эпифитных лишайниках. В талломах всех исследованных видов лишайников, растущих на можжевельнике, наблюдается достоверно более высокое содержание Ni (в 1.7–3 раза). Кроме того, на можжевельнике в талломах *H. physodes* накапливается больше Pb (примерно в 2 раза) и Cd, а в талломах *B. fuscescens* и *P. glauca* в 1.7–2 раза больше Fe по сравнению с лишайниками, растущими на стволах сосны.

В лишайниках, растущих на можжевельнике, по величине концентраций металлы образуют следующий ряд:  $Mn > Fe > Zn > Cu \geq Pb > Ni > Cd$ . Концентрации  $Pb > Cu$  в талломах *H. physodes* и *P. glauca*. Для видов, растущих на сосне, в большинстве случаев характерен аналогичный ряд:  $Mn \geq Fe > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd$ . Исключение составляет *P. glauca*: у этого вида на сосне концентрация Fe выше концентрации Mn. Концентрации металлов в разных видах эпифитных лишайников на сосне в исследованном сообществе не превышают значений, установленных в ненарушенных сообществах в соседнем регионе – заповеднике “Кивач” на юге Карелии.

Для лишайника листоватой жизненной формы *H. physodes* характерно более высокое содержание металлов Ni, Fe, Mn, Zn и Cd в талломах по сравнению с субстратом – коркой стволов форофитов. Это указывает на более высокую эффективность применения эпифитных лишайников по сравнению с их субстратом при оценке загрязнения.

Результаты исследования можно использовать при изучении тенденций изменений уровня загрязнения лесов в юго-восточном Приладожье.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по государственному заданию плановой темы НИР “Разнообразию, динамике и принципы организации растительных сообществ Европейской России” АААА-А19-119030690058-2 и темы НИР 2021–2023 гг. № 121032500047-1 “Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукина Н.В., Никонов В.В., Райтио Х. 1994. Химический состав хвои сосны на Кольском полуострове. – Лесоведение. 6: 10–21.
2. Бобкова К.С., Робакидзе Е.А., Торлопова Н.В. 2020. Круговорот элементов минерального питания в экосистеме коренного разнотравно-черничного ельника средней тайги (Республика Коми). – Сибирский лесной журнал. 2: 40–54.  
<https://doi.org/10.15372/SJFS20200205>
3. Авессаломова И.А. 1987. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М., Изд-во Моск. ун-та. 108с.

4. Морозова Р.М., Куликова В.К. 1974. Роль атмосферных осадков в круговороте азота и зольных элементов в еловых лесах Карелии. — В сб.: Почвенные исследования в Карелии. Материалы к X Международному конгрессу почвоведов. Петрозаводск. С. 143–161.
5. Шильцова Г.В. 1996. Трансформация атмосферных осадков древостоями средней тайги. — В кн.: Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск. С. 78–91.
6. Шильцова Г.В. 2006. Роль сосновых биогеоценозов заповедника “Кивач” в формировании кислотности и состава природных вод. — Тр. Кар. научн. центра РАН. 10: 173–179.  
<http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=r&id=1799>
7. Шильцова Г.В., Ласточкина В.Г. 2006. Влияние полога соснового и березового леса на химический состав осадков в заповеднике “Кивач”. — Тр. Кар. научн. центра РАН. 10: 180–184.  
<http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=r&id=1798>
8. Баргальи Р. 2005. Биогеохимия наземных растений. Перевод с англ. М. 457 с.
9. Протопопов В.В. 1975. Средообразующая роль темнохвойного леса. Новосибирск, Наука. 328 с.
10. Карпачевский Л.О., Зубкова Т.А., Пройслер Т., Кеннел М., Гитл Г., Горчарук Н. Ю. Минаева Т.Ю. 1998. Воздействие полога ельника сложного на химический состав осадков. — Лесоведение. 1: 50–59.
11. Эколого-физиологические основы продуктивности сосновых лесов Европейского Северо-Востока. 1993. Сыктывкар. 176 с.
12. Галенко Э.П. 2004. Особенности энерго- и водообмена в сосняках европейского Севера. Лесоведение. 5: 36–44.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17635571>
13. Галенко Э.П. 1973. Задержание осадков пологом хвойного леса в северотаежной подзоне Коми АССР. — Тр. Коми фил. АН СССР. 26: 133–137.
14. Галенко Э.П. 1983. Мозаичность распределения дождевых осадков под пологом хвойного леса. — Тр. Коми фил. АН СССР. 59: 4–8.
15. Тимофеев В.В., Лантратова А.С., Самодурова Н.С. 2001. Характеристика ценопопуляций *Juniperus communis* L. в составе растительного покрова Заонежья. — Растительные ресурсы. 37(4): 48–56.
16. Катаева М.Н. 2021. Содержание тяжелых металлов в эпифитных лишайниках лесных и болотных фитоценозов северной и средней тайги. — В сб.: Материалы всероссийской конференции “XI Галкинские чтения”. СПб: БИН РАН. С. 92–94.  
[https://www.binran.ru/files/conferences/Mire/XI\\_Galkinskie\\_Chteniya\\_Proceedings.pdf](https://www.binran.ru/files/conferences/Mire/XI_Galkinskie_Chteniya_Proceedings.pdf)
17. Петрова О.В. 2001. Эпифитные лишайники, обитающие на можжевельниках в Мурманской области. — В сб: Труды Первой российской лишенологической школы. Апатиты. Петрозаводск. С. 141–153.
18. Толышева Т.Ю. 1998. Некоторые факторы, определяющие распространение эпифитных лишайников на Кольском полуострове. — Вестник Московского университета. Сер. 16. Биология. 3: 43–48.
19. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В., Тагирджанова Г.М., Гимельбрант Д.Е. 2015. Лишайники можжевельниковых сообществ мыса Шурагский (Ленинградская область). — Вестник Тверского государственного университета. Сер. биология и экология. 2: 121–126.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24123631>
20. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Гимельбрант Д.Е., Ликсакова Н.С., Спиринов В.А., Кушневская Е.В., Гагарина Л.В., Ефимов П.Г. 2017. Краткие очерки трех планируемых ООПТ востока Ленинградской области. — Бот. журн. 102(9): 1270–1289.  
<https://doi.org/10.1134/S0006813617090071>
21. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Ефимов П.Г., Гимельбрант Д.Е., Спиринов В.А., Кушневская Е.В. 2013. Краткие очерки восьми предлагаемых ООПТ Ленинградской области. — Бот. журн. 98 (2): 233–254.  
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=5263>
22. Голубкова Н.С., Соколова С.В., Титов А.Н. 1995. Материалы к изучению лишенофлоры Нижне-Свицкого заповедника. — Нов. сист. низш. раст. 30: 49–52.  
[https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1995\\_30/NSNR\\_1995\\_30\\_Golubkova\\_et\\_al.pdf](https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1995_30/NSNR_1995_30_Golubkova_et_al.pdf)
23. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головки Т.К. 2016. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на Европейском Северо-Востоке. — Изв. Самарского НЦ РАН. 18(2): 221–225.  
[http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016\\_2\\_221\\_225.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_2_221_225.pdf)
24. Kubin E. 1990. A survey of element concentrations in the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* in Finland in 1985–86. — In: Acidification in Finland. Berlin, Heidelberg. P. 421–446.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-75450-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75450-0_21)
25. Дьяконов В.В., Козлов В.А., Коржицкая З.А. 1996. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и серой лесных экосистем Республики Карелия. — В кн. Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск. С. 167–182.
26. Мейчик Н.Р., Любимова Е.Г., Ермаков И.П. 2010. Ионнообменные свойства клеточной стенки кустистого лишайника *Cladonia rangiferina*. — Физиология растений. 57(2): 273–279.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=13724924>
27. Моисеева Е.Н. Биохимические свойства лишайников и их практическое значение. М.-Л. 1961. 82с.

28. *Виноградова А.А., Иванова Ю.А.* 2013. Загрязнение воздушной среды в Центральной Карелии при дальнем переносе антропогенных примесей в атмосфере. — Изв. АН. Сер. геогр. 5: 98–108. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20467417>
29. *Шевченко В.П., Стародымова В.П., Кутенков С.А., Виноградова А.А., Гордеев В.В., Демина Л.Л., Иванова Ю.А., Филиппов А.С.* 2011. Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ. — Современные проблемы науки и образования. 3: 42. <https://s.science-education.ru/pdf/2011/3/41.pdf>
30. *Федорец Н.Г., Солодовников А.В.* 2013. Влияние Костомукшского горнодобывающего комплекса на почвы прилегающих территорий. — Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 8(137): 51–57.
31. *Федорец Н.Г., Харин В.Н., Иешко Е.П., Дьяконов В.В., Шильцова Г.В., Козлов В.А.* 1998. Техногенное загрязнение тяжелыми металлами территории Республики Карелия. — Инженерная экология. 5: 3–18.
32. *Лазарева И.П., Кучко А.А., Кравченко А.В.* 1992. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние основных лесов Северной Карелии. Петрозаводск. Кар. науч. центр РАН. Ин-т леса. 52с.
33. *Лозовик П.А., Потапова И.Ю.* 2006. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии. — Водные ресурсы. 33(1): 111–118. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9188718>
34. *Lodenius M., Kiiskinen J., Tulisalo E.* 2010. Metal levels in an epiphytic lichen as indicator of air quality in a suburb of Helsinki, Finland. — Boreal Environment Research. 15(4): 446–452. <http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber15/ber15-446.pdf>
35. *Поздняков Л.К.* 1963. Гидроклиматический режим лиственных лесов Центральной Якутии. М. 145с.
36. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Leppik E., Randlane T.* 2013. Lichens on *Picea abies* and *Pinus sylvestris* — from tree bottom to the top. — Lichenologist. 45(1): 51–63. <https://doi.org/10.1017/S0024282912000564>
37. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Randlane T.* 2012. Species richness of epiphytic lichens in coniferous forests: the effect of canopy openness. — Ann. Bot. Fenn. 49(5): 352–358. <https://doi.org/10.5735/085.049.0606>
38. *Фадеева М.А.* 2014. Лишайники. — В кн.: Сельговые ландшафты Заонежского полуострова: природные особенности, история освоения и сохранение. Петрозаводск. С. 114–121.
39. *Meier E., Paal J.* 2009. Cryptogams in Estonian alvar forests: species composition and their substrata in stands of different age and management intensity. — Ann. Bot. Fenn. 46(1): 1–20. <https://doi.org/10.5735/085.046.0101>
40. *Poikolainen J.* 1997. Sulphur and heavy metal concentrations in Scots pine bark in northern Finland and the Kola Peninsula. — Water, Air, and Soil Pollution. 93(1–4): 395–408. <https://doi.org/10.1007/BF02404769>
41. *Тарасова В.Н.* 2012. Многолетний мониторинг воздушной среды заповедника “Кивач” методом лишайноиндикации. — В сб.: Природные процессы и явления в уникальных условиях среднетаежного заповедника. Петрозаводск. С. 181–185.
42. *Бязров Л.Г.* 1971. Распределение фитомассы эпифитных лишайников в некоторых типах лесных биогеоценозов подзоны широколиственно-еловых лесов. — Лесоведение. 5: 85–89.
43. *Jüriado I., Leppik E., Lõhmus P., Randlane T., Liira J.* 2015. Epiphytic lichens on *Juniperus communis* — an unexplored component of biodiversity in threatened alvar grassland. — Nordic J. Botany. 33(2): 128–139. <https://doi.org/10.1111/njb.00650>
44. *Толышева Т.Ю.* 2004. Элементы структуры сообществ эпифитных лишайников олиготрофных болот Среднего Приобья (Западная Сибирь). — Вестник Московского университета. Сер.16. Биология. 4: 42–46.
45. *Толышева Т.Ю., Шишконокова Е.А.* 2017. Эпифитные лишайники олиготрофных болот природного парка “Нумто”. — В сб.: Современное состояние и перспектива развития сети особо охраняемых природных территорий промышленно развитых регионов. Материалы межрегиональной конференции, посвященной 20-летию природного парка “Нумто”. Нижневартовск. С. 106–108.
46. *Дейнеко И.П., Дейнеко И.В., Белов Л.П.* 2007. Исследование химического состава коры сосны. — Химия растительного сырья. 1: 19–24. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9482860>
47. *Щербенко Т.А., Копцик Г.Н., Гроненберг Б.Я., Лукина Н.В., Ливанцова С.Ю.* 2008. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения. — Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2: 9–16.
48. *Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Niemenen T.* 2008. Litterfall production and nutrient return to forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. — Boreal Environment Research. 13(suppl. B): 67–91. <http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber13/ber13-B067.pdf>
49. *Čeburnis D., Steinnes E.* 2000. Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. — Atmospheric Environment. 34: 4265–4271. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00213-2)

## Assessment of Trace Elements Accumulation in Thalli of the Epiphytic Lichens in Dwarf Shrub–Green Moss Pine Forest of the Middle Taiga (South Eastern Ladoga Region)

M. N. Kataeva<sup>a</sup>, \*, A. I. Belyaeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Komarov Botanical Institute of the RAS, St. Petersburg, Russia

\*e-mail: mkmarikat@gmail.com

**Abstract**—The concentrations of Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Pb, and Cd in the thalli of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. and *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. and common juniper (*Juniperus communis* L.) has been studied. In the thalli of the studied lichen species growing on juniper in the undergrowth layer of a pine forest, as compared to the lichens on pine trunks, the content of the biogenic Fe was 1.7–2.2 times higher, and the elevated levels of non-biogenic Ni (in all studied species), Pb and Cd (in *Hypogymnia physodes*) were observed. The content of Fe, Ni, Pb and Cd is higher in the thalli of foliose lichens (*Hypogymnia physodes* and *Platismatia glauca*) than in the fruticose lichen *Bryoria fuscescens*. The revealed concentrations of heavy metals in lichens are close to the corresponding values established for the middle taiga forests of Karelia not affected by pollution. A higher content of Fe, Mn, Zn, Ni, Cu and Pb has been found in the thalli of foliose lichens, especially *H. physodes*, as compared to the substrate — the bark of phorophyte trunks.

**Keywords:** epiphytic lichens, *Hypogymnia physodes*, *Bryoria fuscescens*, *Platismatia glauca*, trace element concentrations, middle taiga subzone, southeastern Ladoga region

### ACKNOWLEDGEMENTS

The work is performed in the Laboratory of plant communities within the framework of the state research assignment of the BIN RAS AAAA-A19-119030690058-2 “Diversity, dynamics and principles of plant communities organization in the European Russia” and research theme of the BIN RAS 121032500047-1 “Vegetation of European part of Russia and northern Asia: diversity, dynamics and principles of plant communities organization”.

### REFERENCES

1. Lukina N.V., Nikonov V.V., Raitio H. 1994. [Chemical composition of Scots pine needles in the Kola Peninsula]. — Russian J. Forest Science (Lesovedenie). 6: 10–21. (In Russian)
2. Bobkova K.S., Robakidze E.A., Torloпова N.V. 2020. Turnover of mineral elements in the ecosystem of native herbaceous-bilberry spruce forest in the middle taiga subzone (Komi Republic). — Siberian J. Forest Science. 2: 40–54. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200205>
3. Avessalomova I.A. 1987. [Geochemical indicators in the study of landscapes]. Moscow. 108p.
4. Morozova R.M., Kulikova V.K. 1974. [The role of atmospheric precipitation in the cycle of nitrogen and ash elements in the spruce forests of Karelia]. — In: [Soil research in Karelia. Materials the Xth International Congress of Soil Scientists]. Petrozavodsk. P. 143–161.
5. Shiltsova G.V. 1996. [Transformation of atmospheric precipitation by stands of middle taiga]. — In: [Anthropogenic transformation of forest ecosystems of Karelia]. Petrozavodsk. P. 78–91. (In Russian)
6. Shiltsova G.V. 2006. Role of pine coenosis in the “Kivach” strict nature reserve in forming the acidity and composition of natural waters. — Proceedings of KarRC RAS. 10: 173–179. <http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=e&id=1799> (In Russian)
7. Shiltsova G.V., Lastochkina V.G. 2006. Effect of pine and birch forest canopy on the chemical composition of precipitation in the “Kivach” reserve. — Proceedings of KarRC RAS. 10: 180–184. <http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=e&id=1798> (In Russian)
8. Bargagli R. 2005. Trace elements in terrestrial plants: an ecological approach to biomonitoring and biorecovery. Transl. from Engl. Moscow. 457 p. (In Russian)
9. Protopopov V.V. 1975. [Environment-forming role of dark coniferous forest]. Novosibirsk. 328 p. (In Russian)
10. Karpachevsky L.O., Zubkova T.A., Preusler T., Kennel M., Gietl G., Gorcharuk N.Yu., Minaeva T.Yu. 1998. [Influence of Piceetum composita canopy on chemical composition of precipitation]. — Russian J. Forest Science (Lesovedenie). 1: 50–59. (In Russian)
11. [Ecological and physiological foundations of the productivity of pine forests in the European North-East]. 1993. Sykvyvkar. 176 p.

12. Galenko E.P. 2004. Characteristics of energy and mass-exchange in pine forests of the European North. – Russian J. Forest Science (Lesovedenie). 5: 36–44.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17635571> (In Russian)
13. Galenko E.P. 1973. [Precipitation retention by the forest canopy in the northern taiga of Komi ASSR]. – Trans. Komi Branch, Academy of Sciences USSR. 26: 133–137. (In Russian)
14. Galenko E.P. 1983. [Mosaic distribution of rainfall under the canopy of coniferous forest]. – Trans. Komi Branch, Academy of Sciences USSR. 59: 4–8. (In Russian)
15. Timofeev V.V., Lantratova A.S., Samodurova N.S. 2001. [Characteristics of *Juniperus communis* L. coenopopulations in plant cover of Trans-Onega territory]. – Rastitelnye resursy. 37(4): 48–56. (In Russian)
16. Kataeva M.N. 2021. The content of heavy metals in epiphytic lichens of forest and mire phytocoenoses of northern and middle taiga. – In: Proceedings of the XI Meeting in memoriam Ekaterina Alexeevna Galkina. 21 April 2021. Saint Petersburg. P. 92–94.  
[https://www.binran.ru/files/conferences/Mire/XI\\_Galkinskiye\\_Chteniya\\_Proceedings.pdf](https://www.binran.ru/files/conferences/Mire/XI_Galkinskiye_Chteniya_Proceedings.pdf) (In Russian)
17. Petrova O.V. 2001. [Epiphytic lichens of juniper species in Murmansk region]. – In: [Proceedings of the First Russian lichenological school. Apatity]. Petrozavodsk. P. 141–153. (In Russian)
18. Tolpysheva T.Yu. 1998. [Some factors determining the distribution of the epiphytic lichens in the Kola Peninsula]. – Herald of Moscow University. Series 16. Biology. 3: 43–48.
19. Stepanchikova I.S., Gagarina L.V., Tagirdzhanova G.M., Himelbrant D.E. 2015. Lichens of the juniper communities on the Shuriagsky Cape (Leningrad Region). – Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology. 2: 121–126.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=24123631> (In Russian)
20. Sorokina I.A., Stepanchikova I.S., Himelbrant D.E., Liksakova N.S., Spirin V.A., Kushnevskaia E.V., Gagarina L.V., Efimov P.G. 2017. Brief overviews of three proposed protected areas in the Eastern Leningrad region. – Bot. Zhurn. 102(9): 1270–1289.  
<https://doi.org/10.1134/S0006813617090071> (In Russian)
21. Sorokina I.A., Stepanchikova I.S., Efimov P.G., Himelbrant D.E., Spirin V.A., Kushnevskaia E.V. 2013. Short descriptions of eight proposed protected areas of Leningrad region. – Bot. Zhurn. 98(2): 233–254.  
<http://arch.botjournal.ru/?t=articles&id=5263> (In Russian)
22. Golubkova N.S., Sokolova S.V., Titov A.N. 1995. Materies ad examinationem lichenoflorae reservati Svirensis inferioris. – Novitates Systematicae Plantarum non Vascularum. 30: 49–52. (In Russian)  
[https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1995\\_30/NSNR\\_1995\\_30\\_Golubkova\\_et\\_al.pdf](https://www.binran.ru/files/journals/NSNR/1995_30/NSNR_1995_30_Golubkova_et_al.pdf)
23. Tabalenkova G.N., Dalke I.V., Golovko T.K. 2016. Biomass elemental composition of some lichen species in the boreal zone of European North-East. – Izvestia of Samara Scientific Center RAS. 18(2): 221–225. (In Russian)  
[http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016\\_2\\_221\\_225.pdf](http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2016/2016_2_221_225.pdf)
24. Kubin E. 1990. A survey of element concentrations in the epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* in Finland in 1985–86. – In: Acidification in Finland. Berlin, Heidelberg. P. 421–446.
25. Diakonov V.V., Kozlov V.A., Korzhitskaya Z.A. 1996. [Assessment of heavy metals and Sulphur contamination of forest ecosystems of the Republic of Karelia]. – In: [Anthropogenic transformation of forest ecosystems in Karelia]. Petrozavodsk. P. 167–182. (In Russian)
26. Meychik N.R., Lyubimova E.G., Yermakov I.P. 2010. Ion-exchange properties of cell wall of reindeer lichen *Cladonia rangiferina*. – Russ. J. Plant Physiol. 57(2): 260–266.  
<https://doi.org/10.1134/S1021443710020147>
27. Moiseeva E.N. 1961. [Biochemical properties of lichens and their practical significance]. Moscow-Leningrad. 82p. (In Russian)
28. Vinogradova A.A., Ivanova Yu.A. 2013. Pollution of central Karelia environment under long-range atmospheric transport of anthropogenic pollutants. – Izvestia Akademii Nauk. Ser. Geogr. 5: 98–108.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20467417> (In Russian)
29. Shevchenko V.P., Starodymova V.P., Kutenkov S.A., Vinogradova A.A., Gordeev V.V., Demina L.L., Ivanova Yu.A., Philippov A.S. 2011. Contents of heavy metals in fruticose epiphytic lichens of Karelia as indicator of atmospheric transport of pollutants. – Modern problems of science and education. 3: 42.  
<https://s.science-education.ru/pdf/2011/3/41.pdf> (In Russian)
30. Fedorets N.G., Solodovnikov A.N. 2013. [Effect of Kostomuksha ore mining and processing plant on soils of the adjacent territories]. – Proceedings of Petrozavodsk State University. 8(137): 51–57.
31. Fedorets N.G., Kharin V.N., Ieshko E.P., Diakonov V.V., Shilzova G.V., Kozlov V.A. 1998. [Technogenic pollution with heavy metals in the Republic of Karelia]. – Engineering Ecology. 5: 3–18.
32. Lazareva I.P., Kuchko A.A., Kravchenko A.V. 1992. [Effect of airborne industrial pollution on the state of pine forests in North Karelia]. Petrozavodsk. 52 p.
33. Lozovik P.A., Potapova I.Yu. 2006. Input of chemical substances with atmospheric precipitation onto the territory of Karelia. – Water Resources. 33(1): 104–111.  
<https://doi.org/10.1134/S009780780601012X>

34. *Lodenius M., Kiiskinen J., Tulisalo E.* 2010. Metal levels in an epiphytic lichen as indicator of air quality in a suburb of Helsinki, Finland. – *Boreal Environment Research*. 15(4): 446–452.  
<http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber15/ber15-446.pdf>
35. *Pozdnyakov L.K.* 1963. [Hydroclimatic regime of larch forests in Central Yakutia]. Moscow. 145 p. (In Russian)
36. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Leppik E., Randlane T.* 2013. Lichens on *Picea abies* and *Pinus sylvestris* – from tree bottom to the top. – *Lichenologist*. 45(1): 51–63.  
<https://doi.org/10.1017/S0024282912000564>
37. *Marmor L., Tõrra T., Saag L., Randlane T.* 2012. Species richness of epiphytic lichens in coniferous forests: the effect of canopy openness. – *Ann. Bot. Fenn.* 49(5): 352–358.  
<https://doi.org/10.5735/085.049.0606>
38. *Fadeeva M.A.* 2013. Lichens. – In: [Selka landscapes of the Zaonezhskii Peninsula. Natural characteristics, land use, conservation]. Petrozavodsk. P. 114–121.
39. *Meier E., Paal J.* 2009. Cryptogams in Estonian alvar forests: species composition and their substrata in stands of different age and management intensity. – *Ann. Bot. Fenn.* 46(1): 1–20.  
<https://doi.org/10.5735/085.046.0101>
40. *Poikolainen J.* 1997. Sulphur and heavy metal concentrations in Scots pine bark in northern Finland and the Kola Peninsula. – *Water, Air, and Soil Pollution*. 93(1-4): 395–408.  
<https://doi.org/10.1007/BF02404769>
41. *Tarasova V.N.* 2012. [Long-term monitoring of the air environment of the “Kivach” reserve by the lichen indication method]. – In: [Natural processes and phenomena in the unique conditions of the middle taiga reserve]. Petrozavodsk. P. 181–185. (In Russian)
42. *Byazrov L.G.* 1971. [Distribution of the phytomass of epiphytic lichens in certain types of biogeocoenoses in the broad-leaved-spruce forests subzone]. – *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*. 5: 85–89. (In Russian)
43. *Jüriado I., Leppik E., Lõhmus P., Randlane T., Liira J.* 2015. Epiphytic lichens on *Juniperus communis* – an unexplored component of biodiversity in threatened alvar grassland. – *Nordic J. Botany*. 33(2): 128–139.  
<https://doi.org/10.1111/njb.00650>
44. *Tolpysheva T.Yu.* 2004. [Elements of the structure of corticolous lichen association in the oligotroph phytocoenoses of the middle Priobye (Western Siberia)]. – *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser 16. Biology*. 4: 42–46.
45. *Tolpysheva T.Yu., Shishkonakova E.A.* 2017. [Epiphytic lichens of oligotrophic mires of “Numto” Natural Park]. – In: [The current state and prospects for the development of a network of specially protected natural areas in industrialized regions. Materials of the interregional conference dedicated to the 20th anniversary of the natural park “Numto”]. Nizhnevartovsk. P. 106–108. (In Russian)
46. *Deineko I.P., Deineko I.V., Belov L.P.* 2007. [Study of chemical composition of pine bark]. – *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 1: 19–24.  
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9482860> (In Russian)
47. *Shcherbenko T.A., Koptsik G.N., Groenenberg B.-J., Lukina N.V., Livantsova S.Yu.* 2008 Uptake of nutrients and heavy metals by pine trees under atmospheric pollution. – *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 63(2): 51–59.  
<https://doi.org/10.3103/S0147687408020026>
48. *Ukonmaanaho L., Merilä P., Nöjd P., Niemenen T.* 2008. Litterfall production and nutrient return to forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. – *Boreal Environment Research*. 13(suppl. B): 67–91.  
<http://www.borenv.net/BER/archive/pdfs/ber13/ber13-B067.pdf>
49. *Čeburnis D., Steinnes E.* 2000. Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. *Atmospheric Environment*. 34: 4265–4271.  
[https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00213-2)