

УДК 574.472:582.29

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ ЕЛЬНИКА ПОДЗОНЫ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

Катаева М.Н., Беляева А.И.

Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, e-mail: mkmarikat@gmail.com

Изучено содержание тяжелых металлов в двух видах эпифитных лишайников *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и *Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. (Parmeliaceae). Район исследования расположен на Ладожско-Онежском перешейке, Ленинградская область, в подзоне средней тайги вне зон действия локального атмосферного загрязнения. Лишайники собирали в ельнике кустарничково-зеленомошном на разных форофитах, на ветвях ели европейской и стволах березы повислой. Содержание тяжелых металлов в лишайниках характеризует отсутствие техногенного влияния. При химическом анализе в лишайниках обнаружены фоновые концентрации металлов. Тип форофита влияет на накопление Zn, Mn и Fe. Концентрации Zn в лишайниках на стволах березы выше по сравнению с ветвями ели в *H. physodes* в 1,87 раз, в *U. dasopoga* в 2,57 раз. Содержание Mn в лишайниках на стволах березы выше до 2,03 раз. Более высокие концентрации тяжелых металлов накапливает *Hypogymnia physodes*. Выявлено влияние условий местообитаний на состав лишайников. В листьях березы, хвое ели и субстратах обнаружены фоновые концентрации. Показано, что концентрации химических элементов в обоих лишайниках изменяются под влиянием форофита.

Ключевые слова: эпифитные лишайники, средняя тайга, тяжелые металлы, *Hypogymnia physodes*, *Picea abies*, *Betula pendula*

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN EPIPHYTIC LICHENS IN SPRUCE FOREST OF MIDDLE TAIGA SUBZONE

Kataeva M.N., Belyaeva A.I.

Komarov Botanical Institute RAS, Sankt-Petersburg, e-mail: mkmarikat@gmail.com

The content of heavy metals in two species of epiphytic lichens *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl and *Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. (Parmeliaceae) was studied. The study area is located in the Ladoga-Onega Isthmus, Leningrad Region in the middle taiga subzone outside the zones of local atmospheric pollution. Lichens were collected in a dwarf-shrub green moss spruce forest from different phorophytes, on the branches of European spruce and on the trunks of silver birch. The content of heavy metals in lichens characterizes the absence of technogenic impact. As a result of the analysis, background concentrations of metals in lichens were found. The phorophyte type affects the accumulation of zinc, manganese and iron. The content of Mn, Zn and Fe in lichens is influenced by biotic factors and the type of phorophyte. The Zn concentration on birch trunks is 1,87 times higher in *H. physodes*, and 2,57 times higher in *U. dasopoga* than in these lichens on spruce branches. On birch trunks, Mn concentrations in lichens is higher up to 2,03 times. *Hypogymnia physodes* accumulates higher concentrations of heavy metals. The influence of habitat conditions on the accumulation of metals in lichens was revealed. Background concentrations were found in birch leaves, spruce needles, and substrates. It was shown that the concentration of chemical elements in both lichens changes under influence of the phorophyte.

Keywords: epiphytic lichens, middle taiga, heavy metals, *Hypogymnia physodes*, *Picea abies*, *Betula pendula*

Поступление веществ с атмосферными выпадениями под полог леса – источник питания для растений. Древесный полог задерживает часть осадков и обогащает их химическими элементами, влияя на качественные и количественные показатели состава осадков в лесных сообществах. В хвойных фитоценозах тайги, в зависимости от их типов и времени вегетационного периода, осадки концентрируются кронами. Под пологом сформировавшегося фитоценоза сглаживается радиационный режим и формируется более благоприятный для роста и развития лишайников влажный микроклимат. В ельниках сильно снижается освещенность, в кронах концентрируются осадки, ослабляется скорость ветра. В лесных сообществах мало изучено влияние вида форофита на химический состав эпифитных лишайников. Широкая экологическая амплитуда отдельных видов лишайников по от-

ношению к субстрату дает возможность выявить изменчивость их микроэлементного состава в разных сообществах и на разных древесных породах. Закономерности эколого-ценотической приуроченности эпифитных лишайников в среднетаежных хвойных лесах региона известны далеко не полностью. Ель европейская в этом отношении менее изучена, нужны сведения о влиянии экологических факторов на химический состав лишайников в фитоценозе и экологические предпочтения видов лишайников. Ель европейская и береза повислая являются одними из основных лесообразующих видов в регионе. Экологических исследований лишайников на этих древесных породах проведено недостаточно.

Цель исследования – дать характеристику фоновых значений концентраций металлов в лишайниках, растущих в ельнике на разных видах форофитов.

Материалы и методы исследования

Концентрации тяжелых металлов в эпифитных лишайниках *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Usnea dasopoga* (Ach.) Nyl. изучали в таежном фитоценозе на северо-западе России в южной части Ладожско-Онежского перешейка, юго-восток побережья Ладожского озера, вне зон действия атмосферного загрязнения. Лишайники собраны в ельнике кустарничково-зеленомошном в подзоне средней тайги в августе 2018–2019 гг. Район исследования расположен в бассейне р. Свирь на северо-востоке Ленинградской области, Лодейнопольский район. Высота расположения фитоценоза над уровнем моря 26 м. Район исследования расположен на равнинной территории, типичной для условий средней тайги. Древостой состоит из ели европейской *Picea abies* (L.) Karst. Хвойные фитоценозы развиваются со сменой пород, и в данном сообществе кроме ели, присутствует также береза повислая *Betula pendula* Roth. В мохово-лишайниковом ярусе распространен *Pleurozium schreberi*, другие зеленые мхи, лишайник *Peltigera aphthosa*. Возраст сообщества 90–110 лет, без признаков повреждения пожаром. Видовой состав эпифитных лишайников в этом ельнике довольно разнообразен, присутствуют виды рода *Bryoria*, *Platismatia glauca*.

Образцы лишайников собирали по видам. Высота сбора 1,3 м. Для сравнения выбраны два типа местообитаний лишайников на ели, в нижней части кроны и на стволах березы. Субстратом для лишайников являлась древесина нижних сухих ветвей в кроне ели толщиной 0,7–1,0 см и гладкая кора стволов березы. Образцы лишайников собирали на 2–3 деревьях вида форофита. Длина талломов *Usnea dasopoga* – 8–15 см, размер *Hypogymnia physodes* – 4–5 см. В местообитаниях лишайников собирали пробы хвои ели и листьев березы, коры ели и березы, сухие ветви ели. Материал после сбора помещали в бумажные пакеты. Образцы лишайников высушивали до воздушно-сухого веса, озоляли при 450 °С в муфеле, золу растворяли при нагревании в 2N HCl. Концентрации химических элементов измеряли на ААС Квант-АФА, Россия. Определения делали в двух аналитических и биологических повторностях. Для обработки данных использовали стандартный пакет Microsoft Excel 2010.

Результаты исследования и их обсуждение

Эпифитные лишайники *Hypogymnia physodes*, *Usnea dasopoga* – обычные виды

в районе исследования, которые встречаются в лесных сообществах на лиственных и хвойных породах. Среднетаежные хвойные леса на юго-восточном побережье Ладожского озера не испытывают прямого влияния техногенного загрязнения от локальных источников промышленных выбросов. В результате анализа лишайников не выявлено значительного загрязнения тяжелыми металлами. При сходстве содержания этих элементов в двух видах лишайников, концентрации Zn и Mn в них в местообитаниях на стволах березы и ветвях ели отличаются более значительно. На обоих форофитах лишайники накапливают низкие концентрации Ni и Cu, которые варьируют слабо (табл. 1).

На стволах березы повислой характерно накопление высоких концентраций цинка (Zn) в лишайниках, в *H. physodes* – 94,1 мг/кг и *U. dasopoga* – 63,2 мг/кг, что в 1,87 раз и 2,57 раз соответственно выше содержания элемента в этих видах лишайников на ветвях ели в нижней части кроны. Другой отличительной особенностью состава лишайников на стволах березы является накопление довольно высоких концентраций марганца (Mn) в обоих видах в пределах 749–819 мг/кг. По сравнению со средним содержанием на ветвях ели, в местообитаниях на стволах березы концентрации Mn в *H. physodes* повышены в 2,02 раза, *U. dasopoga* – в 2,03 раза. Содержание Mn в среднем составе лишайников, растущих на березе, значимо выше. Осадки, проходящие через кроны березы и стекающие по стволам, обогащаются цинком и марганцем, что приводит к накоплению этих элементов в лишайниках. В листьях березы и хвое ели накапливается Mn [1]. Состав осадков под пологом леса связан с содержанием химических элементов в листьях и хвое. Распределение осадков под кронами деревьев по площади фитоценоза происходит неравномерно и находится в зависимости от развития древесного полога. Крона ели концентрирует осадки. Поступление осадков возрастает по краям кроны ели, в средней части кроны ели и около ствола больше осадков задерживается. На край кроны ели приходится поступление большего количества осадков, в стволовой части поступает их меньшая часть, характерен сток дождевых осадков по краям кроны. На ветвях по краю кроны ели складываются благоприятные условия для роста и питания лишайников. Кроме этого, в умеренных широтах такие субгоризонтальные поверхности за счет расположения солнца над горизонтом лучше освещены летом, что создает благоприятные условия для поселения и развития лишайников.

Таблица 1

Средние концентрации металлов в лишайниках ельника на разных форофитах, мг/кг

Вид	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
<i>Сухие ветви ели</i>							
<i>Hypogymnia physodes</i>	1,01 ± 0,21	2,53 ± 0,15	0,23 ± 0,02	4,99 ± 1,2	205 ± 18,6	405 ± 115	50,1 ± 2,0
<i>Usnea dasopoga</i>	0,62 ± 0,16	1,83 ± 0,39	0,11 ± 0,01	1,99 ± 0,28	65,8 ± 8,2	368 ± 125	24,6 ± 2,1
<i>Стволы березы</i>							
<i>Hypogymnia physodes</i>	1,14 ± 0,17	3,04 ± 0,19	0,51 ± 0,19	4,74 ± 0,93	199 ± 18	819 ± 6,40	94,1 ± 26,5
<i>Usnea dasopoga</i>	0,72 ± 0,04	1,77 ± 0,08	0,32 ± 0,02	1,81 ± 0,08	50,9 ± 6,9	749 ± 77,8	63,2 ± 8,2
<i>Средние концентрации в видах лишайников на форофите</i>							
Ель, среднее и ошибка средней	0,82 ± 0,19	2,18 ± 0,35	0,17 ± 0,06	3,49 ± 1,50	135 ± 69,6	387 ± 18,5	37,4 ± 12,7
Береза, среднее и ошибка средней	0,93 ± 0,21	2,41 ± 0,63	0,41 ± 0,09	3,28 ± 1,47	125 ± 74,0	784 ± 35,0	78,6 ± 15,5

Химический состав лишайников чаще изучается при влиянии загрязнения и менее известно влияние на лишайники природных факторов, таких как форофит. Листья березы накапливают значительное количество Zn и Mn [1, 2]. Содержание Zn в листьях березы в ельнике при отсутствии техногенного загрязнения составляет 156 мг/кг, концентрация Mn достигает 1600 мг/кг. Под кронами возрастает поступление водорастворимых форм Zn и Mn с осадками, что является источником для накопления в лишайниках и изменения их состава на разных форофитах. Дождевые осадки после прохождения через кроны березы вымывают эти элементы [3]. Вид *H. physodes* принадлежит к листоватой жизненной форме и накапливает более высокие концентрации всех изученных элементов, по сравнению с кустистым видом *U. dasopoga*, растущим в тех же условиях. Содержание свинца (Pb) отличается сильнее в связи с принадлежностью к разным жизненным формам изучаемых видов лишайников, чем в условиях субстратов разных форофитов в экологически различных местообитаниях. На ветвях ели различия между видами *H. physodes* и *U. dasopoga* по содержанию Pb составляют 2,50 раза, на стволах березы – 2,61 раза. Концентрации свинца (Pb) также слабо отличаются в лишайниках на разных субстратах, более значительные отличия обнаруживаются по видам. По содержанию железа (Fe) выявлен такой же характер различий между видами

лишайников на одном типе субстрата. *H. physodes* по концентрации Fe в 3,11 раза превосходит *U. dasopoga* на ветвях ели, на стволах березы – в 3,90 раза. В местообитаниях на краях ветвей ели содержание Fe в *U. dasopoga* на 29,2% выше.

Эпифитные лишайники представляют собой чувствительный компонент фитоценоза по отношению к действию атмосферного загрязнения, и разные виды обладают неодинаковой устойчивостью к действию тяжелых металлов. При накоплении тяжелых металлов ионообменные свойства клеточных стенок рассматриваются как главный механизм, который непосредственно влияет на поступление элементов минерального питания в таллом лишайников [4]. К числу наиболее опасных металлов, загрязняющих экосистемы все более широко с дальним переносом выбросов, относится Cd.

Обнаружено, как и в случае накопления цинка, на стволах березы лишайники накапливают больше кадмия (Cd). Согласно полученным данным, в лишайниках на стволах березы отмечается повышение содержания Cd в среднем составе биомассы лишайников в 2,41 раза, от 0,17 мг/кг до 0,41 мг/кг. Данная особенность, по-видимому, связана с питанием лишайников обогащенными микроэлементами стоком по стволу березы, вымыванием элемента из кроны. Есть данные, характеризующие накопление Cd в листьях березы в фоновых условиях произрастания до 0,67 мг/кг [2]. По-видимому, поступление Cd в лишайники с осадками

на стволах березы происходит как за счет концентрирования в кронах с осадками, так и вымывания из листьев. Концентрации Cd в лишайниках в ельнике обнаружены низкие (0,11–0,51 мг/кг), и они могут рассматриваться как фоновые.

В изучаемом ельнике концентрации химических элементов в листьях березы несколько выше, по сравнению с хвоей ели. Листья березы накапливают Zn до 135 мг/кг (табл. 2).

капливают более высокие концентрации Zn, по сравнению с лишайниками. При отсутствии влияния загрязнения на фитоценоз можно выявить особенности химического состава лишайников, связанные с влиянием на них экологических условий. В фитоценозе условия местообитаний лишайников различаются. В эпифитных лишайниках кустистой и листоватой жизненных форм выявлено изменение содержания элементов при близком к горизонтальному расположе-

Таблица 2
Средние концентрации металлов в компонентах елового фитоценоза, мг/кг

Объект	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
Листья березы	2,35 ± 1,48	2,60 ± 0,29	0,184 ± 0,01	0,47 ± 0,09	37,7 ± 8,05	1880 ± 65	135 ± 0,80
Хвоя ели, 2-летняя	0,67 ± 0,03	1,13 ± 0,02	0,020 ± 0,01	0,40 ± 0,03	14,3 ± 0,20	1360 ± 46	32,0 ± 0,85
Кора ели	0,27 ± 0,04	2,41 ± 0,59	0,250 ± 0,08	1,84 ± 0,39	41,0 ± 6,36	342 ± 16,9	93,7 ± 8,90
Кора березы	0,20 ± 0,05	2,48 ± 0,05	0,055 ± 0,01	0,80 ± 0,29	12,2 ± 8,65	366 ± 10,0	37,9 ± 0,41
Сухие ветви ели	0,27 ± 0,09	0,94 ± 0,11	0,06 ± 0,004	2,65 ± 0,45	22,4 ± 8,37	62,4 ± 4,03	11,1 ± 3,50

В листьях березы концентрация Zn в 4,21 раза выше содержания в хвое ели, что коррелирует с накоплением Zn в лишайниках на березе. Марганец довольно интенсивно накапливается в ассимилирующих органах обоих форофитов, в листьях и хвое. Концентрация Mn в листьях березы выше, 1880 мг/кг, что соответствует составу лишайников, растущих на стволах березы. При анализе двулетней хвои ели в кроне в местообитаниях лишайников, обнаружено значительное содержание Mn – 1360 мг/кг, что согласуется с данными о накоплении Mn в многолетней хвое. Концентрации Ni и Cu в листьях и хвое следует рассматривать как фоновые, они не превышают 3,0 мг/кг. Содержание Pb (0,40–0,47 мг/кг) в них также фоновое. Хвоя ели содержит очень низкие следовые концентрации Cd. Состав обоих видов лишайников на березе с более высоким накоплением Cd согласуется с тенденцией к повышению концентраций элемента в листьях. Субстраты лишайников – сухие ветви ели, также кора стволов не загрязнены металлами.

По сравнению с листьями березы и хвоей ели, лишайники накапливают более высокие концентрации Pb и Fe, сопоставимые с листьями березы концентрации Cd, Ni, Cu. В лишайниках менее высокие содержания Mn, относительно листьев березы и хвои ели. В хвое ели выявлены концентрации Ni и Cu, сравнимые со значениями в лишайниках, в хвое меньше Cd. Листья березы на-

нии местообитаний на ветвях ели и при вертикальном на стволах березы. На ветвях ели лишайники содержат более высокие концентрации Fe. В лишайниках на разных форофитах различается накопление Zn и Mn.

Химический состав эпифитных лишайников тесно связан с их атмосферным способом питания и поступлением осадков в фитоценозе. Направлением исследований на фоновых территориях остается определение уровня естественного варьирования и выявление видовой специфики накопления тяжелых металлов в лишайниках. Получение таких данных позволяет характеризовать влияние крон в пологом древостое фитоценоза на атмосферные осадки и выявлять степень загрязнения лишайников и особенности накопления металлов разными видами и жизненными формами. В работе показано, что более сильно в лишайниках изменяется содержание Mn, компонента состава хвои и листьев древесного полога, и Zn и Fe. Данные для лишайников на стволах березы могут использоваться для оценки фоновых концентраций металлов, за исключением Zn, в связи с накоплением листьями березы.

При естественном развитии фитоценоза происходит также развитие сообществ лишайников. Присутствие в сообществе видов лишайника кустистой жизненной формы *Usnea dasopoga* характеризует долговременное стабильное развитие кустарничково-зеленомошного ельника и в целом характеризует его в качестве мало нарушенного

загрязнением и благоприятного для роста и развития эпифитных лишайников. Лишайник *Peltigera aphthosa* в мохово-лишайниковом покрове также является индикатором длительного развития и отсутствия нарушений пожаром сообщества ельника. Многие виды эпифитных лишайников, особенно кустистой жизненной формы, крайне чувствительны к резким изменениям условий среды обитания, в том числе к нарушениям состояния лесных сообществ при атмосферном загрязнении, что является причиной резкого сокращения их разнообразия и встречаемости. В лесных сообществах вблизи Ладожского озера имеются перспективные охраняемые территории с довольно высоким видовым разнообразием лишайников [5, 6]. В данном регионе мало данных о степени загрязнения лишайников и возможностях сохранения их флоры и факторах развития. В этом отношении более изучены виды лишайников на смежной территории в Карелии в заповеднике «Кивач». Кроме этого, в регионе неизвестны фоновые концентрации в лишайниках, встречающихся на разных форофитах. Полученные данные позволяют установить фоновые значения и выявить особенности накопления элементов лишайниками разных жизненных форм.

Для мониторинга загрязнения лесных сообществ около Ладожского озера необходимы данные фоновых концентраций элементов в лишайниках. В этот район могут поступать выбросы промышленности от мегаполиса Санкт-Петербурга и близко расположенных территорий Карелии и юга Финляндии. Нужны данные о возможностях сохранения эпифитных лишайников в условиях атмосферного загрязнения и оптимальных условиях роста лишайников. В результате исследования в лишайниках выявлены довольно низкие концентрации тяжелых металлов. Определены естественные изменения концентраций металлов в лишайниках, растущих на разных видах форофитов для характеристики фоновых значений. Накопление металлов (Cd, Fe, Mn, Zn) в лишайниках в значительной степени обусловлено влиянием вида форофита. Содержание тяжелых металлов в двух видах эпифитных лишайников различается. В разных условиях местообитаний вид *H. physodes* проявляет более высокую способность к биоаккумуляции металлов.

Заключение

При поступлении загрязняющих веществ с осадками компоненты выбросов обнаруживаются в составе природных объектов на окружающих территориях. Изучена аккумуляющая способность видов лишайни-

ков *Hypogymnia physodes* и *Usnea dasopoga*, растущих на разных форофитах в ельнике кустарничково-зеленомошном. Признаков влияния загрязнения в фитоценозе не обнаружено, концентрации тяжелых металлов в лишайниках низкие, и их следует рассматривать в качестве фоновых, характерных для естественного ненарушенного состояния фитоценозов. Широко распространенные виды лишайников создают основу формирования сообществ эпифитных лишайников, и на их примере можно выявить общие закономерности изменений элементного состава лишайников. На березе лишайники содержат более высокие концентрации Zn, превосходящие до 2,57 раз значения на ветвях ели, Mn до 2,03 раз. Листья березы содержат более высокие концентрации Mn и Zn, что соответствует более сильному накоплению этих элементов в обоих видах лишайников на стволах березы. Оба вида лишайников содержат довольно низкие концентрации Cd, Pb, Ni, Cu. Не обнаружено загрязнения листьев березы, хвои ели, эпифитных лишайников и субстратов в ельнике. Концентрации элементов в лишайниках характеризуют фоновые значения при отсутствии влияния атмосферного загрязнения. Результаты можно применять для изучения загрязнения лишайников в лесных сообществах.

Работа выполнена по плановой теме НИР 2021–2023 гг. № 121032500047-1 «Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации», «Разнообразие, динамика и принципы организации растительных сообществ Европейской России» АААА-А19-119030690058-2.

Список литературы

1. Сухарева Т.А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438–441.
2. 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.
3. Шильцова Г.В., Ласточкина В.Г. Влияние погоды основного и березового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 180–184.
4. Мейчик Н.Р., Любимова Е.Г., Ермаков И.П. Ионобменные свойства клеточной стенки кустистого лишайника *Cladonia rangiferina* // Физиология растений. 2010. Т. 57. № 2. С. 273–279.
5. 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.
6. Сорокина И.А., Степанчикова И.А., 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.