

УДК 630*181.34 + 630*907.32 (1–924.14/.16)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА – РАСТЕНИЕ» В СРЕДНЕТАЕЖНЫХ УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

Г. В. Ахметова

Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Изучены особенности распределения макро- и микроэлементов в системе «почва – растение» в различных ландшафтно-геохимических условиях водно-ледниковой равнины среднетаежной подзоны Восточной Фенноскандии в государственном заповеднике «Кивач». Представлены данные химического состава различных фракций доминирующих видов растений. Мхи и лишайники характеризуются низкой зольностью и невысоким содержанием макро- и микроэлементов, а низкое содержание тяжелых металлов (никеля, меди, хрома, кобальта) говорит об отсутствии аэротехногенного загрязнения на исследуемой территории. Для кустарничков рода *Vaccinium* характерна филогенетическая специализация – черника и брусника являются кальцефагами и аккумуляторами марганца. В хвое сосны отмечается одинаковый уровень содержания калия и кальция, высокое содержание марганца и магния, при этом наблюдается ретранслокация во вновь образующие органы калия, а также меди и кобальта. На основе данных о химическом составе почв рассчитаны коэффициенты биологического поглощения и коэффициенты биохимической активности растений. Выделены группы химических элементов по степени интенсивности вовлечения их в биологический круговорот. Наибольшей биогенностью отличаются марганец, кальций и калий, также активно участвуют в биогенном круговороте цинк и медь. Коэффициент биохимической подвижности показывает, что самая высокая биохимическая активность среди изучаемых видов растений характерна для черники. Полученные результаты показывают слабую тенденцию изменения содержания большинства исследуемых химических элементов и интенсивности биологического поглощения растений в зависимости от ландшафтно-геохимических условий. В целом выявлено, что для макроэлементов главным фактором изменчивости является видовая принадлежность растений и физиологические особенности организмов, в то время как содержание большинства микроэлементов варьирует в зависимости от положения в рельефе и гидрологических условий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: таежная растительность; геохимическая катена; химический состав растений; биогеохимические коэффициенты; элементарные геохимические ландшафты.

G. V. Akhmetova. DISTRIBUTION PATTERNS OF MACRO- AND MICROELEMENTS IN THE “SOIL – PLANT” SYSTEM IN THE MIDDLE TAIGA OF EASTERN FENNOSCANDIA

The distribution patterns of macro- and microelements in the “soil – plant” system were studied in different aqueo-glacial plain landscapes and geochemical environments in the middle taiga of Eastern Fennoscandia, in the Kivach Strict Nature Reserve. Data

on the chemical composition of different parts of dominant plant species are provided. Mosses and lichens are noted for low ash content and relatively low concentrations of macro- and microelements. The low content of heavy metals (nickel, copper, chromium, cobalt) indicates the absence of air-borne industrial pollution in the study area. Dwarf shrubs of the genus *Vaccinium* are phylogenetically specialized – bilberry and cowberry are calciphagous and accumulate manganese. Pine needles contain equal amounts of potassium and calcium, as well as high concentrations of magnesium and manganese. Potassium, and also copper and cobalt are further translocated to newly formed plant organs. Data on the chemical composition of soils and plants were used to calculate the biological absorption factor and the index of biochemical activity for plants. Chemical elements were grouped by the rate of their involvement in the biological cycle. Manganese, calcium and potassium prove to be the most biogenic. Zinc and copper are also actively involved in the biogenic cycle. Among the studied plant species, the index of biochemical activity was the highest in bilberry. The results reveal a slight variation in the content of a majority of the studied chemical elements and the rate of biological uptake by plants across the range of landscape-geochemical conditions. A general finding is that the principal factors for variation in macroelements are the plant's species identity and physiological characteristics, while the content of microelements varied in relation to the topographic position and hydrological conditions.

Key words: boreal vegetation; geochemical catena; elemental composition of plants; biogeochemical coefficients; elementary geochemical landscape.

Введение

В результате человеческой деятельности происходят серьезные изменения в биогеохимических циклах макро- и микроэлементов, что приводит к нарушению их естественного круговорота [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Никонов, Лукина, 1994; Лукина, Никонов, 1996; Grand et al., 2014]. Как известно, почвы являются одним из основных источников питательных веществ для живых организмов, а растительный покров – это важнейшее промежуточное звено в круговороте химических элементов. Растения являются биогеохимическим барьером, способны накапливать избыточные массы элементов и выводить их из миграционного потока [Стеблевская и др., 2006]. Поэтому выявление уровня содержания химических элементов в растениях – один из параметров оценки состояния природной среды. Также известно, что содержание макро- и микроэлементов в растениях, с одной стороны, во многом зависит от генетических особенностей вида [Ильин, 1985; Баргальи, 2005; Битюцкий, 2005, 2010], с другой стороны, от ландшафтно-геохимических условий произрастания [Власова, 2011; Енчилик и др., 2018].

Содержание и особенности распределения химических элементов в компонентах окружающей среды являются важными параметрами, которые характеризуют эколого-геохимическое состояние территорий. Выявлению трансформации химического состава почв и растений в связи с загрязнением окружающей среды посвящено множество исследований [Лянгу-

зова, 2005; Михайлова и др., 2006; Bjerke et al., 2006; Vasconcelos et al., 2008; Сухарева, 2016, 2018; Кашулина и др., 2018; Kozlowski et al., 2019]. Изучение особенностей химического состава растений важно при исследовании процессов биологического круговорота элементов минерального питания в естественных экосистемах [Глазовская, 1964; Морозова, 1991].

Исследования химического состава почв среднетаежной подзоны Восточной Финляндии имеют давнюю историю и достаточно многочисленны [Тойкка и др., 1973; Федорцев и др., 2008, 2015], для растений подобных сведений имеется меньше [Казимиров и др., 1977; Морозова, 1991]. Кроме того, данные о содержании химических элементов в растениях в основном дают оценку изменению их химического состава в условиях антропогенного воздействия [Лукина, 1996; Черненкова, 2004; Лянгузова, 2005; Михайлова и др., 2006; Bjerke et al., 2006; Сухарева, 2016; Vasconcelos et al., 2008; Кашулина и др., 2018; Kozlowski et al., 2019] и в меньшей степени характеризуют изменения под влиянием природных факторов [Стеблевская и др., 2006; Вершинина и др., 2009; Табаленкова и др., 2016; Сухарева, 2018; Робакидзе и др., 2020]. В этой связи актуальной задачей становится определение концентраций элементов в растениях ненарушенных, фоновых территорий. Оценка миграции и биологического поглощения макро- и микроэлементов растениями в почвах на разных элементах рельефа, являющихся взаимосвязанными звеньями ландшафтно-геохимических катен, также ранее не проводилась.

Таким образом, целью данной работы являлось изучение особенностей химического состава растений и биологического поглощения макро- и микроэлементов в геохимически сопряженных элементарных ландшафтах, широко распространенных в условиях ненарушенных среднетаежных ландшафтов.

Материалы и методы

Исследования проводились в пределах государственного заповедника «Кивач», который расположен в юго-восточной части Балтийского кристаллического щита в среднетаежной подзоне Восточной Фенноскандии. Климат территории умеренный, переходный от морского к континентальному и характеризуется избыточным увлажнением. Развита ледниковая форма рельефа – узкие песчано-галечные гряды (озы), понижения часто заняты верховыми и переходными болотами, а также небольшими и мелкими озерами – ламбами. Кристаллическое основание территории и покрывающая его морена перекрыты флювиогляциальными гравийно-галечными песчаными отложениями. На территории заповедника доминируют древостои, сформированные сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

На правом берегу р. Суна в чистом сосновом насаждении заложена ландшафтно-геохимическая catena, проходящая от вершины до межозового понижения. Каждое звено catены соответствует определенному элементарному геохимическому ландшафту на уровне рода [Перельман, Касимов, 1999]: самое верхнее – элювиальный (автономный) ландшафт, среднее транзитное звено (склоны) – трансэлювиальный (верхняя часть склона) или элювиально-аккумулятивный (нижняя часть склона) ландшафт, самое нижнее аккумулятивное звено (заболоченный участок леса) – супераккумулятивный ландшафт.

Исследуемая территория сложена однородными почвообразующими породами – водно-ледниковыми отложениями, которые представляют собой пески разной степени сортированности. На автоморфных и транзитно-элювиальных позициях catены формируются подзолы иллювиально-железистые, на транзитно-аккумулятивных – подзолы иллювиально-железистые глеевые, в аккумулятивных – торфяно-глеевые почвы. Подзолы имеют легкий гранулометрический состав, хорошую дренированность и высокую степень аэрации, в них преобладают окислительные процессы. Почвы характеризуются кислой реакцией среды, ненасыщенны основаниями,

обеднены азотом и углеродом. В подчиненных позициях рельефа под сосняком багульниково-сфагновым формируются торфяные болотные и торфяно-глеевые почвы переходного типа. Профиль почв представляет собой слои торфа разной степени разложения, грунтовые воды находятся близко к поверхности. Торфяные почвы также имеют кислую реакцию среды, бедны органическим веществом. Зольность торфа низкая – не более 3 % в верхних слоях торфа, нижние слои торфа более высокозольные – до 8–9 %.

Напочвенный покров отличается бедностью видового состава, что является характерным для данного типа леса. Всего проанализировано 11 наиболее широко встречающихся видов растений (табл. 1), растительные образцы взяты для проведения лабораторных исследований на пробных площадях изучаемых элементарных ландшафтов в конце вегетационного периода (начало-середина сентября) [Родин и др., 1967]. Так как различные органы растений отличаются по степени накопления химических элементов [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Базилевич, Титлянова, 2008], отобранный материал делили на части. Ветви сосны разбирали на фракции – хвоя текущего года, однолетняя и многолетняя хвоя, а также мелкие ветви. Кустарнички разделяли на отдельные органы – подземные (корни) и надземные (листья и стебли). Мхи и лишайники также разделяли на части – зеленую (живую) и бурую (отмершую).

Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали. Навески сухого материала озоляли в муфельной печи при температуре 500 °С, определение содержания макро- и микроэлементов проводилось методом атомно-адсорбционной спектрометрии.

Для выявления особенностей биогенной миграции химических элементов в системе «почва – растение» на основе полученных ранее данных о макро- и микроэлементном составе почв [Ахметова, 2019] были рассчитаны биогеохимические коэффициенты [Авессаломова, 1987]:

– Ax_2 – коэффициент биологического поглощения (КБП), отражает потенциальную биогеохимическую подвижность элементов и рассчитывается как отношение элемента в золе растений к их среднему содержанию в почве. Элементы с $Ax_2 > 1$ в различной степени «накапливаются» живым веществом. Остальные элементы, у которых $Ax_2 < 1$, лишь «захватываются».

– BXA_2 – показатель биохимической подвижности вида растения, рассчитывается как

Таблица 1. Анализируемые виды растений

Table 1. Analyzed plant species

Вид растения Plant species	Элементарный геохимический ландшафт Elementary geochemical landscape		
	Автоморфный Automorphic	Транзитный Transit	Аккумулятивный Accumulative
<i>Pinus sylvestris</i> L.	+	+	+
<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	+	+	+
<i>V. myrtillus</i> L.	+	+	+
<i>Ledum palustre</i> L.	-	-	+
<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.)	+	+	+
<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F. H. Wigg.	+	+	+
<i>Ptilium crista-castrensis</i> (Hedw.) De Not.	+	-	-
<i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Schimp.	-	+	-
<i>Sphagnum magellanicum</i> Brid.	-	-	+
<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	-	-	+
<i>Cetraria islandica</i> (L.) Ach.	+	-	-

Примечание. Наличие (+) и отсутствие (-) вида на различных позициях катены.

Note. Presence (+) and absence (-) of species in different catena positions.

сумма всех коэффициентов Ax_2 . Величина BXA_2 зависит от количества исследуемых элементов, которые наиболее интенсивно поглощаются растениями. Данный показатель используется для характеристики суммарной интенсивности вовлечения химических элементов в биологический круговорот различными видами растений в определенных условиях их произрастания.

Результаты и обсуждение

Проведенные ранее исследования [Ахметова, 2019] показали, что для почв изучаемой территории характерен дефицит большинства макро- и микроэлементов, особенно низкие коэффициенты концентрации рассчитаны для большинства микроэлементов. Это связано с тем, что распространенные на данной территории водно-ледниковые песчаные отложения, на которых формируются изучаемые почвы, отличаются очень бедным химическим составом. Выявлены особенности неоднородности химического состава почв в горизонтальном и вертикальном направлениях. Профиль подзолов неоднороден по химическому составу, радиальная дифференциация большинства элементов носит аккумулятивно-элювиально-иллювиальный характер. Для почв автоморфных и транзитных ландшафтов характерно накопление в лесной подстилке элементов-биогенов (кальция, калия, цинка и марганца). В то же время с увеличением степени оторфованности подстилки происходит значительное снижение содержания макро- и микроэлементов. В ми-

неральной толще подзолов минимум их содержания наблюдается в подзолистом горизонте, а максимальное накопление – в нижележащем альфегумусовом горизонте. Изучаемые почвы также неоднородны в пространственном направлении, выявлена общая тенденция обеднения почв аккумулятивных позиций относительно автономных позиций, однако процессы латеральной дифференциации изучаемых элементов выражены слабо.

Анализ химического состава изучаемых видов растений показал, что содержание макро- и микроэлементов в них сильно варьирует. Как известно, одним из факторов, определяющих селективность накопления химических элементов, является видовая принадлежность растений [Битюцкий, 2005, 2010], также имеет значение место произрастания растений. Исследуемые виды растений можно разделить на группы в соответствии с их стратегией питания [Рассеянные..., 2004]: поглощающие элементы преимущественно из атмосферы – лишайники и мохообразные и преимущественно из почвы – кустарнички, деревья. В связи с этим коэффициенты Ax_2 и BXA_2 рассчитывались только для второй группы растений.

Лишайники и мохообразные являются важной составляющей напочвенного покрова изучаемой территории, их проективное покрытие на отдельных участках составляет до 80 % [Мошкина и др., 2019]. Известно, что мхи и лишайники большую часть питательных веществ поглощают из атмосферы, поэтому их часто используют в качестве индикаторов состояния окружающей среды [Бязров, 2002; Баргальи,

2005; Лянгузова, 2005; Nash, 2008; Вершинина и др., 2009; Опекунова, Гизетдинова, 2014; Gandois et al., 2014]. Однако эпигейные лишайники тесно контактируют с литосферными источниками питательных веществ, поэтому часть минеральных элементов питания может поступать и из почвы [Раменская, 1974]; особенно важно это учитывать на фоновых территориях, не испытывающих антропогенное воздействие [Рассеянные..., 2004]. Зольность лишайников небольшая – около 1–1,5 %, это ниже, чем зольность других растений. Наибольшая концентрация среди исследуемых макроэлементов в этих растениях приходится на калий – 0,1–0,2 %, остальных элементов содержится намного меньше (рис. 1).

Кустистый лишайник *Cladonia rangiferina* распространен на всех выделенных элементарных ландшафтах изучаемой катены. Влияния места произрастания на изменение содержания изучаемых макроэлементов не выявлено, в то время как для микроэлементов характерна тенденция к незначительному снижению концентрации в соответствии с нарастанием степени увлажнения. Также отмечено, что талломы лишайников при отмирании «теряют» калий, происходит уменьшение его концентрации в 1,5–2 раза. Это связано с тем, что калий является активным водным мигрантом и при разложении растения активно вымывается [Биеньковски и др., 2008]. Содержание кальция и железа в отмерших частях лишайников, напротив, немного увеличивается (в 1,2–1,5 раза), количество остальных изучаемых элементов почти не изменяется.

Другой лишайник, *Cetraria islandica*, менее распространен, он произрастает небольшими вкраплениями среди талломов *C. rangiferina*. По химическому составу исследуемые виды лишайников различаются незначительно, отмечено лишь более высокое (в 1,2–1,5 раза) содержание калия в *C. islandica*.

При сравнении с имеющимися данными о химическом составе изучаемых видов лишайников [Рассеянные..., 2004; Табаленкова и др., 2016; Сухарева, 2016, 2018] наши образцы отличаются более высоким содержанием марганца, особенно велики различия по сравнению с лишайниками Кольского полуострова. Вероятно, это связано с экологической ситуацией в регионах исследования. Известно, что в условиях загрязнения воздуха лишайники активно накапливают тяжелые металлы, которые способны ингибировать поступление марганца. Таким образом, низкое содержание микроэлементов – тяжелых металлов (кобальт, хром, медь, никель) и высокое – марганца в изучаемых видах лишайников может свидетельствовать

о том, что исследуемая территория не испытывает аэротехногенного загрязнения.

Из мохообразных в растительном покрове доминирует *Pleurozium schreberi*, в меньшей степени распространены *Hylocomium splendens* и *Ptilium crista-castrensis*, все исследуемые виды имеют сходный химический состав. Зеленые мхи, по сравнению с торфяными мхами, более высокозольные растения – до 2–3,5 % зольности на сухое вещество. По литературным данным, из минеральных элементов в зеленых мхах ненарушенных сообществ преобладают азот, калий, кальций, что определяет азотно-калиево-кальциевый тип биогеохимического круговорота [Лукина и др., 2008; Сухарева, 2018]. Эта информация согласуется с полученными нами результатами – из исследуемых элементов в химическом составе мхов преобладают калий – 0,3–0,5 % и кальций – 0,15–0,3 % (рис. 1). В отмершей части мхов, как и для лишайников, отмечена тенденция уменьшения содержания калия, в меньшей степени это характерно для фосфора. Содержание кальция, напротив, увеличивается.

Особенностью химического состава *P. schreberi* и *P. crista-castrensis* является высокая концентрация марганца – до 600–1000 мг/кг, однако отмечается резкое снижение уровня его концентрации во мхах, произрастающих в гидроморфных условиях (аккумулятивный ландшафт), что частично способствует низкому содержанию марганца в заторфованной подстилке формирующихся здесь почв [Ахметова, 2019]. Изменения содержания калия и кальция во мхах в соответствии с градиентом увлажнения не наблюдается, тогда как для фосфора и марганца характерно постепенное снижение концентрации с увеличением степени увлажнения. Выявлено увеличение содержания некоторых микроэлементов (цинка, никеля и кобальта) в отмершей части мхов, что связано с аккумуляцией их в течение жизни, концентрация же меди и хрома остается на прежнем уровне.

Для мхов-торфообразователей – *Sphagnum magellanicum* и *Polytrichum commune* – характерна более низкая зольность (около 2 %) по сравнению с зелеными мхами и, следовательно, низкое содержание исследуемых элементов (рис. 1). С этим согласуются полученные ранее данные, что торфяные горизонты формирующейся здесь торфяно-глеевой почвы характеризуются очень низкими значениями содержания как макро-, так и микроэлементов [Ахметова, 2019].

В составе травяно-кустарничкового яруса на всем протяжении катены преобладают черника *Vaccinium myrtillus* и брусника *V. vitis-idaea*.

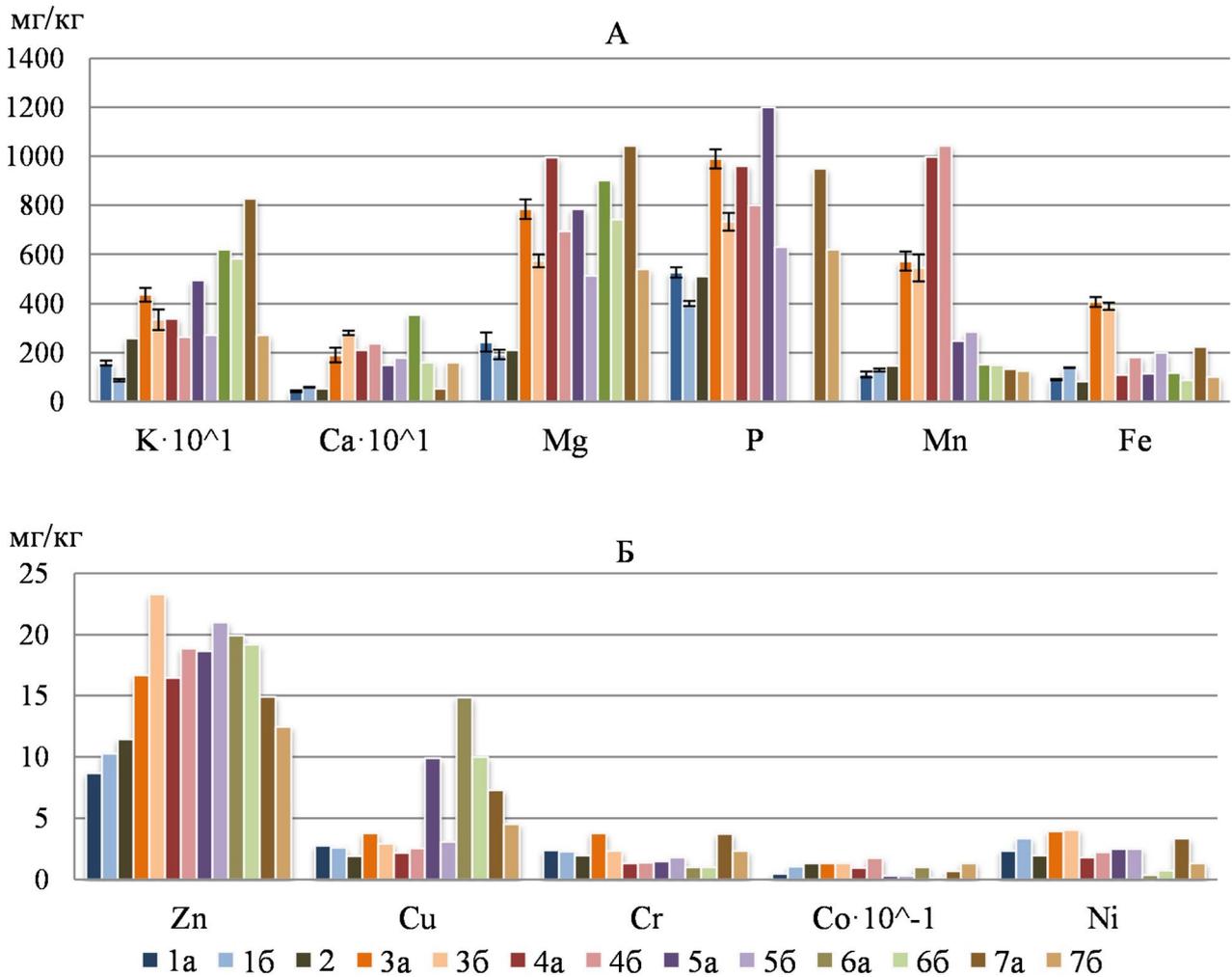


Рис. 1. Среднее содержание макро- (А) и микроэлементов (Б) в лишайниках и мхах, 1 – *C. rangiferina*, 2 – *C. islandica*, 3 – *P. schreberi*, 4 – *P. crista-castrensis*, 5 – *H. splendens*, 6 – *S. magellanicum*, 7 – *P. commune*, а – живая часть, б – отмершая часть

Fig. 1. Average macro- (A) and microelements content in lichens and mosses, 1 – *C. rangiferina*, 2 – *C. islandica*, 3 – *P. schreberi*, 4 – *P. crista-castrensis*, 5 – *H. splendens*, 6 – *S. magellanicum*, 7 – *P. commune*, а – living part, б – faded part

У кустарничков наибольшая зольность характерна для листьев – у черники 5 %, у брусники чуть меньше – 3,5–4,5 %. Для ветвей и корней этот показатель ниже – около 3 %. В наземных органах черники содержится очень высокое количество кальция – до 1,5 % (рис. 2), эти растения считаются кальцефагами [Ingestad..., 1973]. Как известно, в почвах с сильнокислой реакцией у черники развились адаптивные механизмы к активному поглощению кальция [Gjengedal, 1996]. Содержание калия в кустарничках намного меньше, чем кальция, – 0,4–0,5 %, также заметна тенденция к уменьшению содержания калия в корнях черники и брусники с увеличением степени увлажнения, тогда как для наземных органов это нехарактерно. В меньшей степени это характерно для магния и фосфора.

Черника и в меньшей мере брусника являются активными концентраторами марганца, т. к. этот элемент накапливается растениями, которые в значительных количествах содержат таниды [Битюцкий, 2005]. Наши исследования показали, что наибольшая концентрация марганца (до 0,3 %) характерна для листьев и стеблей данных растений, в корнях его концентрация резко снижается – в 2 и более раза. Также выявлена тенденция к уменьшению интенсивности биологического поглощения марганца черникой с увеличением увлажнения, это характерно и для брусники, но в меньшей степени.

В листьях черники также выявлено активное накопление микроэлементов – цинка, меди, хрома, кобальта и никеля. Это объясняется по-

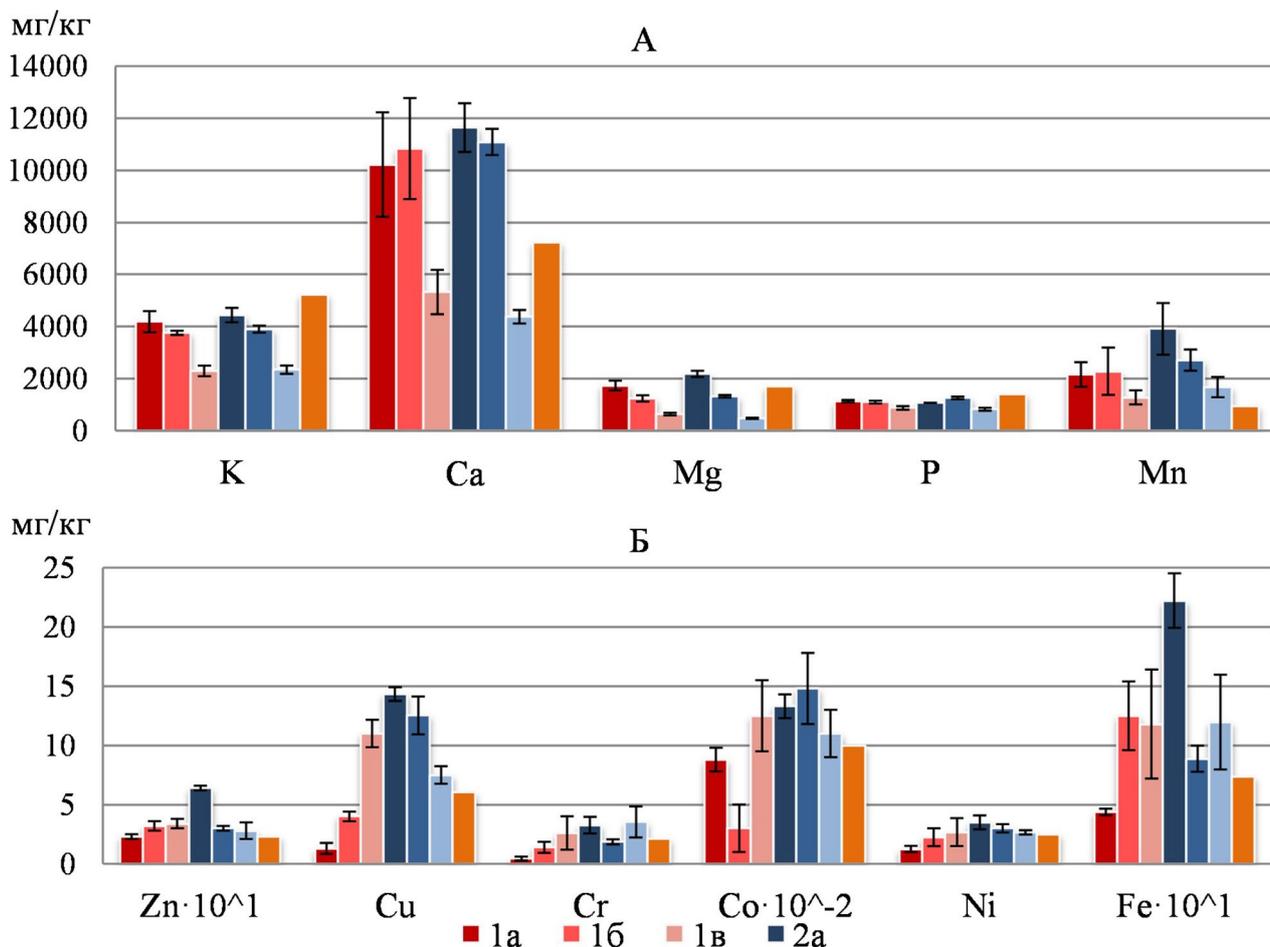


Рис. 2. Среднее содержание макро- (А) и микроэлементов (Б) в кустарничках: 1 – *V. vitis-idaea*, 2 – *V. myrtillus*, 3 – *L. palustre*, а – листья, б – стебли, в – корни

Fig. 2. Average macro- (A) and microelements (Б) content in subshrubs: 1 – *V. vitis-idaea*, 2 – *V. myrtillus*, 3 – *L. palustre*; а – leaves, б – stems, в – roots

вышенной активностью ферментов из-за высокой физиологической активности растущих тканей листа [Рассеянные..., 2004]. В ветвях и корнях содержание этих элементов существенно ниже.

Намного меньшими значениями содержания всех исследуемых элементов, кроме калия, среди изучаемых кустарничков отличается багульник *Ledum palustre* (рис. 2).

Среди древесных растений на всем протяжении исследуемой катены доминирует сосна обыкновенная, хвоя и мелкие ветви которой составляют существенную часть опада [Казимиров и др., 1977]. Исследования показали, что хвоя сосны имеет наибольшую зольность по сравнению с остальными частями дерева – от 1,4 до 2,7 %. В химическом составе хвои (рис. 3) доминируют калий (0,4–0,7 %) и кальций (0,4–0,8 %), почти на одном уровне (около 0,1 %) находится содержание марганца и магния. С увеличением возраста хвои концентрация подвижных макро-

элементов – калия и фосфора – постепенно снижается, то есть происходит процесс ретранслокации [Базилевич, Титлянова, 2008]. Также это характерно и для некоторых микроэлементов – меди и кобальта. Концентрация кальция, марганца, железа, напротив, более высокая в хвое старших возрастов, что свидетельствует о незначительной подвижности этих элементов (рис. 3). Данную тенденцию также отмечают при исследовании химического состава хвои сосны, произрастающей в загрязненных территориях [Черненкова, 2004; Лукина и др., 2008].

Зольность ветвей сосны по сравнению с хвоей примерно в два раза ниже, среди изучаемых химических элементов преобладают кальций – до 0,6 % и калий – 0,4 %. Отмечается намного меньшая (в 5 раз) по сравнению с хвоей концентрация марганца в ветвях. В то же время некоторые микроэлементы (медь, хром и кобальт) содержатся в большем количестве, чем в хвое.

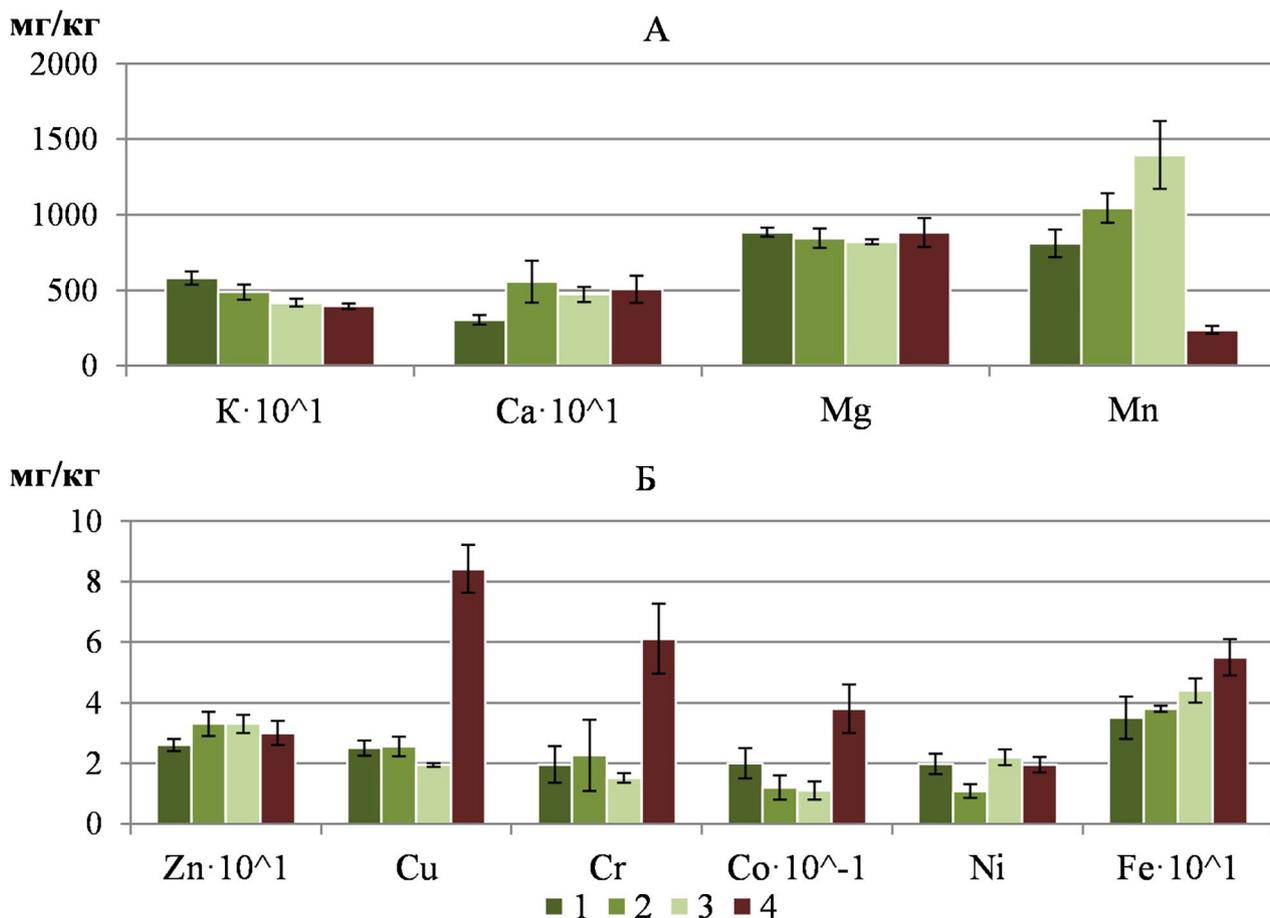


Рис. 3. Среднее содержание макро- (А) и микроэлементов (Б) в сосне: 1 – хвоя текущего года, 2 – однолетняя хвоя, 3 – многолетняя хвоя, 4 – мелкие ветви

Fig. 3. Average content of macro- (A) and microelements (Б) in pines: 1 – current needle, 2 – one-year needle, 3 – perennial needle, 4 – fine branches

Не выявлено четкой тенденции к изменению содержания большинства макроэлементов в хвое сосны при нарастании степени увлажнения. В то время как концентрация микроэлементов в хвое и ветвях сосны, произрастающих в аккумулятивных позициях катены, нарастает (рис. 4).

На основе полученных данных химического состава растений (с почвенной стратегией питания) и почв, на которых они произрастают, рассчитаны коэффициенты биологического поглощения Ax_2 изучаемых химических элементов и показатели биохимической подвижности БХА₂ (табл. 2).

Коэффициент биологического поглощения Ax_2 отражает избирательность поглощения химических элементов растениями. Так, например, в условиях среднетаежной подзоны Восточной Фенноскандии кустарнички рода *Vaccinium* имеют большее сродство к марганцу. У сосны накопление марганца ниже, тем не менее для данного элемента также выявлены вы-

сокие коэффициенты биологического накопления в ее хвое – $Ax_2 = 40-60$, в старой хвое еще выше – $Ax_2 = 70-90$.

На основании рассчитанных коэффициентов Ax_2 можно выделить группы изучаемых элементов по интенсивности накопления их в растениях.

Элементы биологического накопления:

- наиболее энергично накапливаемые элементы – марганец, кальций, калий;
- сильнонакапливаемые – магний, цинк, медь.

2. Элементы биологического захвата:

- группа слабого накопления и среднего захвата – кобальт, никель;
- группа слабого захвата – хром, натрий;
- группа слабого и очень слабого захвата – железо.

Наибольшей биогенностью среди изучаемых элементов выделяется марганец, который считается «поистине таежным элементом» [Нечаева, 1985, с. 90]. Самая высокая величина

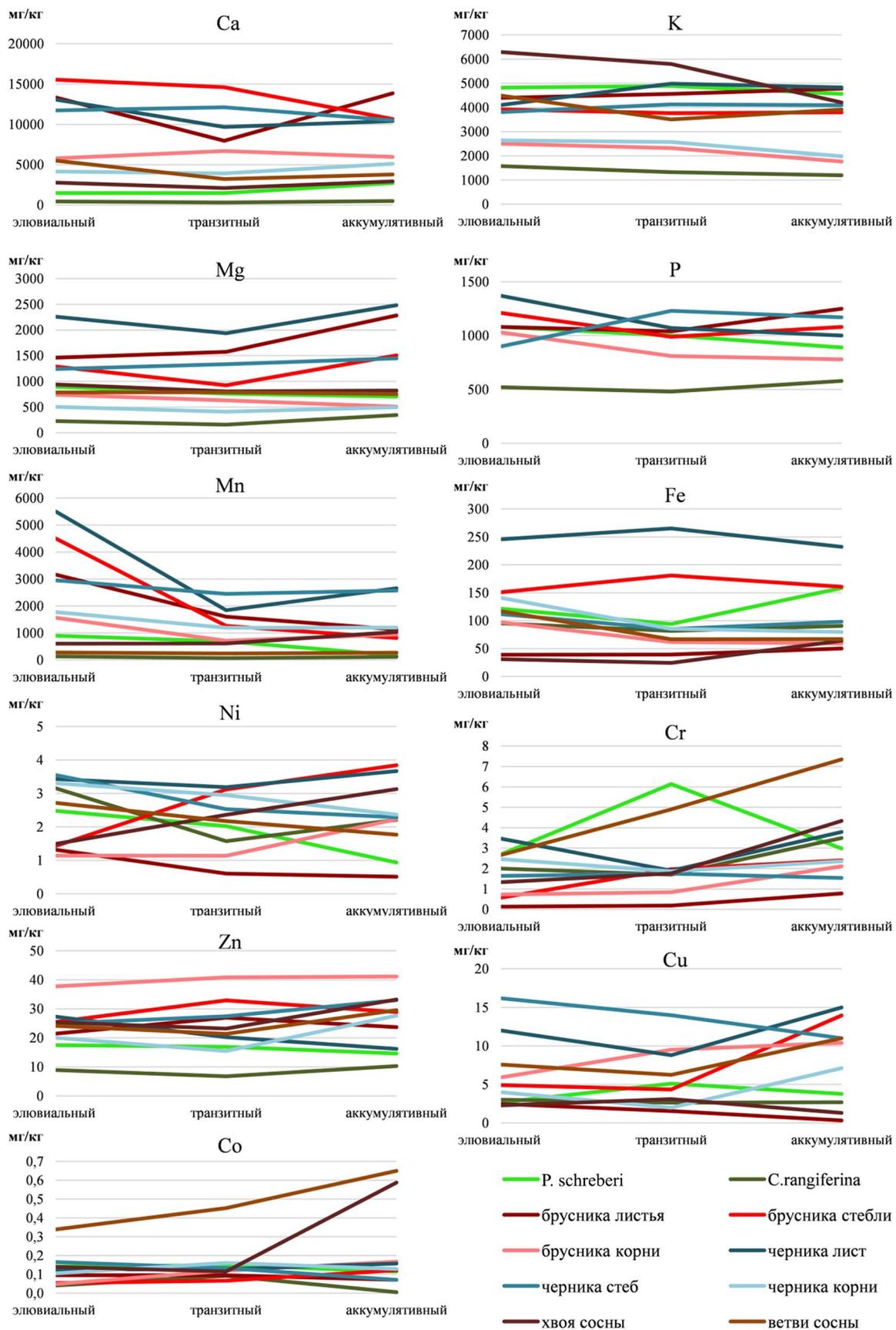


Рис. 4. Изменение содержания макро- и микроэлементов в растениях, произрастающих на разных элементах геохимической catena

Fig. 4. Variation of macro- and microelements content in plants growing in different catena positions

Таблица 2. Ряды коэффициентов биологического поглощения химических элементов растениями, произрастающими в различных позициях катены

Table 2. Coefficients of biological consumption of chemical elements by plants growing in different catena positions

Название растения Plant species	Фракция растения Part of a plant	Величина Ax2 / Mean Ax2					БХА ₂
		Более 100 More than 100	100–10	1–10	0,1–1	Менее 0,01 Less than 0.01	
Сосна обыкновенная Scots pine	хвоя-1 needle-1	-	Mn, Ca, K	Mg, Zn, Cu	Na, Ni, Co, Cr	Fe	72
	хвоя-2 needle-2	-	Mn, K	Ca, Cu, Mg, Zn	Na=Co=Cr Ni	Fe	86
	хвоя-3 needle-3	-	Mn, Ca, K	Zn, Mg	Cu, Co, Ni, Cr, Na	Fe	102
	ветви-1 branches-1	-	Ca, Mn	K, Zn, Cu, Mg, Cr	Ni, Co, Na	Fe	50
	ветви-2 branches-2	-	Mn, K,	Ca, Zn, Cu, Mg, Ni, Cr	Na, Co	Fe	43
	ветви-3 branches-3	-	Mn, Ca, K	Cu, Zn, Mg	Cr=Co, Ni, Na	Fe	51
Черника Billberry	листья-1 leaves-1	Mn	Ca, K	Cu, Mg, Zn	Ni, Cr, Na, Co	Fe	272
	листья-2 leaves-2	Mn	Ca, K	Zn, Mg, Cu	Co, Na, Ni, Cr	Fe	157
	листья-3 leaves-3	Mn	Ca, K	Cu, Mg, Ni, Zn	Cr, Na, Co	Fe	316
	стебли-1 stems-1	Mn	Ca, K	Cu, Mg, Zn	Ni, Na, Co, Cr	Fe	194
	стебли-2 stems-2	Mn	Ca, K	Zn, Cu, Mg	Na=Co, Ni, Cr	Fe	197
	стебли-3 stems-3	Mn	Ca, K	Cu, Mg, Zn	Ni, Na, Cr, Co	Fe	217
	корни-1 roots-1	-	Mn, Ca	K, Cu, Zn	Mg, Ni, Na, Cr, Co	Fe	112
	корни-2 roots-2	-	Mn	Ca, K, Zn, Cu	Mg, Co, Na, Ni, Cr	Fe	82
	корни-3 roots-3	-	Mn, Ca	K, Cu, Zn, Mg	Na, Ni, Cr, Co	Fe	105
Брусника Cowberry	листья-1 leaves-1	-	Mn, Ca, K	Mg, Zn	Cu, Ni, Co Na, Cr	Fe	133
	листья-2 leaves-2	-	Mn, Ca, K	Mg, Cu	Zn, Na, Cr=Co, Ni	Fe	133
	листья-3 leaves-3	-	Mn, Ca, K	Mg, Zn	Na, Cu=Cr=Co=Ni	Fe	138
	стебли-1 stems-1	-	Mn, Ca	K, Mg, Zn	Cu, Na=Co= Ni, Cr	Fe	101
	стебли-2 stems-2	-	Mn, Ca, K	Cu, Zn, Mg	Co, Ni, Na, Cr	Fe	127
	стебли-3 stems-3	-	Mn, Ca	K, Zn, Cu, Mg	Na=Ni, Cr=Co	Fe	109
	корни-1 roots-1	-	Mn, Ca	K, Cu, Zn, Mg	Na=Ni, Cr, Co	Fe	89
	корни-1 roots-1	-	Mn, Ca	K, Zn, Cu, Mg	Na, Cr=Co, Ni	Fe	74
	корни-1 roots-1	-	Mn, Ca	K, Zn, Cu, Mg	Na=Ni, Cr=Co	Fe	93
Багульник Marsh rose-mary	листья-3 leaves-3	-	Mn, Ca, K	Mg, Cu, Zn	Ni, Na=Cr, Co	Fe	85

Примечание. 1 – автоморфный, 2 – транзитный, 3 – аккумулятивный элементарный ландшафт.

Note. 1 – automorphic, 2 – transit, 3 – accumulative elementary landscape.

коэффициента Ax_2 этого микроэлемента рассчитана для листьев черники – 100–150 и более. Марганец также активно накапливается в лесной подстилке и очень неравномерно распределен в минеральной части почв. Прослеживается некоторое увеличение коэффициента биологического накопления Ax_2 марганца в растениях нижней части склона и аккумулятивных ландшафтов наравне со снижением количественного содержания данного микроэлемента в оторфованной подстилке.

Кальций и калий – макроэлементы энергичного биологического накопления, для магния выявлены более низкие коэффициенты биоаккумуляции в растениях. Данные элементы по-разному ведут себя в процессах накопления и миграции в системе «почва – растение». Калий очень интенсивно вымывается из отмершей растительности и лесной подстилки (особенно в гидроморфных условиях), так как не образует прочных соединений и мигрирует вниз по профилю почв. Кальций и магний, несмотря на то, что также являются выраженными водными мигрантами, способны активно накапливаться в подстилке.

Среди микроэлементов наиболее динамично участвуют в биогенном круговороте цинк и медь, они интенсивно накапливаются в растениях, особенно в ассимилирующих органах. Для остальных микроэлементов накопление в растениях нехарактерно. Особенно низкая биогенность свойственна железу – несмотря на то что содержание его в почвах достигает 2–3 %, по уровню концентрации в растениях он является микроэлементом.

Рассчитанный на основе Ax_2 коэффициент биохимической подвижности BXA_2 показывает суммарную интенсивность вовлечения химических элементов в биологический круговорот различными видами растений в определенных условиях их произрастания. Среди изучаемых видов растений самая высокая биохимическая активность характерна для черники – $BXA_2 = 200–300$. Таким образом, в условиях распространения сосновых среднетаежных лесов данный вид растений наиболее интенсивно вовлекает в биологический круговорот химические элементы. По величине BXA_2 исследованные виды кустарничков формируют следующий ряд: черника > брусника > багульник.

Активность поглощения химических элементов растениями одного вида имеет общую тенденцию к небольшому изменению (увеличению для одних элементов и уменьшению для других) в зависимости от условий местообитания, определяемых положением в катене. Это во многом связано с природными особенностями

изучаемой территории – однообразными песчаными почвообразующими породами, пологим склоном, распространением однотипного растительного покрова. Выявлено, что сосна активнее участвует в биогенном поглощении элементов в аккумулятивном ландшафте, что также характерно и для кустарничков.

Заключение

Изучение элементного состава доминирующих видов растений водно-ледникового ландшафта среднетаежной подзоны Карелии позволило установить их фоновые концентрации, характерные для исследуемой территории.

Анализ химического состава изучаемых видов растений показал, что содержание макро- и микроэлементов сильно варьирует и зависит от вида и фракции растения. Мхи, и особенно лишайники, характеризуются низкой зольностью и невысоким содержанием как макро-, так и микроэлементов. Низкое содержание микроэлементов, относящихся к тяжелым металлам, – никеля, меди, хрома, кобальта – свидетельствует об отсутствии азротехногенного загрязнения на исследуемой территории. Влияния места произрастания на изменение содержания изучаемых макроэлементов в лишайниках не выявлено, в то время как для микроэлементов характерна тенденция к снижению концентрации в соответствии с нарастанием степени увлажнения. У кустарничков наибольшая зольность характерна для листьев; для ветвей и корней этот показатель ниже. В наземных органах черники содержится очень высокое содержание кальция, в листьях высокая концентрация марганца, в меньшей степени это характерно и для брусники. В листьях черники также выявлено активное накопление микроэлементов – цинка, меди, хрома, кобальта и никеля. В хвое сосны содержание калия и кальция находится примерно на одном уровне. Также отмечается высокое содержание марганца и магния. Наблюдается ретранслокация во вновь образующие органы калия и фосфора, а также меди и кобальта.

На основе величин коэффициентов биологического поглощения Ax_2 выделены группы изучаемых элементов по степени интенсивности вовлечения их в биологический круговорот. Наибольшей биогенностью среди изучаемых элементов выделяется марганец, а также кальций и калий, среди микроэлементов активно участвуют в биогенном круговороте цинк и медь. Для остальных микроэлементов нехарактерно накопление в растениях. Коэффициент биохимической подвижности показывает,

что самая высокая биохимическая активность среди изучаемых видов растений характерна для черники.

В целом выявлено, что для макроэлементов главным фактором изменчивости является видовая принадлежность растений и физиологические особенности организмов, в то время как для многих микроэлементов важное значение приобретают также и местные условия произрастания растений.

Автор благодарит С. А. Кутенкова (Институт биологии КарНЦ РАН) за помощь в определении видов растений.

Данные получены с использованием оборудования ЦКП «Аналитическая лаборатория» ИЛ КарНЦ РАН.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН).

Литература

Авессаломова И. А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов. М.: МГУ, 1987. 108 с.

Ахметова Г. В. Геохимические особенности почв волнистой озерно-ледниковой песчаной равнины среднетаежной подзоны Карелии // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 2019. № 100. С. 53–82. doi: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

Базилевич Н. И., Титлянова А. А. Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: СО РАН, 2008. 381 с.

Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений: Экофизиологический подход к биомониторингу и биовосстановлению. М.: ГЕОС, 2005. 456 с.

Биеньковски П., Титлянова А., Диттвалд Э., Шибарева С. Изменение элементного состава фитомассы сфагновых мхов в процессе торфообразования // Вестник ТГПУ. 2008. Вып. 4(78). С. 30–35.

Битюцкий Н. П. Необходимые микроэлементы растений. СПб.: ДАЕН, 2005. 256 с.

Битюцкий Н. П. Микроэлементы высших растений. СПб.: СПбГУ, 2010. 367 с.

Бязров Л. Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.

Вершинина С. Э., Вершинин К. Е., Кравченко О. Ю., Чебыкин Е. П., Воднева Е. Н. Элементный состав лишайников *P. cetraria* из различных регионов России // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 141–146.

Власова Н. В. Ландшафтно-геохимическое состояние таежных экосистем в бассейне Нижней Тунгуски // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 100–107.

Глазовская М. А. Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. М.: МГУ, 1964. 230 с.

Енчилик П. Р., Асеева Е. Н., Семенов И. Н. Биологическое поглощение и биогеохимическая подвижность микроэлементов в лесных ландшафтах Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 93–98. doi: 10.24411/1728-323X-2018-14093

Ильин В. Б. Элементный химический состав растений. М.: Наука, 1985. 129 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Казимиров Н. И., Волков А. Д., Зябченко С. С., Иванчиков А. А., Морозова Р. М. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера. Л.: Наука, 1977. 304 с.

Кашулина Г. М., Литвинова Т. И., Коробейникова Н. М. Особенности формирования химического состава ассимилирующих органов растений в условиях экстремального загрязнения выбросами медно-никелевого предприятия // Вестник КНЦ РАН. 2018. № 4(10). С. 39–45. doi: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.4.39-45

Лукина Н. В. Сезонная динамика химического состава хвои сосны обыкновенной на Кольском полуострове // Лесоведение. 1996. № 1. С. 41–52.

Лукина Н. В., Никонов В. В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях азротехногенного загрязнения: В 2-х ч. Апатиты: КНЦ РАН, 1996. Ч. 1. 213 с., ч. 2. 192 с.

Лукина Н. В., Полянская Л. М., Орлова М. А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 345 с.

Лянгузова И. В. Тяжелые металлы в системе почва – растение: подвижность, поступление и распределение // Проблемы экологии растительных сообществ Севера. СПб.: ВВМ, 2005. С. 175–189.

Михайлова Т. А., Бережная Н. С., Игнатьева О. В. Элементный состав хвои и морфофизиологические параметры сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: ИГ СО РАН, 2006. 134 с.

Морозова Р. М. Минеральный состав растений лесов Карелии. Петрозаводск, 1991. 100 с.

Мошкина Е. В., Бахмет О. Н., Медведева М. В., Мамай А. В., Зачиняева А. В., Ткаченко Ю. Н. Микробиологические особенности почв в растительных микрогруппировках среднетаежного сосняка брусничного в Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2019. № 11. С. 107–121. doi: 10.17076/eco1135

Нечаева Е. Г. Ландшафтно-геохимический анализ динамики таежных геосистем. Иркутск: ИГ СО АН СССР, 1985. 210 с.

Никонов В. В., Лукина Н. В. Биогеохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: КНЦ РАН, 1994. 315 с.

Опекунова М. Г., Гизетдинова М. Ю. Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2014. Сер. 7. Вып. 1. С. 79–94.

Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрей-2000, 1999. 768 с.

Раменская М. Л. Микроэлементы в растениях Крайнего Севера. Л.: Наука, 1974. 159 с.

Рассеянные элементы в бореальных лесах / Ред. А. С. Исаев. М.: Наука, 2004. 616 с.

Робакидзе Е. А., Бобкова К. С., Наймушина С. И. Элементный состав доминирующих видов растений в среднетаежных сосняках разного возраста (на примере Республики Коми) // Растительные ресурсы. 2020. Т. 56, вып. 1. С. 53–65.

Родин Л. Е., Ремезов Н. П., Базилевич Н. И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1967. 145 с.

Стеблевская Н. И., Медков М. А., Молчанов В. П., Полякова Н. В., Моисеенко Л. И., Зориков П. С., Батырбаева Н. В. Изучение биогеохимического накопления микроэлементов в почвах и растениях Дальнего Востока // Вестник ДО РАН. 2006. № 2(126). С. 57–63.

Сухарева Т. А. Элементный состав зеленых мхов фоновых и техногенно нарушенных территорий // Ученые записки ПетрГУ. 2018. № 3(172). С. 89–96. doi: 10.15393/uchz.art.2018.130

Сухарева Т. А. Элементный состав талломов лишайника *Cladonia stellaris* в условиях атмосферного загрязнения // Труды КарНЦ РАН. 2016. № 4. С. 70–82. doi: 10.17076/eco259

Табаленкова Г. Н., Далькэ И. В., Головки Т. К. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на европейском Северо-Востоке // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2016. Т. 18, № 2. С. 221–225.

Тойкка М. А., Перевозчикова Е. М., Левкина Т. И., Заварзин А. М., Михкиев А. И., Изергина М. М. Микроэлементы в Карелии. Л.: Наука, 1973. 284 с.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Медведева М. В., Ахметова Г. В., Новиков С. Г., Ткаченко Ю. Н., Солодовников А. Н. Тяжелые металлы в почвах Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 222 с.

Федорец Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии: геохимический атлас. М.: Наука, 2008. 46 с.

Черненко Т. В. Закономерности аккумуляции тяжелых металлов сосной обыкновенной в фоно-

вых и техногенных местообитаниях // Лесоведение. 2004. № 2. С. 25–35.

Bjerke J., Tommervik H., Finne T. E., Jensen H., Lukina N., Barestuen V. Epiphytic lichen distribution and plant leaf heavy metal concentrations in Russian-Norwegian boreal forests influenced by air pollution from nickelcopper smelters // Boreal Environ Res. 2006. № 6. P. 441–450. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.029

Gandois L., Agnan Y., Leblond S., Sejalon-Delmas N., Le Roux G., Probst A. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment // Atmos. Environ. 2014. Vol. 95. P. 96–104. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.029

Gjengedal E. Effects of soil acidification on foliar leaching and retranslocation of metals in vascular plants // Water, Air, & Soil Pollution. 1996. No. 86. P. 221–234.

Grand S., Hudson R., Lavkulich L. M. Effect of forest harvest on soil nutrients and labile ions in podzols of southwestern Canada: mean and dispersion effects // Catena. 2014. Vol. 122. P. 18–26. doi: 10.1016/j.catena.2014.06.004

Ingestad T. Mineral nutrient requirements of *Vaccinium vitis-idaea* and *Vaccinium myrtillus* // Phisiol. Plant. 1973. No. 29. P. 239–246.

Kozłowski R., Szwed M., Zukowski W. Pine needles as bioindicator of pollution by trace elements from cement-limestone industry in central-eastern Poland // Carpathian J. Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 14, no. 2. P. 541–549. doi: 10.26471/cjees/2019/014/102

Nash III T. H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling // Lichen biology. Camb. Univ. Press, 2008. P. 234–251. doi: 10.1017/CBO9780511790478.013

Vasconcelos S. D., Carbral J. P., Freitas C. M., Pacheco A. M. G. Copper, nickel, lead in lichens and tree bark transplants over different period of time // Environ. Pollut. 2008. Vol. 151. P. 408–413. doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.004

Поступила в редакцию 14.04.2020

References

Avessalomova I. A. Geokhimicheskie pokazateli pri izuchenii landshaftov [Geochemical features in studies of landscapes]. Moscow: MGU, 1987. 108 p.

Akhmetova G. V. Geokhimicheskie osobennosti pochv volnistoi ozerno-lednikovoi peschanoi ravniny srednetaezhnoi podzony Karelii [Geochemical features of soils in an undulating glaciolacustrine sandy plain in the middle taiga subzone of Karelia]. *Byull. Pochv. in-ta im. V. V. Dokuchaeva* [Dokuchaev Soil Bull.]. 2019. No. 100. P. 53–82. doi: 10.19047/0136-1694-2019-100-53-82

Bazilevich N. I., Titlyanova A. A. Bioticheskie krugovorot na pyati kontinentakh: azot i zol'nye elementy v prirodnykh nazemnykh ekosistemakh [Biotic turnover on five continents: element exchange processes in terrestrial natural ecosystems]. Novosibirsk: SO RAN, 2008. 381 p.

Bargal'i R. Biogeokhimiya nazemnykh rastenii: Ekofiziologicheskii podkhod k biomonitoringu i biovostanovleniyu [Biogeochemical approach to biomonitor-

ing and biological restoration]. Moscow: GEOS, 2005. 456 p.

Bien'kovski P., Titlyanova A., Dittvald E., Shibareva S. Izmenenie elementnogo sostava fitomassy sfganovnykh mkhov v protsesse torfoobrazovaniya [Change of elemental composition of sphagnum mosses during peat formation processes]. *Vestnik TGPU* [Tomsk St. Pedagogical Univ. Bull.]. 2008. Iss. 4(78). P. 30–35.

Bityutskii N. P. Neobkhodimye mikroelementy rastenii [Essential microelements for plants]. St. Petersburg: DAEN, 2005. 256 p.

Bityutskii N. P. Mikroelementy vysshikh rastenii [Microelements of higher plants]. St. Petersburg: SPbGU, 2010. 367 p.

Byazrov L. G. Lishainiki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in ecological monitoring]. Moscow: Nauchnyi mir, 2002. 336 p.

Chernen'kova T. V. Zakonomernosti akumulatsii tyazhelykh metallov sosnoi obyknovnoy v fonovykh i

tekhnogennykh mestoobitaniyakh [Regularities of heavy metal accumulation by Scots pine in modal and technogenic sites]. *Lesovedenie* [Silvics]. 2004. No. 2. P. 25–35.

Enchilik P. R., Aseeva E. N., Semenov I. N. Biologicheskoe pogloshchenie i biogeokhimicheskaya podvizhnost' mikroelementov v lesnykh landshaftakh Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika [Biological uptake and biogeochemical mobility of microelements in forest landscapes of the Central Forest State Biosphere Nature Reserve]. *Probl. regional'noi ekol.* [Probl. of Regional Ecol.]. 2018. No. 4. P. 93–98.

Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Medvedeva M. V., Akhmetova G. V., Novikov S. G., Tkachenko Yu. N., Solodovnikov A. N. Tyazhelye metally v pochvakh Karelii [Heavy metals in soils of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. 222 p.

Fedorets N. G., Bakhmet O. N., Solodovnikov A. N., Morozov A. K. Pochvy Karelii: geokhimicheskii atlas [Soils of Karelia: a geochemical atlas]. Moscow: Nauka, 2008. 46 p.

Glazovskaya M. A. Geokhimicheskie osnovy tipologii i metodiki issledovaniya prirodnikh landshaftov [Geochemical basis of typology and research methodology of natural landscapes]. Moscow: MGU, 1964. 230 p.

Il'in V. B. Elementnyi khimicheskii sostav rastenii [Elementary and chemical composition of plants]. Moscow: Nauka, 1985. 129 p.

Kabata-Pendias A., Pendias X. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Microelements in soils and plants]. 1989. 439 p.

Kashulina G. M., Litvinova T. I., Korobeinikova N. M. Osobennosti formirovaniya khimicheskogo sostava assimiliruyushchikh organov rastenii v usloviyakh ekstremal'nogo zagryazneniya vybrosami medno-nikelevogo predpriyatiya [Inorganic plant chemistry under extreme pollution by emission from copper-nickel industrial complex]. *Vestnik KNTs RAN* [Herald of the Kola Sci. Centre RAS]. 2018. No. 4(10). P. 39–45.

Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zhabchenko S. S., Ivanchikov A. A., Morozova R. M. Obmen veshchestv i energii v osnovnykh lesakh Evropeiskogo Severa [Metabolism in pine forests of European North]. Leningrad: Nauka, 1977. 304 p.

Lukina N. V. Sezonnaya dinamika khimicheskogo sostava khvoi sosny obyknovnoy na Kol'skom poluostrove [Seasonal dynamics of chemical composition of pine needle on the Kola Peninsula]. *Lesovedenie* [Silvics]. 1996. No. 1. P. 41–52.

Lukina N. V., Nikonov V. V. Biogeokhimicheskie tsikly v lesakh severa v usloviyakh aerotekhnogennogo zagryazneniya: v 2 ch. [Biogeochemical cycles in northern forest under aerotechnogenic contamination: in 2 parts]. Apatity: KNTs RAN, 1996. Pt. 1. 213 p., Pt. 2. 192 p.

Lukina N. V., Polyanskaya L. M., Orlova M. A. Pital'nyi rezhim pochv severotaezhnykh lesov [Nutrient status of soils of northern taiga]. Moscow: Nauka, 2008. 345 p.

Lyanguzova I. V. Tyazhelye metally v sisteme pochva – rastenie: podvizhnost', postuplenie i raspredelenie [Heavy metals in a soil-plant system: mobility, input, and distribution]. *Probl. ekol. rastitel'nykh soobshchestv*

Severa [Probl. of ecol. of Northern plant communities]. St. Petersburg: VVM, 2005. P. 175–189.

Mikhailova T. A., Berezhnaya N. S., Ignat'eva O. V. Elementnyi sostav khvoi i morfologicheskieskie parametry sosny obyknovnoy v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya [Elementary composition of needles and morphological characteristics of Scots Pine under technogenic pollution]. Irkutsk: IG SO RAN, 2006. 134 p.

Morozova R. M. Mineral'nyi sostav rastenii lesov Karelii [Mineral status of forests in Karelia]. Petrozavodsk, 1991. 100 p.

Moshkina E. V., Bakhmet O. N., Medvedeva M. V., Mamai A. V., Zachinyaeva A. V., Tkachenko Yu. N. Mikrobiologicheskieskie osobennosti pochv v rastitel'nykh mikrogruppировkakh srednetaezhnogo sosnyaka brunichnogo v Karelii [Microbiological characteristics of soils under vegetation microgroups in a middle-taiga cowberry pine forest in Karelia]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2019. No. 11. P. 107–121. doi: 10.17076/eco1135

Nechaeva E. G. Landshaftno-geokhimicheskii analiz dinamiki taezhnykh geosystem [Landscape-geochemical analysis of taiga geosystem dynamics]. Irkutsk: IG SO AN SSSR, 1985. 210 p.

Nikonov V. V., Lukina N. V. Biogeokhimicheskie funktsii lesov na severnom predele rasprostraneniya [Biogeochemical functions of forest in northern edge of their distribution]. Apatity: KNTs RAN, 1994. 315 p.

Opekunova M. G., Gizetdinova M. Yu. Ispol'zovanie lishainikov v kachestve bioindikatorov zagryazneniya okruzhayushchei sredy [Using of lichens as bioindicators of environmental pollution]. *Vestnik Sankt-Petersburgskogo univ.* [Herald St. Petersburg Univ.]. 2014. Vol. 7, no. 1. P. 79–94.

Perel'man A. I., Kasimov N. S. Geokhimiya landshafta [Geochemistry of landscape]. Moscow: As-treya-2000, 1999. 768 p.

Ramenskaya M. L. Mikroelementy v rasteniyakh Krainego Severa [Microelements in plants in the Extreme North]. Leningrad: Nauka, 1974. 159 p.

Rasseyannye elementy v boreal'nykh lesakh [Trace elements in boreal forests]. Ed. A. S. Isaev. Moscow: Nauka, 2004. 616 p.

Robakidze E. A., Bobkova K. S., Naimushina S. I. Elementnyi sostav dominiruyushchikh vidov rastenii v srednetaezhnykh sosnyakh raznogo vozrasta (na primere Respubliki Komi) [Elemental composition of dominating plant species in different aged middle-taiga pine forests of the Republic of Komi]. *Rastitel'nye resursy* [Plant Resources]. 2020. Vol. 56, iss. 1. P. 53–65.

Rodin L. E., Remezov N. P., Bazilevich N. I. Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitotsenozakh [Guidelines for studying dynamics and biocycles in phytocenosis]. Leningrad: Nauka, 1967. 145 p.

Steblevskaya N. I., Medkov M. A., Molchanov V. P., Polyakova N. V., Moiseenko L. I., Zorikov P. S., Batyrbayeva N. V. Izuchenie biogeokhimicheskogo nakopleniya mikroelementov v pochvakh i rasteniyakh Dal'nego Vostoka [Investigation of biogeochemical accumulations in soils and plants of the Far East]. *Vestnik DO RAN* [Vestnik of the Far East Br. RAS]. 2006. No. 2(126). P. 57–63.

Sukhareva T. A. Elementnyi sostav zelenykh mkhov fonovykh i tekhnogenno narushennykh territorii [The green moss elemental composition of the background and industrially disturbed areas]. *Uchenye zapiski PetrGU* [Proceed. Petrozavodsk St. Univ.]. 2018. No. 3(172). P. 89–96. doi: 10.15393/uchz.art.2018.130

Sukhareva T. A. Elementnyi sostav tallomov lishainika *Cladonia stellaris* v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya [Element composition of lichen of *Cladonia stellaris* under air pollution]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2016. No. 4. P. 70–82. doi: 10.17076/eco259

Tabalenkova G. N., Dal'ke I. V., Golovko T. K. Elementnyi sostav biomassy nekotorykh vidov lishainikov boreal'noi zony na evropeiskom Severo-Vostoke [Biomass elemental composition of some lichen species in the boreal zone of European North-East]. *Izv. Samar'skogo nauch. tsentra RAN* [Proceed. Samara Sci. Center RAS]. 2016. Vol. 18, no. 2. P. 221–225.

Toikka M. A., Perevozchikova E. M., Levkina T. I., Zavarzin A. M., Mikhkiev A. I., Izergina M. M. Mikroelementy v Karelii [Trace elements in Karelia]. Leningrad: Nauka, 1973. 284 p.

Vershinina S. E., Vershinin K. E., Kravchenko O. Yu., Chebykin E. P., Vodneva E. N. Elementnyi sostav lishainikov *P. setraria* iz razlichnykh regionov Rossii [Element structure of lichens *P. setraria* in various regions of the Russian Federation]. *Khim. rast. syr'ya* [Chem. of Plant Materials]. 2009. No. 1. P. 141–146.

Vlasova N. V. Landshaftno-geokhimicheskoe sostoyanie taezhnykh ekosistem v basseine Nizhnei Tunguski [Landscape-geochemical condition of middle taiga geosystems]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Nat. Resources]. 2011. No. 2. P. 100–107.

Bjerke J., Tommervik H., Finne T. E., Jensen H., Lukina N., Barestuen V. Epiphytic lichen distribution

and plant leaf heavy metal concentrations in Russian-Norwegian boreal forests influenced by air pollution from nickelcopper smelters. *Boreal Environ. Res.* 2006. No. 6. P. 441–450. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.029

Gandois L., Agnan Y., Leblond S., Sejalon-Delmas N., Le Roux G., Probst A. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment. *Atmos. Environ.* 2014. Vol. 95. P. 96–104. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.06.029

Gjengedal E. Effects of soil acidification on foliar leaching and retranslocation of metals in vascular plants. *Water, Air, & Soil Pollution.* 1996. No. 86. P. 221–234.

Grand S., Hudson R., Lavkulich L. M. Effect of forest harvest on soil nutrients and labile ions in podzols of southwestern Canada: mean and dispersion effects. *Catena.* 2014. Vol. 122. P. 18–26. doi: 10.1016/j.catena.2014.06.004

Ingestad T. Mineral nutrient requirements of *Vaccinium vitis-idaea* and *Vaccinium myrtillus*. *Physiol. Plant.* 1973. No. 29. P. 239–246.

Kozłowski R., Szwed M., Zukowski W. Pine needles as bioindicator of pollution by trace elements from cement-limestone industry in central-eastern Poland. *Carpathian J. Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 14, no. 2. P. 541–549. doi: 10.26471/cjees/2019/014/102

Nash III T. H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling. *Lichen biology.* Camb. Univ. Press, 2008. P. 234–251. doi: 10.1017/CBO9780511790478.013

Vasconcelos S. D., Carbral J. P., Freitas C. M., Pacheo A. M. G. Copper, nickel, lead in lichens and tree bark transplants over different period of time. *Environ. Pollut.* 2008. Vol. 151. P. 408–413. doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.004

Received April 14, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Ахметова Гульнара Вялитовна

старший научный сотрудник лаб. лесного почвоведения, к. б. н.

Институт леса КарНЦ РАН,

Федеральный исследовательский центр

«Карельский научный центр РАН»

ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,

Россия, 185910

эл. почта: akhmetovagv@gmail.com

CONTRIBUTOR:

Akhmetova, Gulnara

Forest Research Institute, Karelian Research Centre,

Russian Academy of Sciences

11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia

e-mail: akhmetovagv@gmail.com