

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*581.552:574

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В ХВОЕ ЕЛИ ОБЫКНОВЕННОЙ В ПОДМОСКОВЬЕ

© 2013 г. В. Н. Второва, Л. Б. Холопова

Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

Москва 119071, Ленинский просп., 33

E-mail: lsdc@mail.ru

Поступила в редакцию 28.08.2011 г.

Представлены результаты анализа изменчивости содержания Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc, Cr, Li, Y, Co, Mo, V, Ni и Pb в хвое *Picea abies* L. в 35-летних культурах ели (Московская обл.). На основе данных многомерного анализа установлены индексы максимальной вариабельности концентраций Ni, Pb и V, что может указывать на их более активное участие в метаболизме молодой хвои. По результатам кластерного анализа выявлен ряд особенностей в структуре элементного состава. В кластеры объединяются элементы, которые обладают катионогенными (Pb, Ni, Li, Co, Sr) или анионогенными (V, Mo, Cr) свойствами. Содержание ряда элементов в одно- и двухлетней хвое сходно, а с возрастом хвои вариабельность их содержания возрастает.

Культуры ели, хвоя ели, изменчивость содержания тяжелых металлов и редкоземельных элементов, метод главных компонент, кластерный анализ.

Микроэлементы (МЭ) содержатся в почвах, породах, природных водах, живых организмах в очень малых количествах (менее $n \cdot 10^{-3}\%$), но они выполняют важные функции активаторов биохимических процессов накопления, трансформации, переноса органических соединений в экосистеме. Mo, Zn, Al, V, Fe, Ni, Ti, U, Cu, Cr, Mn, Cs, Se, Sb, Co, W рассматриваются как катализаторы биохимических процессов в организмах. МЭ часто не входят в число необходимых для растений элементов, однако они могут интенсивно поглощаться их корнями и листьями. Информация о поглощении МЭ растениями разных видов на фоновых территориях лесных экосистем крайне скудна и часто носит ориентировочный качественный характер.

По характеру функций, которые выполняют те или иные элементы в процессах метаболизма растений, исследованные нами элементы Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc, Cr, Li, Y, Co, Mo, V, Ni, Pb можно отнести к категории жизненно необходимых для роста и развития растений (Mo и Cr) и условно необходимых (V, Ni, Pb, Li). От 30 до 50% поступающих в атмосферу Cd, Cu, Mn, Pb, Zn, As, Sb и более 50% Se и Mo связывают с деятельностью биологических процессов организмов [13].

Достоверно установлена потребность растений отдельных семейств, родов и видов в определен-

ных химических элементах: Be – *Vaccinium myrtillus*, Bi – *Lycopodiales*, As – микроорганизмы и грибы, Te – *Alliaceae*, *Allium*, Y – *Pinaceae*, Co – *Fabales* и род *Alnus*, Sc – мхи, лишайники, грибы, Li – *Solanactae*, *Polygonaceae*, *Rosaceae*.

Основные поставщики МЭ в атмосферу и на подстилающую поверхность земли – антропогенные и природные источники. К биологическим источникам относятся, например, соли, выделяющиеся в процессе транспирации растений, пыльца и споры растений [1], газообразные соединения металлов типа тетраметил-свинца, метил-ртути, образующиеся в результате микробиологических процессов метилизации [5], и др.

Несмотря на длительную историю изучения проблемы МЭ в биосфере (накопление массы фактических данных по уровню содержания МЭ в разных компонентах биосферы и реакции живых организмов на их недостаток или избыток, разработка специальных методов анализа и составление карт биогеохимического районирования), общей теории, рассматривающей функции, механизмы и роль МЭ в биосфере, пока нет [11]. Поэтому каждая работа по исследованию круговорота МЭ в экосистемах и их компонентах представляет вклад в развитие этой теории.

Способность растительных организмов реагировать на колебания природных и антропогенных факторов увеличением вариабельности их химического состава – одно из основных свойств растений, обеспечивающих их адаптацию к меняющимся условиям среды [8–10].

Цель настоящей работы – определить содержание и сезонную изменчивость концентраций МЭ в молодой хвое *Picea abies* L. 35-летних лесных культур и дерново-подзолистой почвах, типичных для района их произрастания.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 35-летних культурах ели в зоне широколиственно-еловых лесов (биостанция Малинки Института проблем экологии и эволюции РАН – Московская обл.) на территории, представляющей собой наклонную равнину, ядро которой сложено юрскими глинами и меловыми песками, перекрытыми ледниковыми отложениями. Почвообразующие породы – покровные и моренные суглинки. Естественная растительность – еловые и широколиственно-еловые леса; на месте коренных лесов сформировались березняки и осинники.

Объект исследования – культуры ели 35-летнего возраста (сомкнутость 0,8, средняя высота деревьев 10–12 м, средний диаметр 10–12 см) на дерново-подзолистой почве, сформированной на покровном суглинке. В хвое ели и почве определяли содержание Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc, Cr, Li, Y, Co, Mo, V, Ni и Pb.

Почвенные пробы отбирали в зоне влияния деревьев ели. При определении МЭ в почве использованы вытяжка однонормальной HCl (соотношение 1:10), обычно применяемая для определения потенциального запаса элемента в почве, 1% раствор ЭДТА в аммонийно-ацетатном буфере (1:10, pH 4,8) для извлечения обменных и растворимых в слабых кислотах форм элементов и вытяжка с аммонийно-ацетатным буфером (1:10, pH 4,8) для характеристики актуального содержания микроэлементов [12]. Валовое содержание элементов определяли в образцах при разложении смесью концентрированных серной и азотной кислот.

При отборе образцов хвои соблюдали требования отработанной ранее методики сбора, хранения и подготовки проб для химического анализа растений [1]. Прирост и однолетнюю хвою ели собирали отдельно с 16 деревьев разных полос посадки насаждений на высоте 1,3 м по периферии кроны в конце мая и начале сентября. Схе-

ма сбора образцов хвои рассчитана так, чтобы охватить двухлетний период ее роста и развития. Образцы отбирали в одноразовых перчатках, перед проведением химических анализов готовили средний образец, чтобы исключить выщелачивание элементов; хвою не отмывали. Определение концентраций элементов в пробах проводили в специализированной лаборатории с использованием инструментальных методов (AAS, ICP/AES, ICP/MS, MAS). Калибровку сигналов приборов и контроль процесса определения элементов осуществляли с помощью стандартного образца хвои сосны (NBS 1575). Результаты представлены как средние из двух повторностей определения элемента. Для обработки данных анализа использована программа Past.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почва исследованного объекта – дерново-подзолистая с набором горизонтов A0–A1–A1A2–A2 (фрагментарный)–A2B–B1–B2–BC–C, пылевато-суглинистая в горизонтах A1 и A2 и иловато-пылевато-тяжелосуглинистая в горизонте B. Профиль почвы слабо дифференцирован, что, по-видимому, связано с историей развития почвенного покрова данной территории и подготовкой почвы для посадки культур. Плотность изменяется по профилю от 0,77 (A1) до 1,77 г см⁻³ (BC). Содержание гумуса в горизонте A1 (3,33%) резко падает до 0,26% на глубине 20–25 см (A2).

Общий химический состав почв был представлен в опубликованной ранее работе [3]. Здесь отметим, что для валового состава исследованных почв характерно типичное распределение SiO₂ и R₂O₃. Изменение по профилю реакции, содержания поглощенных оснований и элементов питания почв отражают особенности почвообразовательного процесса, продуктом которого являются широко распространенные в районе исследования дерново-подзолистые почвы. Общее содержание и концентрация разных форм анализируемых элементов представлены в табл. 1.

Среди исследованных элементов Ni > Li > Cr > Pb > V > Co > Y преобладают по их содержанию в слое 0–20 см. При детальном рассмотрении этого слоя выявляется повышенная концентрация Be, Te, Sc, Cr, Y, Co, V, Ni и Pb в самом верхнем горизонте (0–5 см); Bi, Cd, As, Sb и Li распределены довольно равномерно.

По степени извлечения элементов однонормальным раствором HCl (процент от общего валового содержания в почве) исследованные элементы можно разделить на 2 группы: Be, Bi, Cd, Te, Sb, Sc, Cr, V, Ni, содержание которых в

Таблица 1. Содержание разных форм микроэлементов (мг кг⁻¹) в верхней части профиля дерново-подзолистой почвы (0–20 см)

Элемент	Валовое содержание			Однонормальный раствор HCl			ЭДТА + аммонийно-ацетатный буфер, рН 4.8			Аммонийно-ацетатный буфер, рН 4.8		
	0–5 см	5–10 см	10–20 см	0–5 см	5–10 см	10–20 см	0–5 см	5–10 см	10–20 см	0–5 см	5–10 см	10–20 см
Be	3.20	2.90	2.60	0.04	0.04	0.05	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01
Bi	0.91	1.05	1.05	0.40	0.33	0.37	0.15	0.13	0.12	0.02	0.02	0.02
Cd	0.31	0.26	0.33	0.13	0.12	0.13	0.04	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00
As	0.94	0.96	0.83	0.67	0.58	0.54	0.18	0.18	0.16	0.01	0.01	0.01
Te	0.95	0.42	0.39	0.34	0.32	0.25	0.09	0.09	0.07	0.01	0.01	0.01
Sb	1.35	1.29	1.26	0.61	0.54	0.48	0.20	0.19	0.16	0.00	0.00	0.00
Sc	4.70	3.90	3.70	1.50	2.00	4.10	0.10	0.10	0.10	0.01	0.02	0.04
Cr	24.10	19.00	16.00	8.20	7.90	10.20	3.50	3.20	3.30	0.20	0.20	0.20
Li	41.20	42.10	41.10	Не опр.	Не опр.	Не опр.	0.90	0.90	0.90	Не опр.	Не опр.	Не опр.
Y	16.20	13.30	10.50	11.50	10.30	11.60	2.00	1.80	1.40	0.20	0.20	0.20
Co	21.60	18.20	12.60	12.70	10.90	8.60	3.80	3.70	2.70	0.20	0.30	0.40
Mo	2.20	2.40	2.10	1.80	1.56	1.14	0.30	0.30	0.20	0.04	0.03	0.02
V	17.40	15.04	14.20	8.70	15.00	7.90	3.90	3.60	3.20	0.20	0.20	0.30
Ni	59.40	42.00	25.80	25.50	23.10	20.10	11.00	11.20	6.00	0.38	0.87	0.24
Pb	24.60	20.10	20.00	14.20	12.80	11.20	6.00	5.00	4.00	Нет	Нет	Нет

кислотной вытяжке составляет менее 50%, и As, Y, Co, Mo, Pb. Концентрация Li не определена. Что касается концентрации элементов в вытяжке смеси трилона и аммонийно-ацетатного буфера, Be, Te, Sc и Y составляет 0–12% от их валового содержания в почве, все остальные – 12–25%. Сравнение содержания исследованных МЭ и их форм с установленными токсичными концентрациями этих элементов показало, что они не превышают предельно допустимых [14].

Химический состав молодой хвои ели и концентрации МЭ в растениях по данным литературных источников представлены в табл. 2.

Известно, что химический состав растительных организмов изменчив, и его вариации тем больше, чем меньше концентрация изучаемого элемента. Концентрация элементов в растениях определяется особенностями потребления веществ конкретным видом растения, возрастом его исследуемого органа и условиями окружающей среды (видовой принадлежностью растения, свойствами почв, атмосферными поступлениями элементов и т.п.) [2]. Сумма исследованных МЭ от весны до осени за два сезона вегетации в органической массе хвои изменяется от 5.71 до 5.88 мг кг⁻¹. На долю V, Ni, Pb приходится около 70% суммы анализируемых элементов, на долю Cr, Li, Y, Co, Mo – 23%, а 7% составляют Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc. В одних и тех же экологических условиях в течение двух сезонов вегетации

содержание МЭ в хвое *Picea abies* L. существенно меняется, в большей степени колеблется содержание элементов с более высокими концентрациями. Заметны изменения концентраций элементов в начале и в конце вегетационного периода, в первый и второй годы жизни хвои. Полученные данные сравнимы со средневзвешенными значениями концентраций в фотосинтезирующих органах растений из фоновых экосистем Западной Европы [10, 14], и это позволило включить их в качестве дополнительной выборки и использовать при проведении математического анализа.

Для оценки масштабов варьирования концентраций исследованных элементов использован метод многомерного анализа. Анализ главных компонент можно применять к любым данным, отвечающим следующим основным требованиям: каждая выборка содержит значения одних и тех же переменных, выборки представляют собой непрерывный ряд, исходные переменные не заменяются их отношениями или линейными функциями [4].

Метод главных компонент (МГК) применен для анализа концентраций Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc, Cr, Li, Y, Co, Mo, V, Ni, Pb в образцах хвои *Picea abies* L., собранных в вегетационные периоды в течение двух лет; для сравнения использованы данные состава растений из Европы. С помощью МГК исходные концентрации эле-

Таблица 2. Содержание микроэлементов в приросте и однолетней хвое ели, мг кг⁻¹

Элемент	Текущий прирост хвои		Однолетняя хвоя		МЭ по [10, 13]	
	май	сентябрь	май	сентябрь	среднее	min-max
Be	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001–0.400
Bi	0.009	0.014	0.016	0.021	0.020	He опр.
Cd	0.032	0.033	0.026	0.025	0.050	0.030–0.500
As	0.029	0.031	0.052	0.043	0.060	0.010–1.500
Te	0.027	0.021	0.021	0.024	0.050	0.010–0.350
Sb	0.034	0.045	0.051	0.071	0.060	0.100–0.200
Sc	0.070	0.040	0.013	0.015	0.020	0.010–0.200
Cr	0.120	0.160	0.110	0.140	0.120	0.200–1.000
Li	0.140	0.110	0.130	0.160	0.200	0.010–3.100
Y	0.180	0.210	0.170	0.190	0.200	0.150–0.770
Co	0.130	0.140	0.180	0.220	0.200	0.020–0.500
Mo	0.280	0.290	0.130	0.160	0.200	0.030–5.000
V	0.820	1.020	0.780	0.950	1.000	0.001–10.000
Ni	0.760	0.640	0.880	0.930	1.500	0.400–4.000
Pb	0.880	1.000	0.950	1.070	1.000	0.100–5.000

ментов, представленные в 5 выборках, сведены к наименьшему числу измерений вариабельности, существенных для анализа. В ходе анализа корреляций между 16 переменными установлена доля полной вариабельности, которая учтена в первой главной компоненте. В данном случае она составляет от 85 до 91%, во второй компоненте – 8–10%. Высокая доля полной вариабельности первой компоненты не характерна для биологических объектов и скорее всего связана с различиями концентраций представленных МЭ на порядки величин. Формирование первой компоненты обусловлено изменчивостью концентраций Ni и Pb (коэффициент линейной функции Ni – 0.6–0.9, Pb – 0.3–0.7). Вторая компонента связана с концентрациями Co (0.5–0.8), Cr (0.2–0.5), Li (0.5–0.6), V (0.4–0.6). Значение третьей компоненты (до 4% остаточного варьирования Li, V, Pb) установлено при анализе образцов хвои за два сезона вегетации.

Подобный анализ МГК макроэлементов в составе хвои ели в этих же культурах показал, что каждая компонента является определенной мерой той роли, которую выполняют конкретные элементы в функционировании ассимиляционного аппарата ели [3].

Можно полагать, что и в данном случае максимальные индексы вариабельности, установленные для концентраций Ni, Pb, V, также характеризуют меру их участия в обменных процессах молодой хвои ели. При низких концентрациях эти элементы оказывают стимулирующее действие на рост и развитие растений, при этом Ni является незаменимым элементом в составе ряда ферментов [7].

Формируя вторую компоненту, Co, Cr, Li и V отражают некоторую меру обеспеченности ими хвои. Участие этих элементов в метаболизме высших растений надежно не доказано. Однако биохимические функции Co и V заключаются в стимуляции процессов фотосинтеза и биофиксации молекулярного азота (Co – кобамидный кофермент, V – специфический катализатор) не только сине-зелеными, зелеными водорослями, микроорганизмами и микоризой, но и высшими растениями из семейства Fabales и рода *Alnus*. Cr – важный элемент питания: он жизненно необходим в метаболизме глюкозы животных и человека [7].

Метод главных компонент был использован для анализа содержания МЭ в весенней (май) и осенней (сентябрь) хвое, в текущем приросте (с мая по сентябрь), в однолетней хвое (с мая по сентябрь) и хвое (с мая по сентябрь в течение 2 лет). Первая главная компонента во всех вариантах анализа отвечает за 95–97% полной вариабельности состава хвои разного возраста в разные сезоны. Согласно значениям коэффициентов линейной функции 16 переменных, анализируемые выборки образуют следующий ряд: хвоя за два года вегетации (0.57) > хвоя за год вегетации (0.45) > текущий прирост осенью, весной и за год (0.40). Варьирование концентраций элементов в двухлетней хвое примерно в 1.5 раза выше, чем в текущем приросте.

Таким образом, для оценки исходных значений содержания Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc, Cr, Li, Y, Co, Mo, V, Ni, Pb в составе хвои, необходимых для нормального роста и развития ели, достаточно ограниченного числа аналитических опреде-

лений элементов в образцах текущего прироста или однолетней хвои. С возрастом хвои увеличивается вариабельность концентраций МЭ за счет постепенного их накопления в ходе процессов метаболизма.

Кластерный анализ [4] концентраций МЭ в хвое ели позволяет в виде дендрограмм охарактеризовать распределение образцов хвои и элементов во внутренней структуре представленных выборок. Задача анализа заключается в объединении состава образцов хвои в классы (кластеры) таким образом, чтобы элементы внутри одного класса обладали высокой степенью близости количественных показателей между собой, а сами классы по структуре были отличны один от другого.

Целью анализа является обнаружение так называемых “естественных групп” [4] из образцов хвои, близких по содержанию элементов и “естественных групп” МЭ, близких по концентрациям.

Как видно на рис. 1, образцы распределились по местообитаниям и сезонам года в соответствии с химическим составом. На рис. 2 “естественные группы” из МЭ формируются следующим образом: первый класс (I) объединил 12 элементов: в подкласс I.1 вошли Be, Bi, Cd, As, Te, Sb, Sc; подкласс I.2 состоит из 5 элементов – Cr, Li, Y, Co, Mo. Второй класс (II) включает три элемента: подкласс II.1 – Ni; II.2 – Pb и V. Концентрации элементов в первом классе имеют минимальные значения, во втором – максимальные. Диапазон концентраций элементов, объединившихся в подкласс I.1, составляет от 0.001 до 0.070 мг кг⁻¹, максимальные и минимальные значения различаются в 70 раз. В подклассе I.2 содержатся пять элементов со значениями концентраций от 0.11 до 0.29 мг кг⁻¹ (различия в 2.6 раза).

Нижний уровень классификации МЭ, по данным дендрограмм, формируется из 3–5 ассоциаций по два элемента. Эти пары включают элементы, обладающие ярко выраженными свойствами катионов (Li, Co, Ni) или проявляющие амфотерные свойства, являясь катионогенами или анионогенами (включая элементы, образующие комплексные анионы). Чаще всего такие ассоциации наблюдались для Be–Bi, Sb–As, Cd–Te, Cr–Li, Y–Co, Pb–V.

Один из основных параметров биогеохимических индикаторов состояния окружающей среды – накопление химических элементов в растениях относительно их кларкового или регионального содержания в почве. Интенсивность поглощения и накопления элементов в хвое ели по сравнению

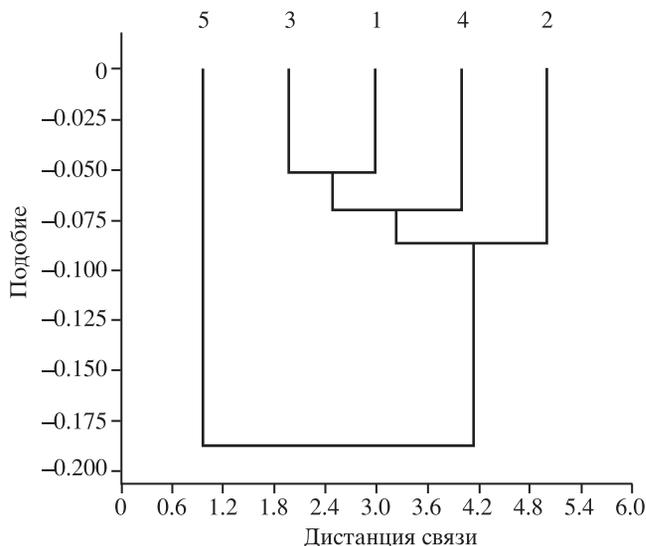


Рис. 1. Дендрограмма распределения образцов хвои ели: 1 – текущий прирост хвои в мае; 2 – однолетняя хвоя в сентябре; 3 – однолетняя хвоя в мае; 4 – двухлетняя хвоя в сентябре; 5 – средневзвешенный образец растений Западной Европы

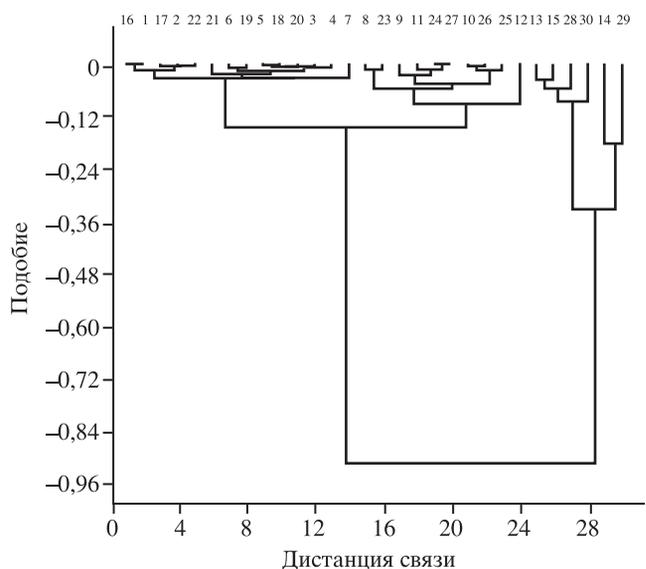


Рис. 2. Дендрограмма распределения химических элементов в образцах хвои: 1, 16 – Be; 2, 17 – Bi; 3, 18 – Cd; 4, 19 – As; 5, 20 – Te; 6, 21 – Sb; 7, 22 – Sc; 8, 23 – Cr; 9, 24 – Li; 10, 25 – Y; 11, 26 – Co; 12, 27 – Mo; 13, 28 – V; 14, 29 – Ni; 15, 30 – Pb.

с почвой оценивали при помощи коэффициентов биологического поглощения (КБП). Обычно определяют отношение концентрации элемента в растении к его валовому содержанию в почве. Мы использовали отношение к концентрации потенциально подвижных элементов в почве, используя данные кислотной вытяжки и вытяжки ЭДТА с аммиачным буфером (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициент биологического поглощения исследованных элементов по отношению к содержанию элементов в вытяжках однонормальной HCl и ЭДТА+ и аммонийный буфер (pH 4.8)

Элемент	Текущий прирост хвои		Однолетняя хвоя	
	HCl	ЭДТА+ + буфер	HCl	ЭДТА+ + буфер
Be	0.044	0.250	0.044	0.250
Bi	0.037	0.107	0.057	0.162
Cd	0.275	1.000	0.208	0.757
As	0.049	0.172	0.065	0.239
Te	0.070	0.233	0.080	0.267
Sb	0.083	0.250	0.131	0.394
Sc	0.016	0.400	0.006	0.150
Cr	0.018	0.048	0.016	0.042
Li	0.011	0.122	0.016	0.178
Y	0.019	0.147	0.017	0.133
Co	0.013	0.038	0.129	0.059
Mo	0.193	0.967	0.107	0.533
V	0.097	0.283	0.088	0.264
Ni	0.028	0.071	0.041	0.103
Pb	0.079	0.250	0.084	0.268

По нашим данным, Cd и Mo поглощаются хвоей ели в наибольшей степени (в десятки раз). Ниже приводим КПБ для остальных исследуемых элементов: 0.010–0.020 для Sc, Cr, Li, Y, Co; 0.020–0.050 – Be, Bi, As, Ni; 0.050–0.10 – Te, Sb, V, Pb. К сожалению, сравнить эти данные с результатами, полученными другими исследователями, не представляется возможным в связи с их отсутствием.

Заключение. Изменчивость содержания МЭ в текущем приросте и молодой хвое ели обыкновенной разных сроков и сезонов вегетации отражает сложную систему связей между элементами. Анализ структуры этих связей выявил большие масштабы варибельности концентраций МЭ, значения которых возрастают по мере старения хвои. Результаты многомерного анализа показали, что индексы максимальной варибельности демонстрируют концентрации Ni, Pb и Li, указывая на более высокую потребность молодой хвои в этих элементах. Концентрации Co, Cr и V более стабильны и свидетельствуют об обеспеченности ими растущей хвои. По результатам кластерного анализа выявлен ряд особенностей в структуре элементного состава. Анализ концентраций МЭ показал, что в кластеры объединяются группы элементов, структура которых зависит от возраста хвои в большей степени, чем от сезона года. Эти группы элементов обладают в основном

катионогенными (Pb, Ni, Co, Sr) или анионогенными (V, Mo, Cr) свойствами. Количественное перераспределение МЭ, поглощенных текущим приростом, и накопление их в однолетней хвое происходит очень медленно, сходство значений содержания ряда МЭ в одно- и двухлетней хвое обусловлено неясной ролью их в биохимических процессах, что связано с характером пассивного накопления элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондарев Л.Г.* Роль растительности в миграции минеральных веществ в атмосферу // *Природа*. 1983. № 3. С. 86–90.
2. *Второва В.Н., Маркерт Б.* Мультиэлементный анализ растений бореальных лесов Восточной Европы // *Изв. РАН. Сер. биол.* 1995. № 3. С. 447–454.
3. *Второва В.Н., Холопова Л.Б.* Распределение биофильных элементов в кроне ели европейской // *Лесоведение*. 2010. № 3. С. 71–80.
4. *Джеффферс Д.* Введение в системный анализ: применение в экологии. М.: Мир, 1981. 252 с.
5. *Добровольский В.В.* Глобальная система массопотоков тяжелых металлов в биосфере // *Рассеянные элементы в бореальных лесах*. М.: Наука, 2004. С. 23–29.
6. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва – растения. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
7. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
8. *Кист А.А.* Феноменология биогеохимии и биоинорганической химии. Ташкент: ФАН, 1987. 236 с.
9. *Ковальский В.В.* Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. 298 с.
10. *Никонов В.В., Лукина Н.В., Фронтасьева М.В.* Растения // *Рассеянные элементы в бореальных лесах*. М.: Наука, 2004. С. 151–187.
11. *Орлов Д.С.* Микроэлементы в почвах и живых организмах // *Green Future 2009-02-10* (<http://greenfuture.ru/Homa>). Р. 1–10.
12. *Практикум по агрохимии*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 304 с.
13. *Цибульский В.В., Яценко-Хмелевская М.А.* Источники поведения тяжелых металлов в атмосфере // *Рассеянные элементы в бореальных лесах*. М.: Наука, 2004. С. 30–38.
14. *Markert B.* Element concentration cadasters in ecosystems // *International Union of Biological Sciences, Progress Report, 25th General Assembly of IUBS*, 1994. 36 p.

Content of Microelements in Needles of Norway Spruce in Moscow Region

V. N. Vtorova, L. B. Kholopova

The results on the variability of the Be, Bt, Cd, As, Te, Sb, Sc, Cr, Li, Y, Co, Mo, V, Ni, and Pb contents in *Picea abies* L. needles of 35-year-old plantations (Moscow region) are presented. Using the multivariate analysis, indices of maximum variation of Ni, Pb, and V concentrations have been obtained pointing to their more active participation in the metabolism of young needles. Based on the results of the cluster analysis, some specific features in the structure of the elemental composition have been revealed. Elements with cationogenic (Pb, Ni, Li, Co, and Sr) and anionogenic (V, Mo, and Cr) properties are combined in separate clusters. The content of some elements in 1- and 2-year-old needles is similar; with age, the variation of their content increases.

Picea abies plantations, spruce needles, variation of heavy metal and rare earth contents, method of principal components, cluster analysis.