

СТАТЬЯ

УДК 574.472:582.29

**ДЕЙСТВИЕ КРОНЫ БЕРЕЗЫ НА СОДЕРЖАНИЕ
МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЛИШАЙНИКЕ
BRYORIA FUSCESCENS В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ****Катаева М.Н., Беляева А.И.***ФГБУН Ботанический институт имени В.Л. Комарова Российской академии наук,
Санкт-Петербург, e-mail: mkmarikat@gmail.com*

Определены концентрации микроэлементов в талломах кустистого лишайника *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. (Parmeliaceae) в среднетаежных сообществах. Проведено сравнение влияния условий и кроны березы на лишайник в сосновом сообществе северной Карелии. Изучены морфометрические показатели листьев березы пушистой, форофита лишайников в осоково-кустарничково-сфагновом болоте в южной части Ладожско-Онежского перешейка. Содержание микроэлементов в талломах лишайника, растущего на стволах берез, древесине сосны и рябине, определено методом атомно-абсорбционной спектроскопии. В результате выявлено, что на содержание микроэлементов в лишайниках, в первую очередь на концентрацию Mn, влияют ценоотические условия. Определены количественные показатели листьев березы пушистой и их биомасса, которые характеризуют влияние кроны. Обсуждаются основные параметры листьев березы. Приведен запас биомассы лишайника на стволах берез. Даны соотношения микроэлементов в листьях и лишайнике. Лишайники *B. fuscescens*, собранные на стволах березы в сосняке бруснично-зелено-таежными сообществами Ладожско-Онежского перешейка. Это обусловлено более близким расположением лесного сообщества Карелии к источникам техногенных выбросов этих микроэлементов.

Ключевые слова: средняя тайга, микроэлементы, *Bryoria fuscescens*, *Betula pubescens*, *Pinus*

Работа выполнена по плановой теме НИР 2021–2025 гг. № 121032500047-1 «Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации».

**BIRCH CROWN INFLUENCE ON THE CONTENT OF MICROELEMENTS
IN LICHEN *BRYORIA FUSCESCENS* IN THE NORTH-WEST REGION****Kataeva M.N., Belyaeva A.I.***Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg,
e-mail: mkmarikat@gmail.com*

Concentrations of microelements in fruticose lichen thalli *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. (Parmeliaceae) of middle taiga communities have been determined. The comparison of conditions and birch crown on lichen with pine forest of northern Karelia was performed. Morphometric parameters of downy birch leaves, phorophyte of lichens in the sedge-dwarf-shrub-sphagnum mire community in southern part of the Ladoga-Onega Isthmus were studied. The content of microelements in lichen thalli growing on birch trunks, wood of pine and rowan was determined by atomic absorption spectrometry. The results showed that content of microelements in lichens is changed under influence of coenotic conditions; in the first line Mn. Quantitative parameters of downy birch leaves and biomass of lichens on birch trunks were determined characterizing crown influence. The main parameters of leaves are discussed. Stock of biomass of lichen on birch trunks was determined. Ratio of elements between leaves and lichen was given. Lichens *B. fuscescens* collected on birch trunks of lingonberry-green moss pine forest of the northern Karelia differ from lichens of the middle taiga communities of the Ladoga-Onega Isthmus by higher Ni and Cu concentrations. It is caused by closer location of this community in the Karelia to technogenic emission source of these elements.

Keywords: middle taiga, microelements, *Bryoria fuscescens*, *Betula pubescens*, *Pinus*

The work was carried out according to the planned topic of scientific research works 2021–2025 No. 121032500047-1 “Vegetation of the European part of Russia and northern Asia: diversity, dynamics and principles of organization”.

Введение

В условиях техногенной трансформации биосферы особое значение имеет определение фоновых концентраций. Они дают возможность оценивать степень загрязнения сообществ. При современном уровне промышленного развития возрастает поступление тяжелых металлов в лесные сообще-

ства. Биоиндикаторная роль эпифитных лишайников позволяет проводить оценку их связи с окружающей средой. В лесной зоне европейской части характерно наибольшее видовое разнообразие лишайников. В динамично и интенсивно развивающемся северо-западном регионе необходимо сохранение ценных лесных сообществ и их

компонентов. В лесных сообществах около Ладожского озера изучено региональное разнообразие лишайников [1, 2]. В северо-западном регионе расположены крупные города. Источники выбросов металлургической промышленности на территориях, расположенных севернее, создают возможность атмосферного переноса и загрязнения тяжелыми металлами севера Карелии. В лесных сообществах связь возраста деревьев и размерного ранга с показателями роста эпифитных лишайников, массой и запасом более изучена. Оценки влияния эколого-ценотических условий на микроэлементный состав лишайников немногочисленны.

Цель исследования – определить концентрации микроэлементов в эпифитном лишайнике *Bryoria fuscescens* (Gyeln.) Brodo et D. Hawksw. (сем. Parmeliaceae) в средне-таежной подзоне; сопоставить элементный состав лишайника с северной Карелией.

Материалы и методы исследования

Определяли концентрации микроэлементов в талломах лишайника *Bryoria fuscescens*, собранного в средней тайге и северной тайге в Карелии. Образцы эпифитных лишайников для анализа были собраны на стволах березы пушистой в июле – августе 2022 г. в осоково-кустарничково-сфагновом болоте, в сосняке кустарничково-зеленомошном. Район исследования – подзона средней тайги, северо-запад европейской части в южной части Ладожско-Онежского перешейка, юго-восток побережья Ладожского озера, бассейн р. Свирь, северо-восток Ленинградской области, Лодейнопольский район [3]. Локальные источники атмосферного загрязнения здесь отсутствуют.

Образцы лишайника собирали на стволах березы пушистой *B. pubescens* Ehrh., на сухостойных слабо наклоненных соснах на краю массива болота. Возраст березы пушистой – 35 лет, диаметр оснований стволов – 5,5 см, высота 2,5–3,5 м. В сосняке лишайник собран на рябине *Sorbus aucuparia* L. Высота рябины – 1,5–2 м, диаметр ствола до 1,5 см.

Образцы лишайников собирали с 3–4 деревьев на высоте сбора 1,3 м. Размер талломов *Bryoria fuscescens* – 17–20 см. В северной Карелии *B. fuscescens* (длина таллома 19–20 см) собран на березе, в сосняке бруснично-зеленомошном, площадь сечений 27 м²/га.

На модельных деревьях березы пушистой на краю болота оценивали массу листьев всей кроны березы и лишайника на всем стволе. На 3–6 ветвях на деревьях березы собирали листья, по 10 шт., для определения их площади. Листья закладывали в слои бумаги, прижимали и высушивали. Определяли морфометрические параметры

листьев берез, длину, ширину. Площадь листьев березы пушистой определяли на миллиметровой бумаге по контурам листьев, подсчитывали площади 50, 60 и 30 листьев березы (см²) на трех деревьях. После определения площади листья высушивали при 105 °С в термостате, взвешивали на аналитических весах. Массу лишайников и листьев определяли на лабораторных весах.

Образцы лишайников и листьев березы и рябины для химического анализа сушили до воздушно-сухого веса, после высушивали в термостате. Пробы озоляли при 450 °С в муфеле, золу растворяли при нагревании в 2N HCl, фильтровали через фильтр средней плотности «синяя лента» [3]. Концентрации химических элементов определяли на ААС Квант-АФА, Россия, в двух аналитических повторностях. Использовали государственные стандартные образцы (ГСО). Данные обрабатывали в Microsoft Excel 2010.

Результаты исследования и их обсуждение

Береза присутствует в древостое сосновых лесов, на окраинах болот. Лишайник *B. fuscescens* – обычный вид в лесных и болотных сообществах в южной части Ладожско-Онежского перешейка. Лишайник предпочитает условия высокой влажности микроклимата, относится к экологической группе видов гигромезофитов. Особенность роста лишайников на болотах связана с ростом по всей поверхности стволов, виды р. *Bryoria* встречаются на стволах березы, ветвях сосны, в 30–40 см от поверхности. В благоприятном микроклимате болота на березе разрастаются повисающие кустистые темноокрашенные виды лишайников.

На болоте количество видов форофитов лишайников небольшое, часто встречаются сосна и береза. В осоково-кустарничково-сфагновом сообществе на стволах и ветвях деревьев основные виды макролишайников: *Evernia mesomorpha*, *Pseudevernia furfuracea*, *Bryoria fuscescens*, *Bryoria* sp., *Hypogymnia physodes*, *Usnea hirta*, на окраине болота *Platismatia glauca*. Эти же виды распространены на болотах Прионежской низменности [4].

Под кронами березы формируются более затененные и влажные условия местообитаний. Особенности местообитаний на болоте влияют на накопление в лишайниках микроэлементов. Сток осадков по стволу березы, очевидно, способствует освоению стволов березы лишайниками почти по всей протяженности ствола. Часто деревья сосны по болоту расположены не строго вертикально. Слабый наклон деревьев свя-

зан с размоканием оснований стволов в моховом покрове, воде, действием ветра.

Сравнивали накопление микроэлементов в талломах лишайников, растущих на молодых деревьях берез при слабом влиянии крон и под пологом сосняков. В результате анализа в кустистом лишайнике *B. fuscescens* определены низкие концентрации микроэлементов. В отличие от состава вида на молодой рябине и на сосне, на стволах березы в нем выше Zn. На сухостойной сосне в лишайнике несколько выше концентрация Cd, 0,188 мг/кг, что происходит, вероятно, в связи со слабым наклоном ствола сосны, что способствует накоплению осадков, поступающих в виде снега, дождя, и фракций атмосферной пыли.

В северной Карелии Cd в *B. fuscescens* на стволах березы выше – 0,144 мг/кг, по сравнению со среднетаежными лишайниками. В нем выше содержание Ni и Cu (табл. 1).

В листьях березы пушистой определены низкие концентрации микроэлементов. В листьях рябины довольно высокие концентрации Mn, по-видимому, из-за почвенных условий, Zn и Cd в них ниже, чем в листьях березы.

В лишайнике выше содержание микроэлементов, по сравнению с листьями березы, кроме концентраций Mn и Zn. В листьях рябины Cu несколько выше, чем в лишайнике. По сравнению с листоватыми видами, накопление микроэлементов кустистыми видами слабее и соотношение концентраций к листьям – ниже. В лишайнике выше концентрации Fe, 120–176 мг/кг, по сравнению с листьями березы, в которых Fe не более 70 мг/кг (табл. 1, 2).

Содержание Fe в лишайниках Ленобласти выше относительно листьев березы в 1,7 раза, в Карелии – в 4,2 раза. В листьях березы северной Карелии несколько более интенсивно накапливается Ni, по сравнению с лишайником, что, по-видимому, связано с почвенными условиями. В листьях березы пушистой на болоте низкая концентрация Ni (0,53 мг/кг).

На болоте в лишайниках содержание Cd довольно низкое. Концентрации Cd в лишайнике сопоставимые с листьями березы или ниже (табл. 1, 2). Концентрации микроэлементов выше в лишайнике относительно листьев березы: в лишайнике северной Карелии Cd выше в 1,5 раза. В лишайнике Cd на рябине и березе низкий, 0,100–0,136 мг/кг.

Таблица 1

Средние концентрации металлов в *Bryoria fuscescens*, мг/кг сухой массы

Субстрат, высота, таллом	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
сосняк кустарничково-зеленомошный							
Ствол рябины, 1,3–1,5 м, 14 см	0,42±0,1	1,6±0,10	0,100±0,01	1,7±0,2	63±16	206±60	25±2
сосняк бруснично-зеленомошный							
Ствол березы, 1,3 м, 17–20 см, север Карелии	3,2±1,0	3,6±1,2	0,144±0,06	<	176±64	288±53	87±22
осоково-кустарничково-сфагновое болото							
Ствол березы 1,3–1,5 м, 17 см	0,57±0,04	1,8±0,27	0,136±0,02	1,6±0,5	120±32	114±47	51±5
Ствол сухой сосны, 1,3–1,5 м, 15 см	0,35±0,05	2,2±0,10	0,188±0,03	3,0±0,4	114±5	84±2	31±1

Таблица 2

Концентрации металлов в листьях березы и рябины в местообитаниях, мг/кг сух. массы

Субстрат	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
Осоково-кустарничково-сфагновое болото, береза пушистая							
Листья	0,53±0,2	1,6±0,2	0,183±0,05	0,60±0,3	69±25	320±67	217±18
Сосняк кустарничково-зеленомошный, рябина обыкновенная							
Листья	1,2±0,1	2,9±0,03	0,058±0,01	0,81±0,1	37±1	2140±99	10±1
Сосняк бруснично-зеленомошный, береза повислая							
Листья	6,9±0,1	3,2±0,05	0,096±0,01	0,63±0,03	42±0,5	772±69	149±11

При фоновом содержании Ni и Cu вид *B. fuscescens* в северной Карелии содержит больше этих элементов (в 5,6 и 2 раза), по сравнению с данными для среднетаежных сообществ. Концентрации Zn в лишайнике на стволах березы выше содержания элемента на сосне и рябине в 1,6 раз, для Карелии в 2,8 раз. Содержание Mn в лишайниках на березе выше, чем на сосне, рябине в 1,35–2,4 раз, для образцов вида Карелии – в 3,4 раза.

В лишайниках Ленобласти накапливается Pb, с концентрацией выше листьев березы в 2,1–2,7 раза. Содержание в лишайнике Pb на сосне 3,0 мг/кг, на стволах березы 1,7 мг/кг, в северной Карелии оно ниже предела определения (табл. 1).

Лишайник на сосне и на березе в условиях болота содержит довольно низкие концентрации Mn. В северной Карелии в листьях березы Mn выше относительно лишайника в 2,7 раз, в листьях березы на болоте – в 2,8 раз. Как было показано ранее, Zn интенсивнее накапливается в листьях березы [3]. Содержание Zn в листьях выше в 4,3 раза. В листьях берез в Карелии определены довольно высокие фоновые концентрации Cd – до 0,67 мг/кг [5]. Они характерны для листьев березы в других северных регионах [6]. Концентрации микроэлементов в листьях березы и рябины соответствуют обычным содержаниям

в этих видах [6]. В кроне березы могут концентрироваться осадки, что увеличивает сток по стволу, поступление Cd в лишайник. В этом виде содержание элементов не выше фоновых [7].

Избирательная способность листьев березы к накоплению цинка была показана в [5, 6]. Согласно прямым измерениям осадков под пологом леса в Карелии, под сосной в осадках возрастают концентрации Fe и Mn, по сравнению с открытыми местообитаниями. В количественном отношении в осадках под сосной Mn преобладает над Fe. Это характеризует миграционную способность Mn. Показано, что под сосной в осадках Cd не концентрируется.

В разных ценотических условиях показано, что кроны молодых берез влияют на микроэлементный состав лишайников слабее, по сравнению с условиями роста под пологом сосновых сообществ. В лишайниках болота соотношение Mn/Fe ниже 1 – 0,74–0,95, с преобладанием в них Fe. Под пологом леса соотношение Mn/Fe в них выше 1 – 1,64–3,3.

Молодые деревья березы имеют близкие размерные показатели параметров листьев. Показатели листьев березы характеризуют популяцию вида в данных условиях. Масса листа березы пушистой в среднем составляет – 0,103 г, его средняя площадь 9,51–11,5 см² (табл. 3).

Таблица 3

Морфометрические параметры листьев березы пушистой, болото

Дерево	N	Длина, мм	Ширина, мм	Сухая масса листа, г	Масса черешка, г	Площадь, см ²
Береза 1	50	47,1±6,7	36,4±4,4	0,104±0,027	0,0060±0,009	11,0±2,49
Береза 2	60	46,8±5,8	33,4±4,2	0,091±0,024	0,0046±0,016	9,51±2,29
Береза 3	30	48,7±4,0	37,2±2,9	0,112±0,015	0,0045±0,0009	11,5±1,64
Среднее	47	47,7±1,0	35,7±2,0	0,103±0,010	0,0050±0,0008	10,7±1,05

Таблица 4

Показатели кроны и запас биомассы лишайника *Bryoria fuscescens* на стволах березы пушистой, сух. масса

Номер дерева	Рябина	Береза		Площадь поверхности кроны березы, м ²	Биомасса лишайника, г
	Площадь листа, см ²	Масса листьев кроны, г	Масса ствола, кг		
1	66,45	191	1,18	4,07	35,1
2	65,75	220	1,54	4,60	14,2
3	51,55	230	1,30	4,72	10,3
среднее	61,2±8,4	214±20	1,34±0,2	4,46±0,35	19,9±13

Таблица 5

Средний запас микроэлементов в листьях крон березы и лишайнике и их соотношение

Элемент	Листья березы	Лишайник	Соотношение	
	мг		листья/талломы	талломы/листья
Ni	0,113	0,113	1,00	1,00
Cu	0,342	0,358	0,96	1,05
Cd	0,039	0,027	1,45	0,69
Pb	0,128	0,318	0,40	2,48
Fe	14,77	23,88	0,62	1,62
Mn	68,48	22,68	3,02	0,33
Zn	46,44	10,15	4,58	0,22

Листья березы на болоте в условиях сильного освещения становятся более мелкими, чем под пологом леса, в тени, что представляет собой адаптацию, приспособление к неблагоприятному режиму водно-минерального питания. Размеры листьев березы представляют основную характеристику при расчете площади поверхности кроны. Лишайник *B. fuscescens* на всем стволе берез накапливает биомассу 10–35 г (табл. 4).

Масса одного вида *B. fuscescens*, растущего на березе пушистой, сравнимая с общей биомассой всех видов лишайников на ветвях ели, 46,6 г [8]. При стабильном росте на стволах берез 35–40 лет скорость прироста лишайника можно оценить как 0,50–0,56 г в год.

При наличии данных массы листьев всей кроны березы возможно определение площади поверхности листьев кроны, с которой микроэлементы непосредственно поступают с осадками в местообитания лишайников. Площадь крон молодых деревьев березы невелика, около 4,5 м² (табл. 4). Сухая масса листьев кроны средневозрастной березы выше, до 2–3 кг, площадь, соответственно, выше более чем в 10 раз. Масса листьев березы в сосняках с березой 1600 кг/га, или 2,11 кг на дерево [9]. Сухая масса листьев кроны березы в сообществе небольшая, 214 г, что выше массы лишайника в 10,7 раз. По запасу микроэлементов в листьях кроны преобладают те, количество которых выше в листьях, Mn, Zn, также Cd. В листьях кроны березы их запас больше за счет большей концентрации и массы. Эти величины при расчете на одно дерево березы не так велики. Запас Pb и Fe в лишайнике выше, чем в однолетних листьях берез, Ni и Cu – близкий к 1 (табл. 5).

Влияние крон сосны на лишайник, видимо, сильнее, чем крон молодой рябины. Листья рябины сложные, из 15–17 листочков, и их площадь больше листа березы.

Таким образом, развитие лишайников происходит в различных ценологических условиях. Прямые оценки влияния кроны с учетом морфометрических параметров можно выполнить на отдельных деревьях. Необходимые показатели для этого – поверхность кроны и концентрации элементов в листьях. Данные о небольшой поверхности кроны березы согласуются с меньшим накоплением Mn на отдельных деревьях березы на болоте, чем под пологом соснового леса. В лесном сообществе на лишайник влияет весь комплекс факторов: полог, сомкнутость крон, распределение осадков. В сильно освещенных местообитаниях в лишайнике изменяются физиологические процессы. Оценивается рост кустистых видов в неоднородной обстановке [10]. Состав лишайника зависит от биологических свойств форофита и местообитания. По сравнению с листьями в лишайниках на стволах березы, содержание Pb выше в 2,1–2,7 раза, Cd – в 1,5, Fe – в 1,7–4,2 раз. Запас Pb и Fe в лишайниках на березе выше, чем в листьях кроны. В листьях берез более высокий запас Mn, Zn и Cd. Состав лишайника обогащается Mn, Zn, Cd при многолетнем влиянии вымывания из листьев березы.

Заключение

Под влиянием ценологических условий в кустистом лишайнике *Bryoria fuscescens* в большей степени изменяется концентрация Mn. Для прямого учета влияния кроны березы на лишайники определены параметры листьев, охарактеризованы размеры листьев и площадь поверхности кроны березы. В северной Карелии для *B. fuscescens* определены более высокие концентрации Ni и Cu, что, по-видимому, обусловлено широким распространением примесей в промышленных выбросах с территории Кольского полуострова.

Список литературы

1. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Гимельбрант Д.Е., Ликсакова Н.С., Спирин В.А., Кушневская Е.В., Гагарина Л.В., Ефимов П.Г. Краткие очерки трех планируемых ООПТ востока Ленинградской области // Ботанический журнал. 2017. Т. 102, № 9. С. 1270–1289.
2. Ликсакова Н.С., Сорокина И.А. Редкие растительные сообщества на проектируемых для охраны территориях на востоке Ленинградской области // Ботанический журнал. 2017. Т. 102, № 2. С. 232–248.
3. Катаева М.Н., Беляева А.И. Содержание тяжелых металлов в эпифитном лишайнике *Hypogymnia physodes* в кронах можжевельника обыкновенного // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2023. № 11. С. 7–12. DOI: 10.17513/mjprfi.13585.
4. Чхобадзе А.Б., Филиппов Д.А. Лишайники болот охраняемого природного комплекса «Онежский» (Вологодская область) // Бюллетень Брянского отделения Русского ботанического общества. 2015. № 2 (6). С. 7–16.
5. Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1 С. 86–94.
6. Nordlokken M., Berg T., Flaten T.P., Steinnes E. Essential and non-essential elements in natural vegetation of southern Norway: contribution from different sources // The Science of the Total Environment. 2015. № 502. P. 391–399.
7. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головки Т.К. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на Европейском Северо-Востоке // Известия Самарского НЦ РАН. 2016. Т. 18, № 2. С. 221–225.
8. Gauslaa Y., Lie M., Ohlson M. Epiphytic lichen biomass in a boreal Norway spruce forest // Lichenologist. 2008. Vol. 40 (3). P. 257–266.
9. Пьявченко И.И. Биологическая продуктивность и круговорот веществ в болотных лесах Западной Сибири // Лесоведение. 1967. № 3. С. 32–43.
10. Esseen P.-E., Coxson D.S. Microclimat drives growth of hair lichens in boreal forest canopies after partial cutting // Forest ecology and management. 2024. Vol. 572. № 122319.