

СТАТЬИ

УДК 574.472:582.29

**НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
В ЭПИФИТНЫХ ЛИШАЙНИКАХ
В РАЗЛИЧНЫХ МИКРОМЕСТООБИТАНИЯХ
НА ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ В ПОДЗОНЕ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ****Катаева М.Н., Беляева А.И.***Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург,**e-mail: mkmarikat@gmail.com*

В работе сравниваем концентрации микроэлементов в эпифитных лишайниках и их субстратах в болотных и лесных сообществах подзоны средней тайги для уточнения оценок фоновых значений. Определено содержание химических элементов в двух видах эпифитных лишайников, *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf. и *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. (Parmeliaceae), на территории Ладожско-Онежского перешейка (Ленинградская область). Изучено содержание тяжелых металлов в *P. furfuracea* в связи с влиянием кроны ели европейской в разных микроместообитаниях ельника кустарничково-сфагнового. Установлено влияние кроны двух форофитов в пологе леса на накопление микроэлементов в лишайниках. В лишайниках и субстратах обнаружены низкие содержания тяжелых металлов, которые отнесены к фоновому уровню. Талломы лишайников на стволах березы отличаются более высокими концентрациями Zn по сравнению с ветвями ели (в 2–2,8 раза) и повышенным уровнем Mn (до 6 раз). На ветвях ели в микроместообитаниях в лишайниках сильнее варьируют концентрации Pb, Cd, Mn и Fe, чем других элементов. При слабом влиянии кроны в лишайниках на сухих ветвях ели в 2,26 раза снижается концентрация Mn. Концентрация Fe в лишайниках на сухих ветвях ели повышается (до 2,24 раз). Содержание Mn в лишайниках изменяется более резко под влиянием сомкнутой кроны ели.

Ключевые слова: эпифитные лишайники, средняя тайга, microelements, *Pseudevernia furfuracea*, *Picea abies*, *Betula pendula*

**ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN EPIPHYTIC LICHENS
IN DIFFERENT MICROHABITATS ON EUROPEAN SPRUCE
IN THE MIDDLE TAIGA SUBZONE****Kataeva M.N., Belyaeva A.I.***Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg, e-mail: mkmarikat@gmail.com*

In this study we compare concentrations of microelements in lichens and substrates in mire and forest communities in the middle taiga subzone to refine estimates of background values. The content of chemical elements in two species of epiphytic lichens *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf. and *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. (Parmeliaceae) on the territory of the Ladoga-Onega Isthmus, Leningrad Region was determined. The content of heavy metals in *P. furfuracea* was studied in connection with the influence of the European spruce crown in different microhabitats of the dwarf shrub-sphagnum spruce type forest. The influence of crown of two phorophytes in the forest canopy on the accumulation of microelements in lichens was established. Concentrations of heavy metals in lichens and substrates that were found are referred background level. Lichen thalli on birch trunks differ from habitat on spruce branches by higher zinc concentrations (2–2,8 times) and higher Mn level (up to 6 times). On spruce branches in microhabitats in lichens the variation of concentrations of Pb, Cd, Mn, and Fe prevails over other elements. Due to weak influence of crowns in the dwarf shrub-sphagnum spruce type forest the concentration of Mn in lichens on died branches of spruce is decreased by 2.26 times. The concentration of Fe in lichens growing on died branches of spruce is higher (up to 2.24 times). The content of Mn is increased more strongly in lichens under influence of closed crown of spruce.

Keywords: epiphytic lichens, middle taiga, microelements, *Pseudevernia furfuracea*, *Picea abies*, *Betula pendula*

При возрастающем влиянии техногенного загрязнения на лесные сообщества необходимо изучение и оценка их состояния в естественных условиях. В регионе северо-запада европейской части мало изучен уровень загрязнения эпифитных лишайников и не установлены фоновые концентрации тяжелых металлов. Фоновые значения представляют точку отсчета для сравнений концентраций загрязняющих веществ в природных объектах.

Еловые леса, в особенности заболоченные, могут длительное время существовать, не испытывая нарушений, таких как пожа-

ры, ветровалы. В ельниках образуются разнообразные экологические условия, с ними связано высокое биологическое разнообразие лишайников. Влияние сомкнутой древостоя формирует в пространстве крон градиенты влажности и температуры. Известно, что благоприятные для роста и развития эпифитных лишайников микроклиматические условия образуются вблизи оснований стволов деревьев, в связи с поступлением осадков и испарением мохово-лишайникового яруса, другой зоной с развитием лишайников является крона деревьев. В стволовой части взрослых деревьев ели поступление

осадков меньше, условия обычно более сухие, что приводит к менее активному росту и развитию лишайников.

Развитая крона деревьев способствует задерживанию атмосферных осадков, в зависимости от древесной породы. В кроне деревьев осадки распределяются неоднородно. В кроне ели осадки распределяются по краям кроны. Для березы характерен собирающий тип кроны, с интенсивным стоком осадков по стволам. Ель имеет сбрасывающий тип кроны.

Известно, что для роста и развития лишайников важен влагообмен с атмосферой. Под пологом лесного сообщества образуется влажный микроклимат, который благоприятен для роста и развития лишайников. Древостой изменяет условия влажности в разных типах леса и на разных высотах полога. В условиях заболоченных сообществ и болот с разреженным древесным ярусом на эпифитные лишайники действуют такие экологические факторы, как высокая относительная влажность воздуха и сильная освещенность. Градиент влажности, обычный для условий под пологом леса, на болотах изменяется. Высокая влажность воздуха на болотах связана с испарением с поверхности мохово-лишайникового покрова.

Данных по накоплению тяжелых металлов в лишайниках в связи с влиянием кроны ели европейской мало. В зависимости от экологической амплитуды видов и характеристик микростообитания содержание тяжелых металлов в видах эпифитных лишайников сем. Parmeliaceae и их субстратах не было изучено.

Цель исследования – определить фоновые концентрации металлов в эпифитных лишайниках сем. Parmeliaceae, растущих в сообществах ельников в дренированных и гидроморфных условиях на разных видах форофитов в средней тайге.

Материалы и методы исследования

Эпифитные лишайники *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf. и *Platismatia glauca* (L.) W. L. Culb. et C. F. Culb. собирали в ельнике кустарничково-зеленомошном в дренированных условиях и в ельнике кустарничково-сфагновом в условиях края болота в июле – августе 2018–2019 гг. Район исследования находится в подзоне средней тайги, на северо-западе европейской части в южной части Ладожско-Онежского перешейка, юго-восток побережья Ладожского озера. Территория находится на северо-востоке Ленинградской области, Лодейнопольский район, в бассейне р. Свирь. Высота фитоценозов над уровнем моря 24–26 м. В районе отсутствуют локальные источники атмосферного загрязнения.

В ельнике кустарничково-зеленомошном в древостое основное участие принимает ель европейская *Picea abies* (L.) Karst., присутствует береза повислая *Betula pendula* Roth. В древесном ярусе и подлеске встречаются также рябина, сосна, реже можжевельник. В мохово-лишайниковом ярусе ельника распространены зеленые мхи, из которых преобладает *Pleurozium schreberi*. Возраст этого сообщества 90–110 лет, без признаков повреждения пожаром. На ветвях ели присутствуют кустистые лишайники, виды р. *Bryoria* и *Usnea*.

Возраст низкорослых елей (2,0–2,2 м) в ельнике кустарничково-сфагновом – 95 лет, определен по радиальным спилам основания стволов. В кронах деревьев ели и на стволиках тонких берез под кронами, на ветвях, встречаются разные виды эпифитных лишайников. При интенсивном освещении в разреженном ельнике кустарничково-сфагновом на ветвях, сучьях и стволах сухостойной ели более распространены темноокрашенные виды рода *Bryoria*.

Для изучения содержания тяжелых металлов были выбраны виды эпифитных лишайников с широкой экологической амплитудой, встречающиеся на разных форофитах, из групп по отношению к водному режиму гигромезофитов и мезофитов. В дренированных условиях ельника сопоставляли два типа местообитаний лишайников на разных форофитах. Образцы лишайников собирали на высоте 1,3 м, в нижней части кроны на сухих ветвях ели европейской и на стволах березы повислой. В ельнике кустарничково-сфагновом лишайники собирали на ели в трех типах микростообитаний, на живых ветвях ели в разреженных кронах, по краям на их частях, сухих ветвях ели длиной 8–12 см и отдельно на сухих ветвях, диаметр ветвей 0,4–0,6 см.

В фитоценозе образцы лишайников собирали на двух-трех разных деревьях вида форофита. Размер талломов лишайников составил 4–7 см. В местообитаниях лишайников также собирали пробы корки ели, отслаивающиеся пластины, субстрат лишайников – древесину нижних сухих ветвей в кроне ели без корки толщиной 0,7–1,0 см, и гладкую корку стволов березы. Образцы лишайников складывали в бумажные пакеты, высушивали в лаборатории до воздушно-сухого веса. Пробы озоляли при 450 °С в муфеле, золу растворяли при нагревании в 2N HCl. Концентрации химических элементов определяли на ААС Квант-АФА (Россия) в двух аналитических и повторностях. Для обработки данных использовали стандартный пакет Microsoft Excel 2010.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Эпифитные лишайники *Pseudevernia furfuracea* и *Platismatia glauca* – обычные виды в лесных сообществах, которые встречаются на хвойных и лиственных породах, предпочитают довольно освещенные местообитания. В зрелом сообществе ельника на ветвях в нижней части крон образуются благоприятные условия микроклимата для роста лишайников: изменяется тепловой режим, снижено влияние инсоляции, меньше освещенность, испарение, возрастает влагоудерживающая способность кроны, сглаживается интенсивный ветер. В нижнюю часть кроны ели поступают осадки с элементами питания лишайников.

В результате анализа выявлено, что в лишайниках в ельнике кустарничково-зеленомошном на ветвях ели и стволах березы содержатся довольно низкие концентрации металлов, компонентов техногенных выбросов – Ni, Cu, Pb, Cd. На разных видах форофитов концентрации этих элементов в лишайниках изменяются гораздо менее резко, в отличие от содержания в них Zn и Mn (табл. 1).

В составе осадков под пологом леса Zn и Mn – обычные биогенные элементы. По содержанию этих элементов лишайники в ельнике на разных форофитах, на ветвях ели и стволах березы, различаются более резко. Особенность состава лишайников на стволах березы – накопление высоких концентраций Zn, *P. furfuracea* содержит 72,5 мг/кг, *P. glauca* – 71,3 мг/кг. Содержание Zn в этих видах на стволах березы выше в 2,15 раза

и 2,83 раза соответственно концентраций элемента в них на ветвях ели. Лишайники на стволах березы накапливают также довольно высокие концентрации Mn, 610–739 мг/кг. Концентрации Mn в *P. furfuracea* на стволах березы выше в 3,31 раза, *P. glauca* – в 6,16 раза. Более резкие различия в *P. glauca* достигаются как за счет возрастания уровня Mn на стволах березы, так и слабого накопления Mn в талломах этого вида на ветвях ели. Концентрация Mn в *P. glauca* на ветвях ели ниже, по сравнению с Fe, во втором виде выше содержание Mn. В талломах *P. glauca* накопление Mn снижено. В среднем составе обоих видов лишайников на стволах березы содержание Mn выше в 4,44 раза, Zn – в 2,44 раза.

В лесном сообществе различается интенсивность растворения и смыва веществ с крон разных древесных пород. Состав осадков, стекающих по коре стволов деревьев, обогащается более длительное время и в большей степени, чем при поступлении сквозь листья кроны.

На лишайники влияют экологические условия внутри лесного сообщества. По сравнению с влиянием выбросов промышленного загрязнения и городской среды, данные о влиянии форофита на химический состав лишайников немногочисленны. Состав осадков под пологом леса связан с содержанием химических элементов в листьях и хвое. Листья березы и хвоя ели довольно интенсивно накапливают Mn [1]. В фоновых условиях листья березы содержат высокие концентрации Mn до 1600 мг/кг, а также Zn – до 156 мг/кг [1, 2].

Таблица 1

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

Вид	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
Сухие ветви ели, нижняя часть кроны, высота 1,3 м							
<i>Pseud-evernia furfuracea</i>	0,58±0,08	1,92±0,08	0,100±0,02	2,26±0,36	126±12	184±10	33,7±2,4
<i>Platis-matia glauca</i>	0,55±0,08	1,61±0,07	0,073±0,01	2,04±0,32	155±11	120±15	25,2±1,0
Стволы березы, высота 1,3 м							
<i>Pseud-evernia furfuracea</i>	0,76±0,04	1,97±0,11	0,185±0,04	2,10±0,30	137±13	610±194	72,5±4,6
<i>Platis-matia glauca</i>	0,84±0,08	1,87±0,06	0,180±0,01	2,86±0,08	164±4	739±40	71,3±10
Средние концентрации в видах лишайников на форофите							
Ель, среднее и ошибка средней	0,57±0,02	1,77±0,16	0,087±0,01	2,15±0,11	141±15	152±32	29,5±4,2
Береза, среднее и ошибка средней	0,80±0,04	1,92±0,05	0,183±0,01	2,48±0,38	151±13	675±64	71,9±0,6

Концентрации в листьях древесных пород могут изменяться в зависимости от лесорастительных или почвенных условий, фазы развития. Дождевые осадки после прохождения через кроны березы вымывают минеральные элементы. В осадках в лесных сообществах средней тайги под кронами березы установлено возрастание поступления водорастворимых форм Zn и Mn [3]. Осадки, проходящие через кроны березы и стекающие по стволам, обогащаются минеральными элементами, что приводит к их накоплению в лишайниках. Состав эпифитных лишайников на стволах березы и повышение в них концентраций Zn и Mn соответствует особенностям состава листьев, обогащению стока осадков. Содержание Zn и Mn в лишайниках на разных форофитах варьирует больше, чем содержание других микроэлементов.

Градиент экологических условий в кроне ели влияет на видовой состав и состояние лишайников. Строение кроны ели способствует концентрированию осадков. На ветвях по краю кроны ели образуется сочетание благоприятных условий для поселения, развития и питания лишайников. По краям кроны ели возрастает поступление осадков, характерна более сильная фильтрация дождевых осадков по сравнению со средней частью кроны ели и зоной около ствола, где больше осадков задерживается и к почве поступает их меньшая часть. Градиент для распределения видов лишайников по вертикали в кроне ели представляет освещенность. Ветви в верхней части кроны ели активнее заселяют виды лишайников, предпочитающие условия освещения, с темными пигментами в коровом слое, имеющих защитную функцию, виды р. *Bryoria*, тогда как виды рода *Usnea*, содержащие усниновую кислоту, поселяются на ветвях в нижней части кроны ели [4]. В местообитаниях лишайников на субгоризонтальных ветвях ели в нижней части кроны более влажные условия и больше осадков, чем в стволовой части, что благоприятно для роста кустистых лишайников.

При расположении местообитаний в средней части ветвей, под пологом ельника, на сухих нижних ветвях ели *P. furfuracea* накапливает более высокие концентрации элементов, кроме Mn, по сравнению с *P. glauca*. Накопление Pb в обоих видах невысокое – 2,04–2,86 мг/кг, слабо отличается на разных форофитах и субстратах. Содержание Fe в двух видах также мало различается. На краях ветвей ели содержание Fe в обоих видах – 126–155 мг/кг.

Типичное техногенное влияние на лесные экосистемы в западноевропей-

ских странах создает кислые осадки с высокими концентрациями тяжелых металлов в растворимой форме и твердой форме аэрозолей. Тяжелые металлы – компоненты промышленных выбросов обнаруживаются в составе природных объектов не только на окружающих локальных территориях, но и широко распространяются в отдаленные регионы. Известно, что после контакта с пологом леса осадки преобразуются, происходит растворение и вымывание аэрозольного материала с листовой поверхности, увеличивается доля растворимой, более геохимически активной части тяжелых металлов. Кадмий и свинец относятся к числу наиболее опасных металлов, загрязняющих экосистемы все более широко, с дальним переносом выбросов. Кадмий важен экологически, обладает высокой токсичностью при низких концентрациях, подвижен в водной и газовой фазах, способен к вторичному накоплению в различных биологических объектах. При накоплении тяжелых металлов катионообменные свойства клеточных стенок рассматриваются как главный механизм, который определяет поступление элементов в таллом лишайников [5].

Сопоставляли состав лишайников на разных видах форофитов для выявления специфических особенностей. В среднем составе лишайников на стволах березы повышается содержание Cd в 2,11 раза, до 0,183 мг/кг. Это, по-видимому, связано с влиянием питания лишайников на стволах березы обогащенными микроэлементами стоком, вымыванием Cd из листьев кроны березы, собирающей осадки. В условно фоновых условиях заповедника «Кивач» на территории Карелии в листьях разных видов берез определены концентрации Cd до 0,67 мг/кг [2]. Хвоя ели содержит низкие следовые концентрации Cd, всего 0,02 мг/кг, концентрации Cd в листьях березы повислой сопоставимы с лишайниками, 0,184 мг/кг [6]. По-видимому, поступление Cd в лишайники с осадками на стволах березы происходит как за счет концентрирования в кронах с осадками из пылевых фракций воздуха, так и вымывания из листьев. Концентрации Cd в лишайниках дренированного ельника низкие (0,073–0,185 мг/кг), могут рассматриваться в качестве фоновых. Установлено фоновое содержание Cd в других видах [6]. Не превышает фоновых концентраций в лишайниках Pb (2,0–2,9 мг/кг).

По площади фитоценоза под кронами деревьев осадки выпадают неравномерно, что показано при прямых методах учета осадков под пологом леса. Распределение осадков в фитоценозе зависит от развития и состава древесного полога. В заболочен-

ных ельниках и на болотах древесный ярус из-за неблагоприятных условий роста и водного режима местообитаний ослаблен. Разнообразные местообитания лишайников образуют сухие и усыхающие ветви крон ели, гладкие стволы с опавшей коркой. В сырых местообитаниях заболоченных лесов и болот условия менее подходящие для эпигейных лишайников, и их мало. В благоприятных условиях влажности на эпифитные лишайники негативно действует отсутствие древесного полога и сильная освещенность открытых местообитаний болот.

Содержание тяжелых металлов в лишайниках в ельнике кустарничково-сфагновом представлено в табл. 2.

Концентрации в лишайнике *P. furfuracea* отличаются от состава этого вида в ельнике кустарничково-зеленомошном. Во-первых, в ельнике кустарничково-сфагновом содержание Cd в талломах *P. furfuracea* на сухих ветвях ели (0,130 мг/кг) несколько выше концентрации в этом виде на сухих ветвях ели под кронами ельника. Во-вторых, при слабом влиянии кроны ели в ельнике кустарничково-сфагновом, в условиях всех микроместообитаний *P. furfuracea* содержит более высокие концентрации Fe. В среднем для всех микроместообитаний накопление Fe в лишайнике в 2,18 раза выше. На сухих ветвях ели Fe еще выше, в 2,24 раза. В-третьих, в лишайнике при слабом влиянии крон средняя концентрация Pb на всех типах ветвей ели ельника кустарничково-сфагнового также в 1,58 раза выше, (3,57 мг/кг). На сухих ветвях ели содержание Pb в талломах *P. furfuracea* близкое. В-четвертых, концентрация Mn, напротив, в лишайнике при слабо развитой кроне ели в ельнике кустарничково-сфагновом (на сухих ветвях 81,4 мг/кг) ниже в 2,26 раза. В этом ельнике в талломах лишайников содержание Fe преобладает над Mn. В условиях влияния крон ельника кустарничково-зеленомошного содержание

Mn в лишайниках выше, чем Fe, и соотношение обратное. На концентрации Zn в талломах лишайников кроны ели существенно не влияют. По сравнению с дренированным ельником, в разных микроместообитаниях на ветвях ели в лишайниках слабо повышены концентрации Cd, Ni и Cu (в 1,19–1,35 раз). В обоих видах лишайников на стволах березы дренированного ельника слабо повышаются концентрации Ni, в среднем в 1,42 раза, что, вероятно, связано со стоком осадков по стволу и собирающим типом кроны.

Известно, что химический состав эпифитных лишайников с их атмосферным способом питания тесно связан с поступлением осадков в фитоценозе. Загрязняющие вещества поступают в фитоценоз при осаждении аэрозолей, пыли, также в виде растворенных соединений со снеговыми и дождевыми осадками. Содержание металлов в лишайниках в этих фитоценозах, по-видимому, определяется под влиянием разных типов осадков и уровнем их загрязнения тяжелыми металлами (Fe, Pb, Cd). В ельнике кустарничково-сфагнового, по-видимому, поступает более значительное количество снеговых осадков, аккумулирующих загрязняющие вещества за длительное время.

Выявлено, что состав обоих видов лишайников на березе с более высоким накоплением Cd согласуется с тенденцией к повышению концентраций элемента в листьях. Строение собирающей осадки кроны березы способствует обогащению стока по стволу, что приводит к накоплению отдельных металлов в талломах лишайников на стволе березы. Для ели европейской во взрослом возрасте характерен другой тип кроны, сбрасывающей и рассеивающей осадки. Поступление осадков выше по краям кроны ели. Местообитания лишайников на стволах берез с интенсивным стоком могут являться первыми индикаторами поступления Cd с осадками в фитоценоз.

Таблица 2

Концентрации металлов в лишайнике *Pseudevernia furfuracea* в ельнике кустарничково-сфагновом в разных микроместообитаниях

Микроместо-обитание	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
<i>Живые ветви с хвоей в кроне ели</i>							
1	0,82±0,02	2,51±0,02	0,119±0,01	6,68±0,2	235±20	110±15	24,9±5
<i>Сухие ветви по краю живых ветвей с хвоей в кроне ели, длина 8–12 см</i>							
2	0,76±0,08	2,58±0,01	0,108±0,01	1,68±0,35	310±25	112±17	16,7±1
<i>Сухие ветви в кроне ели</i>							
3	0,78±0,10	2,67±0,15	0,130±0,02	2,35±0,23	282±31	81,4±23	29,5±10
Среднее m±sd	0,79±0,03	2,59±0,08	0,119±0,01	3,57±2,71	276±37,9	101±17	23,7±6
Коэффициент вариации, CV, %	3,88	3,10	9,24	76,0	13,8	16,9	27,4

Таблица 3

Концентрации металлов в субстратах эпифитных лишайников ельников на разных типах ветвей ели и стволах березы

Субстрат	Ni	Cu	Cd	Pb	Fe	Mn	Zn
<i>Ельник кустарничково-зеленомошный</i>							
Древесина, сухие ветви ели	0,23±0,02	0,86±0,2	0,051±0,002	2,35±0,03	25±0,6	65,3±4	11±2
Корка березы	0,22±0,04	3,82±0,5	0,060±0,001	1,0±0,06	22±8	265±42	37±1
Корка стволов ели	0,31±0,4	2,0±0,07	0,302±0,01	2,11±0,07	46±5	480±14	87±1,0
<i>Ельник кустарничково-сфагновый</i>							
Кора ветвей ели	1,30±0,12	3,69±0,5	0,240±0,09	6,90±3,2	154±10	136±11	96±16
Древесина сухие ветви ели 5–6 мм	0,13±0,0	0,89±0,2	0,034±0,001	0,38±0,03	30±5	40±10	20±6
Корка ствола низкорослой ели, 2 м	0,42±0,08	1,85±0,4	0,131±0,02	4,90±0,33	77±10	251±9	109±10
Сухие ветви сухостоя ели, 2,5 м, серые, <i>Bryoria</i> sp.	0,18±0,0	0,93±0,03	0,090±0,02	2,40±0,10	44±10	39±4	20±0,8

Концентрации элементов в субстратах лишайников в различных микроместообитаниях на ветвях ели в сравнении с другими условиями приведены в табл. 3.

Субстрат в микроместообитаниях лишайника *P. furfuracea* – древесина сухих ветвей ели в ельнике кустарничково-сфагновом содержит самые низкие концентрации металлов. В корке ветвей ели в этом ельнике содержание биогенных элементов Mn, Fe и Zn, а также Ni, Cu, Cd и особенно Pb (6,90 мг/кг) выше, по сравнению с сухой древесиной ветвей ели. Содержание тяжелых металлов, сопоставимое в сухих ветвях сухостоя ели на высоте 1,3 м и в субстрате лишайника, в древесине сухих веточек ели, за исключением более высокого содержания Pb в ветвях сухостоя ели – 2,40 мг/кг. Содержание Pb слегка повышено в сухой древесине ветвей и коре ели, что, вероятно, связано с загрязнением осадками самого поверхностного слоя. Сухие ветви в кронах ели в ельнике кустарничково-зеленомошном содержат низкие концентрации элементов, их состав от аналогичного субстрата лишайника в кустарничково-сфагновом ельнике отличается мало. Кроме ветвей ели, в условиях влажного микроклимата болота эпифитные лишайники растут на корке тонких стволов ели. В более длительно существующем субстрате, в корке ствола низкорослой ели, накапливаются Pb до 4,90 мг/кг, Cu (1,85 мг/кг), Cd (0,131 мг/кг), Zn (109 мг/кг). Корка стволов ели в дренированном ельнике слабо накапливает Cd, (0,302 мг/кг) и Pb (2,11 мг/кг), Zn (87 мг/кг).

Концентрации тяжелых металлов в субстрате лишайников – сухих ветвях ели в микроместообитаниях изменяются в пределах естественных фоновых значений. В сухих ветвях ели в разных сообществах обнаружены крайне низкие содержания элементов (Pb < 2,5, Ni < 1,0, Cu < 1,0, Cd < 0,09 мг/кг), обычных компонентов техногенных выбросов, что свидетельствует об отсутствии влияния загрязнения. Лишайник *P. furfuracea* накапливает в большем количестве все элементы, по сравнению с субстратом, сухими ветвями ели.

В работе установлено, что в обоих видах лишайников в дренированном ельнике наиболее сильно изменяется содержание Mn и Zn в связи с влиянием разных форофитов (состава и распределения осадков). Марганец и цинк – компоненты состава осадков под пологом леса, Mn интенсивно накапливается в хвое ели и листьях березы, Zn в листьях березы. В двух видах лишайников на стволах березы выше содержание Zn и Mn.

Выявлено, что в связи с влиянием крон в лишайниках в различных условиях дренированного ельника и разреженного ельника различаются концентрации Mn, Fe и Pb. При слабом влиянии крон ели в лишайниках снижаются концентрации Mn, обычного микрокомпонента осадков под пологом леса, и накапливаются более высокие концентрации Fe, также Pb. Концентрации металлов в лишайниках на стволах березы могут использоваться как фоновые, за исключением Zn, в связи с накоплением в листьях березы.

Для сохранения видового разнообразия лишайников необходимо сохранение сообществ заболоченных лесов и болот. В лесных сообществах вблизи Ладожского озера в перспективных охраняемых территориях зарегистрировано довольно высокое видовое разнообразие лишайников [7–9]. Нужны данные о влиянии загрязнения на лишайники и возможностях сохранения лесных сообществ. Сравнительные данные об уровне загрязнения лишайников в сопоставлении с соседними регионами северо-запада европейской части отсутствуют. В заповеднике «Кивач» на соседней территории в Карелии более детально изучен видовой состав в лишайниках, установлены концентрации тяжелых металлов в индикаторных видах [10]. При этом современных данных оценки загрязнения лишайников не имеется. Результаты позволяют охарактеризовать полученные значения в качестве фоновых, выявить влияние на лишайники разных форофитов, видовые различия.

Определен уровень естественного варьирования содержания тяжелых металлов в лишайниках в связи с экологическими условиями, типом сообщества и форофита на фоновой территории. На состав лишайников влияют условия в кроне деревьев в различных микроместообитаниях. В лишайниках определены низкие концентрации тяжелых металлов. Выявлено влияние вида форофита на накопление металлов (Mn, Zn) в обоих видах лишайников. Вид *Pseudevernia furfuracea* имеет более высокую способность к накоплению металлов, *P. glauca* менее подходит для такого рода наблюдений в связи со слабым накоплением, небольшим обилием, более узкой экологической амплитудой.

В условиях влияния кроны ели и слабого влияния кроны показаны различия концентраций элементов в талломах лишайников. В составе эпифитных лишайников в местообитаниях под пологом ельника и в разреженном ельнике на деревьях ели близкого возраста имеются различия в содержании тяжелых металлов, компонентов техногенных выбросов – Pb, Cd, Fe. Получены данные о влиянии условий в кроне деревьев ели европейской, в микроместообитаниях на отдельных типах ветвей на состав *P. furfuracea*. Под влиянием крон сообществ на лишайники наиболее резкими являются различия концентраций марганца, обычного микрокомпонента осадков под пологом ельников в фоновых условиях. В разреженном ельнике влияние крон на состав лишайников минимально и поступление тяжелых металлов в большей степени определяется атмосферными источниками.

Заключение

Состав лишайников как интегральных биоиндикаторов позволяет оценивать общее количество тяжелых металлов, поступивших в таллом за длительное время. Использование лишайников в этом качестве позволяет выявить элементы с повышенными концентрациями в составе атмосферных выпадений. Содержание микроэлементов в воздушной среде является более лабильным показателем, по сравнению с лишайниками. В лесном пологе изменяется растворимость тяжелых металлов, способность к миграции, в связи с этим состав лишайников связан с действием экологических условий в фитоценозе. Необходимо учитывать и выделять влияние вида форофита на состав лишайников при биоиндикации загрязнения.

На территории района в юго-восточном Приладожье отсутствует значительная антропогенная нагрузка. Концентрации элементов в лишайниках *Pseudevernia furfuracea* и *Platismatia glauca* в ельнике кустарничково-зеленомошном на разных видах форофитов характеризуют фоновые значения. Содержание Zn в лишайниках на стволах березы выше, *P. furfuracea* в 2,15 раз, *P. glauca* в 2,83 раза, по сравнению с концентрациями на ветвях ели. Концентрация Mn в талломах возрастает на березе до 6,2 раз. В двух видах лишайников под пологом ели определены низкие концентрации тяжелых металлов Cd, Pb, Ni, Cu. Загрязнения эпифитных лишайников и субстратов тяжелыми металлами в ельниках не обнаружено.

В кустарничково-сфагновом ельнике в разных микроместообитаниях в лишайнике *P. furfuracea* более сильно варьирует содержание следующих металлов: Pb (76,0%), Mn (16,9%), Fe (13,8%), Cd (9,24%). Концентрация Mn, одного из преобладающих микроэлементов в осадках под пологом ели, в лишайнике в кустарничково-сфагновом ельнике снижается в 2,26 раза. В лишайнике на ветвях ели при слабом влиянии крон содержание Cd выше на 19%.

В юго-восточной части побережья Ладожского озера возможно возрастание количества аэропромышленных выбросов и тяжелых металлов в их составе вблизи от развитых регионов Карелии, г. Санкт-Петербурга, европейских стран, в том числе Финляндии. В этом районе возможно также увеличение мощностей производства минеральных удобрений и выбросов. В современных условиях энергетического кризиса и возрастании масштабов использования бурого угля на теплоэлектростанциях, в европейской части России возможно усиление влияния воздушных переносов выбросов

на леса. Результаты фоновых концентраций элементов можно применять для оценки уровня загрязнения лишайников.

Работа выполнена по плановой теме НИР 2021–2023 гг. № 121032500047-1 «Растительность европейской части России и северной Азии: разнообразие, динамика и принципы организации».

Список литературы

1. Сухарева Т.А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Фермановской 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 полога основного и березового леса на химический состав осадков в заповеднике «Кивач» // Труды Карельского научного центра РАН. 2006. № 10. С. 180–184.
4. Gauslaa Y., Lie M., Ohlson M. Epiphytic lichen biomass in a boreal Norway spruce forest. *Lichenologist*. 2008. No. 40 (3). P. 257–266.
5. 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. № 18 (2). С. 221–225.
6. Катаева М.Н., Беляева А.И. Накопление тяжелых металлов в эпифитных лишайниках ельника подзоны средней тайги // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 7. С. 17–21.
7. 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.
8. Сорокина И.А., Степанчикова И.С., Гимельбрант Д.Е., Ликсакова Н.С., Спиринов 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.
9. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В., Тагирджанова Г.М., Гимельбрант Д.Е. Лишайники можжевельниковых сообществ мыса Шурыгский (Ленинградская область) // Вестник Тверского государственного университета. Сер. Биология и экология. 2015. № 2. С. 121–126.
10. Дьяконов В.В., Козлов В.А., Коржицкая З.А. Оценка загрязнения тяжелыми металлами и серой лесных экосистем Республики Карелия. В кн.: Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. 1996. Петрозаводск. С. 167–182.