Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. 19. С. 351–356

Химический состав листьев дикорастущих кустарничков северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях

Сухарева Т.А.
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, s.tat.a@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты химического анализа листьев дикорастущих вечнозеленых кустарничков северотаежных лесов, формирующихся в условиях длительного атмосферного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината «Североникель» (г. Мончегорск, Мурманская область). Изучено содержания макро- и микроэлементов в листьях брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и вороники (*Empetrum hermaphroditum* Hager.) в лесах разного типа состояния (фоновые и дефолиирущие леса, техногенные редколесья). Показано, что элементный состав листьев кустарничков характеризуется значительной возрастной и пространственной изменчивостью. В условиях аэротехногенного загрязнения ассимилирующие органы вечнозеленых кустарничков обедняются элементами питания – N, K, P, Mg, Mn, Zn. В процессе техногенной дигрессии сосновых и еловых лесов в листьях вечнозеленых кустарничков многократно возрастает содержание Fe, Ni, Cu. Максимальные концентрации Ni выявлены в многолетних листьях *Empetrum hermaphroditum* техногенных редколесий. При оценке состояния дикорастущих кустарничков на техногенно нарушенных территориях необходимо учитывать возрастную и биогеоценотическую изменчивость элементного состава растений.

Ключевые слова: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hager., листья, элементный состав, атмосферное загрязнение, Арктика.

Chemical composition of leaves of wild shrubs of northern taiga forests in the background and technogenically disturbed territories

Sukhareva T.A.
Institute of North Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Murmansk region; s.tat.a@mail.ru

Abstract. The results of chemical analysis of the leaves of wild evergreen shrubs of the north taiga forests under conditions of long-term air pollution by emissions of the Severonikel copper-nickel combine (Monchegorsk, Murmansk region) are presented. The content of macro- and microelements in the leaves of *Vaccinium vitis-idaea* L. and *Empetrum hermaphroditum* Hager. in forests of different types of condition (background and defoliating forests, sparse forests) was studied. It is shown that the elemental composition of shrub leaves is characterized by significant age and spatial variability. The results provide evidence for reduction in the concentrations of nutrition – N, K, P, Mg, Mn, Zn the assimilating organs of evergreen shrubs in areas with different levels of air pollution. In the process of pollution-induced digression of pine and spruce forests the content of Fe, Ni, Cu increases in the leaves of evergreen shrubs. The maximum concentrations of Ni were found in the perennial leaves of *Empetrum hermaphroditum* of sparse forests. It is necessary to take into account the age and biogeocenotic variability of the elemental composition of plants for assessing the condition of wild shrubs in pollution-induced disturbed territories.

Keywords: *Vaccinium vitis-idaea* L., *Empetrum hermaphroditum* Hager., leaves, elemental composition, air pollution, Arctic.

Введение

Изменение условий произрастания растений под влиянием аэротехногенного загрязнения и климатических изменений может приводить к нарушениям экосистемных функций лесов: изменять круговорот биофильных элементов, плодородие почв, продуктивность лесных экосистем. Дикорастущие вечнозеленые кустарнички являются доминирующими видами напочвенного покрова северотаежных лесов и принимают активное участие в процессах миграции и трансформации химических соединений в наземных экосистемах. В Мурманской области более восьмидесяти лет лесные экосистемы подвергаются интенсивному воздействию загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферных выбросах медно-никелевого комбината «Североникель» (г. Мончегорск, Мурманская область). Основными поллютантами, оказывающими влияние на функционирование лесных

биогеоценозов являются диоксид серы и полиметаллическая пыль, в состав которой входят тяжелые металлы (никель, медь, кобальт, кадмий, свинец и др.)

Исследование элементного состава кустарничков необходимо для более полной характеристики распределения химических элементов в природных и антропогенных ландшафтах, поскольку они являются важнейшим звеном биологического круговорота веществ и достаточно устойчивы к техногенному воздействию. Кроме того, высокая чувствительность растений к изменениям внешних факторов позволяет использовать их в качестве индикаторов для оценки состояния лесных биогеоценозов в условиях атмосферного загрязнения.

Цель работы – изучение содержания химических элементов, в т.ч. тяжёлых металлов, в листьях разного возраста дикорастущих вечнозеленых кустарничков в процессе техногенной дигрессии сосновых и еловых лесов Мурманской области.

Материалы и методы исследования

Полевые исследования проведены на мониторинговой сети площадок постоянного наблюдения (ППН) ИППЭС КНЦ РАН в еловых и сосновых лесах на фоновой территории (167 и 171 км в юго-западном направлении от комбината «Североникель»), в дефолиирующих лесах (31, 48, 62 км) и техногенных редколесьях (7 и 10 км). В Лапландском государственном природном биосферном заповеднике расположены 2 ППН (31 км от источника загрязнения). Ранее проведенные исследования на ППН показали, что в атмосферных выпадениях в виде дождя в дефолиирующих еловых и сосновых лесах концентрации тяжелых металлов превышали фоновые значения – до 76 раз, сульфатов – до 5 раз, в техногенном еловом и сосновом редколесье наблюдалось увеличение металлов – до 450 раз и сульфатов – до 5 раз. Возрастание выпадений основных поллютантов в атмосферных выпадениях по сравнению с фоновой территорией свидетельствует о продолжающемся негативном воздействии воздушного промышленного загрязнения на лесные экосистемы (Ершов и др., 2019, Сухарева и др., 2020).

Объектами исследования послужили листья вечнозеленых кустарничков – вороники *(Empetrum hermaphroditum* Hager.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.).Отбор кустарничков проводили в 5-кратной повторности в межкроновых пространствах в конце вегетационного периода (август) в 2011 г. В лаборатории листья вороники и брусники разбиралась на листья текущего года и многолетние. Содержание химических элементов в растительных образцах определяли после разложения концентрированной HNO_3 (мокрое озоление). Концентрации Ca, Mg, Al, Fe, Zn, Cu, Ni, Mn определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии; K – методом атомно-эмиссионной спектрометрии; P – фотоколориметрическим методом (метод Лоури-Лопеса), S - турбодиметрическим методом, N – по методу Къельдаля, C – по методу Тюрина. Для сравнения содержания химических элементов в листьях использовали непараметрические статистические критерии U-критерия Манна-Уитни (для попарных сравнений) и H-критерия Краскела-Уоллиса в программе Statistica 13.3.

Результаты и обсуждение

В таблице приведены данные по содержанию макро- и микроэлементов в листьях дикорастущих кустарничков в процессе техногенной дигрессии северотаежных лесов.

Фоновые условия. Содержание углерода в листьях брусники ниже (48–52 %) по сравнению с вороникой (54–66 %). У кустарничков в листьях разного возраста содержание углерода практически не изменяется и остается на постоянном уровне. В сосновых лесах концентрация азота выше в листьях вороники, в еловых лесах – в листьях брусники ($p < 0.05$). Из минеральных элементов в листьях брусники сосновых лесов доминирует Ca, еловых лесов – K (листья текущего года) и Ca (многолетние листья). В ассимилирующих органах вороники северотаежных лесов в листьях текущего года преобладает K, в многолетних листьях – Ca. Листья брусники характеризуются более высокими концентрациями Mn и Zn, листья вороники – Ni. В листьях текущего года вороники и брусники отмечены высокие концентрации N, K, P и Cu, в многолетних – Ca, Mn, Fe, Al ($p < 0.05$). У вороники в многолетних листьях возрастает содержание Mg.

Таблица. Элементный состав листьев *Vaccinium vitis-idaea* и *Empetrum hermaphroditum* в процессе техногенной дигрессии северотаежных лесов.

Table. Elemental composition of the leaves of *Vaccinium vitis-idaea* and *Empetrum hermaphroditum* in the process of pollution-induced digression of north taiga forests.

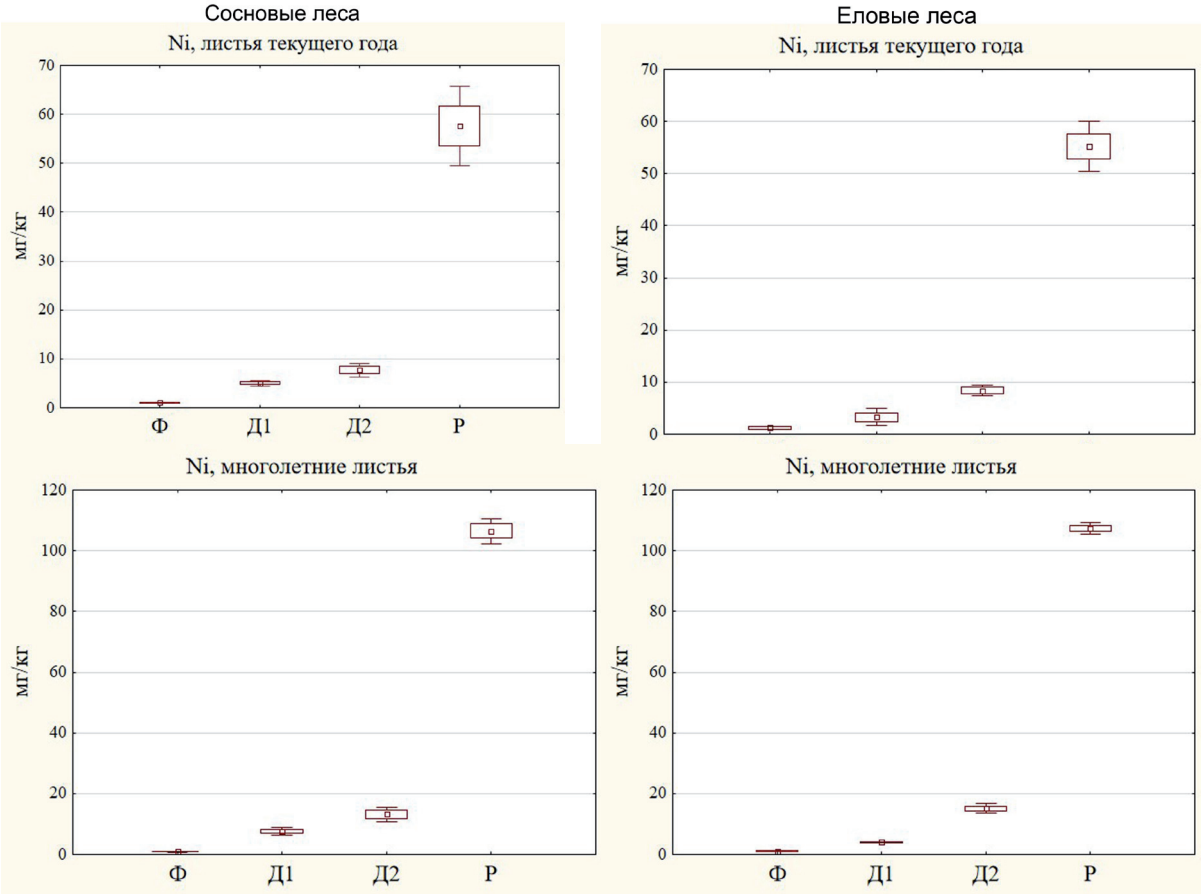
	Сосновые леса				Еловые леса			
	Брусника, листья:		Вороника, листья:		Брусника, листья:		Вороника, листья:	
	текущие	многолет.	текущие	многолет.	текущие	многолет.	текущие	многолет.
C, %	51.7 ± 1.0^{Ф} 54.7 ± 0.8^{Д1} 55.6 ± 1.5^{Д2} 51.3 ± 0.5^{Р}	51.5 ± 0.1 55.1 ± 3.3 54.9 ± 0.7 49.5 ± 1.6	59.6 ± 2.7 60.7 ± 0.6 59.1 ± 0.1 57.1 ± 1.1	58.5 ± 0.3 59.8 ± 1.7 59.0 ± 2.1 56.4 ± 1.2	50.4 ± 1.1 53.0 ± 1.4 57.2 ± 1.3 56.0 ± 2.8	51.0 ± 0.2 52.4 ± 0.9 53.0 ± 1.8 50.9 ± 1.6	62.7 ± 1.9 61.1 ± 1.1 60.3 ± 1.3 57.0 ± 1.5	57.4 ± 1.9 59.9 ± 1.4 56.4 ± 1.1 57.4 ± 1.4
N, г/кг	10.6 ± 0.1 9.5 ± 0.1 10.6 ± 0.3 7.5 ± 0.9	7.1 ± 0.1 7.6 ± 0.1 7.0 ± 0.0 5.2 ± 0.2	14.0 ± 0.3 12.4 ± 0.4 11.9 ± 0.4 10.5 ± 0.2	8.4 ± 0.3 6.8 ± 0.2 6.5 ± 0.3 5.8 ± 0.1	16.8 ± 2.5 10.1 ± 0.1 9.7 ± 0.1 13.0 ± 1.6	13.5 ± 1.9 6.7 ± 0.1 7.2 ± 0.1 6.4 ± 1.6	14.5 ± 0.7 13.3 ± 0.1 11.8 ± 0.3 10.9 ± 0.1	8.5 ± 0.4 6.5 ± 0.1 7.3 ± 0.2 6.6 ± 0.4
K, г/кг	5.1 ± 0.3 4.6 ± 0.3 4.9 ± 0.2 3.6 ± 0.1	3.5 ± 0.3 3.5 ± 0.3 2.8 ± 0.1 2.7 ± 0.1	6.6 ± 0.1 7.3 ± 0.1 6.2 ± 0.3 6.3 ± 0.1	3.8 ± 0.3 3.8 ± 0.1 3.7 ± 0.2 4.8 ± 0.3	5.6 ± 0.1 5.0 ± 0.3 4.8 ± 0.1 4.7 ± 0.2	4.2 ± 0.1 3.4 ± 0.3 3.3 ± 0.4 2.9 ± 0.2	5.6 ± 0.1 6.0 ± 0.3 5.7 ± 0.1 6.9 ± 0.6	2.8 ± 0.3 3.8 ± 0.1 3.7 ± 0.2 4.8 ± 0.3
Ca, г/кг	6.3 ± 0.3 5.0 ± 0.2 5.9 ± 0.3 5.5 ± 0.4	8.3 ± 0.3 8.6 ± 0.3 8.0 ± 0.2 7.9 ± 0.2	5.1 ± 0.4 7.1 ± 0.1 5.1 ± 0.6 4.7 ± 0.2	8.8 ± 0.2 12.8 ± 0.1 8.2 ± 0.4 7.5 ± 0.7	5.0 ± 0.1 5.4 ± 0.3 4.6 ± 0.1 4.8 ± 0.3	6.4 ± 0.2 6.7 ± 0.2 7.8 ± 0.1 8.4 ± 0.5	5.1 ± 0.3 5.0 ± 0.3 4.9 ± 0.0 4.2 ± 0.8	9.5 ± 0.2 8.6 ± 0.2 8.2 ± 0.1 4.8 ± 0.7
Mg, г/кг	1.4 ± 0.1 1.3 ± 0.0 1.3 ± 0.0 1.0 ± 0.0	1.2 ± 0.1 1.4 ± 0.0 1.1 ± 0.0 1.0 ± 0.1	1.9 ± 0.1 1.7 ± 0.1 1.2 ± 0.0 1.0 ± 0.0	2.6 ± 0.1 2.2 ± 0.0 1.5 ± 0.0 1.3 ± 0.1	1.7 ± 0.1 1.8 ± 0.1 1.3 ± 0.0 1.0 ± 0.0	1.6 ± 0.2 1.4 ± 0.0 1.1 ± 0.0 1.1 ± 0.1	1.5 ± 0.1 2.0 ± 0.1 1.3 ± 0.1 1.1 ± 0.1	2.3 ± 0.2 3.0 ± 0.1 1.7 ± 0.2 1.1 ± 0.1
P, г/кг	1.1 ± 0.0 1.1 ± 0.0 1.3 ± 0.0 0.7 ± 0.0	0.6 ± 0.0 0.7 ± 0.0 0.8 ± 0.0 0.5 ± 0.0	1.6 ± 0.0 1.3 ± 0.0 1.3 ± 0.0 1.3 ± 0.0	1.1 ± 0.0 0.8 ± 0.0 1.0 ± 0.1 0.8 ± 0.1	1.5 ± 0.1 1.2 ± 0.1 1.1 ± 0.0 0.8 ± 0.0	1.1 ± 0.1 0.6 ± 0.0 0.7 ± 0.0 0.5 ± 0.0	1.5 ± 0.1 1.2 ± 0.1 1.1 ± 0.0 0.8 ± 0.0	1.4 ± 0.0 1.4 ± 0.1 1.3 ± 0.0 0.9 ± 0.1
Mn, г/кг	1.7 ± 0.0 0.8 ± 0.1 1.1 ± 0.0 0.8 ± 0.1	2.3 ± 0.0 1.6 ± 0.0 1.6 ± 0.1 1.2 ± 0.1	0.3 ± 0.0 0.4 ± 0.0 0.2 ± 0.0 0.1 ± 0.1	0.8 ± 0.0 0.8 ± 0.0 0.6 ± 0.0 0.2 ± 0.0	1.4 ± 0.2 0.9 ± 0.2 1.3 ± 0.1 0.6 ± 0.1	2.4 ± 0.1 1.7 ± 0.1 2.6 ± 0.1 0.7 ± 0.0	0.6 ± 0.0 0.4 ± 0.0 0.4 ± 0.0 0.04 ± 0.00	1.8 ± 0.1 0.9 ± 0.0 0.9 ± 0.0 0.06 ± 0.00
S, г/кг	1.1 ± 0.0 1.1 ± 0.0 1.3 ± 0.0 0.7 ± 0.0	0.6 ± 0.0 0.7 ± 0.0 0.8 ± 0.1 0.5 ± 0.0	1.5 ± 0.1 1.3 ± 0.1 1.1 ± 0.1 0.8 ± 0.1	1.1 ± 0.1 1.1 ± 0.0 1.0 ± 0.1 0.7 ± 0.2	1.1 ± 0.0 2.0 ± 0.2 1.8 ± 0.0 1.6 ± 0.1	1.8 ± 0.1 2.7 ± 0.1 3.5 ± 0.8 3.9 ± 0.3	1.9 ± 0.1 1.8 ± 0.2 1.2 ± 0.0 1.2 ± 0.0	1.7 ± 0.1 1.3 ± 0.2 1.3 ± 0.0 0.9 ± 0.0
Zn, мг/кг	24.8 ± 0.5 15.8 ± 0.5 15.5 ± 1.2 17.2 ± 0.2	32.7 ± 2.3 24.5 ± 0.7 20.0 ± 1.0 20.4 ± 3.0	18.0 ± 1.4 10.9 ± 0.5 10.8 ± 0.1 8.5 ± 0.3	16.5 ± 0.5 8.8 ± 0.3 10.4 ± 0.3 6.5 ± 0.9	26.9 ± 2.4 19.8 ± 2.5 15.9 ± 0.5 14.9 ± 1.9	33.6 ± 3.2 29.1 ± 1.3 22.3 ± 1.1 12.6 ± 2.1	15.1 ± 0.7 12.1 ± 0.4 9.3 ± 0.3 3.7 ± 0.7	16.3 ± 1.0 9.8 ± 0.3 7.1 ± 0.6 2.5 ± 0.5
Fe, мг/кг	20.9 ± 1.4 27.2 ± 1.8 27.7 ± 1.1 38.9 ± 0.2	23.1 ± 0.4 36.1 ± 1.3 30.6 ± 1.4 56.4 ± 7.9	50.5 ± 1.3 38.6 ± 2.5 35.6 ± 5.6 40.3 ± 1.9	72.0 ± 0.5 61.3 ± 4.1 47.3 ± 1.1 95.8 ± 4.2	38.0 ± 1.6 31.3 ± 4.7 26.5 ± 3.3 34.0 ± 1.9	48.4 ± 1.2 39.7 ± 3.5 40.4 ± 1.9 46.5 ± 1.1	47.1 ± 1.7 42.0 ± 0.6 35.2 ± 2.2 52.5 ± 0.7	67.4 ± 3.1 71.0 ± 2.1 48.9 ± 2.4 117.0 ± 7.2
Al, мг/кг	58.2 ± 1.2 79.0 ± 4.2 67.2 ± 7.9 112.3 ± 9.1	109.0 ± 1.0 182.0 ± 1.1 145.6 ± 9.3 191.2 ± 9.8	55.3 ± 3.2 49.4 ± 1.7 44.1 ± 1.6 43.2 ± 3.6	99.0 ± 5.4 119.50 ± 1.8 89.0 ± 1.7 113.8 ± 6.2	86.5 ± 2.3 54.8 ± 9.4 74.8 ± 0.6 86.5 ± 9.1	158.9 ± 11.1 132.2 ± 12.6 180.4 ± 2.7 125.4 ± 8.3	39.6 ± 0.6 29.9 ± 0.5 20.8 ± 4.1 25.8 ± 2.7	81.3 ± 3.8 75.7 ± 2.6 62.3 ± 2.8 66.1 ± 4.7
Cu, мг/кг	6.0 ± 0.2 4.8 ± 0.1 5.2 ± 0.3 13.4 ± 0.8	3.4 ± 0.2 4.7 ± 0.1 5.3 ± 0.2 16.5 ± 0.7	7.3 ± 0.1 7.0 ± 0.3 5.6 ± 0.1 15.7 ± 0.2	6.1 ± 0.6 6.3 ± 0.3 8.0 ± 0.2 51.5 ± 2.7	5.8 ± 0.7 4.8 ± 0.8 5.5 ± 0.2 12.2 ± 0.6	4.4 ± 0.1 4.7 ± 0.2 5.5 ± 0.3 55.1 ± 3.1	6.7 ± 0.3 7.1 ± 0.4 5.3 ± 0.1 26.6 ± 1.7	3.5 ± 0.4 5.9 ± 0.5 8.1 ± 1.1 51.2 ± 5.1

Примечание. Приведены средние значения (±стандартная ошибка). Здесь и на рис. 1, 2: Ф – фон, Д1 – дефолиирующие сосновые и еловые леса – 48 км и 62 км от источника загрязнения соответственно, Д2 – дефолиирующие сосновые и еловые леса – 31 км (Лапландский заповедник), Р – техногенные сосновые и еловые редколесья (10 и 7 км).

Дефолиирующие леса. На данной стадии дигрессии сохраняются возрастные особенности распределения N и K, максимальное содержание которых наблюдается в листьях текущего года, а также Ca, Mn, Fe, Al, накапливающихся в многолетних листьях ($p < 0.05$). Природные особенности распределения Cu по возрастным классам листьев кустарничков в дефолиирующих лесах нарушаются: концентрации в листьях текущего года и многолетних становятся либо сопоставимыми (брусника), либо возрастают в многолетних листьях (вороника, ППН на расстоянии 31 км от комбината).

В листьях брусники дефолиирующих лесов отмечено более высокое содержание углерода по сравнению с фоновой территорией. В еловых лесах на данной стадии дигрессии происходит достоверное ($p < 0.05$) снижение в листьях брусники макроэлементов – N, P, Mg (в лесах на расстоянии 31 км) и возрастание S. Уменьшение содержания цинка в листьях брусники отмечено как в еловых, так и в сосновых лесах. В ассимилирующих органах брусники сосновых лесов наблюдается увеличение Fe и Al ($p < 0.05$). В дефолиирующих лесах в многолетних листьях брусники выявлено возрастание концентрации меди по сравнению с фоном. Листья брусники аккумулируют Ni: в сосновых дефолиирующих лесах концентрации возрастают до 18 раз, в еловых – до 14 раз относительно фоновых значений, при этом в многолетних листьях накопление происходит более интенсивно (рис. 1).

В листьях вороники дефолиирующих лесов концентрации углерода сопоставимы с фоновыми значениями, N, Mn, Zn – снижаются ($p < 0.05$). Достоверное снижение P наблюдается только в листьях текущего года. В сосновых и еловых дефолиирующих лесах (31 км от комбината) содержание



Примечание. Здесь и на рисунке 2 – □ – среднее значение, ┌┐ – стандартная ошибка, ┬ – стандартное отклонение.

Рис. 1. Концентрация Ni в листьях *Vaccinium vitis-idaea* на разных стадиях техногенной дигрессии северотаежных лесов.

Fig. 1. Concentration of Ni in the leaves of *Vaccinium vitis-idaea* at different stages of pollution-induced digression of north taiga forests.

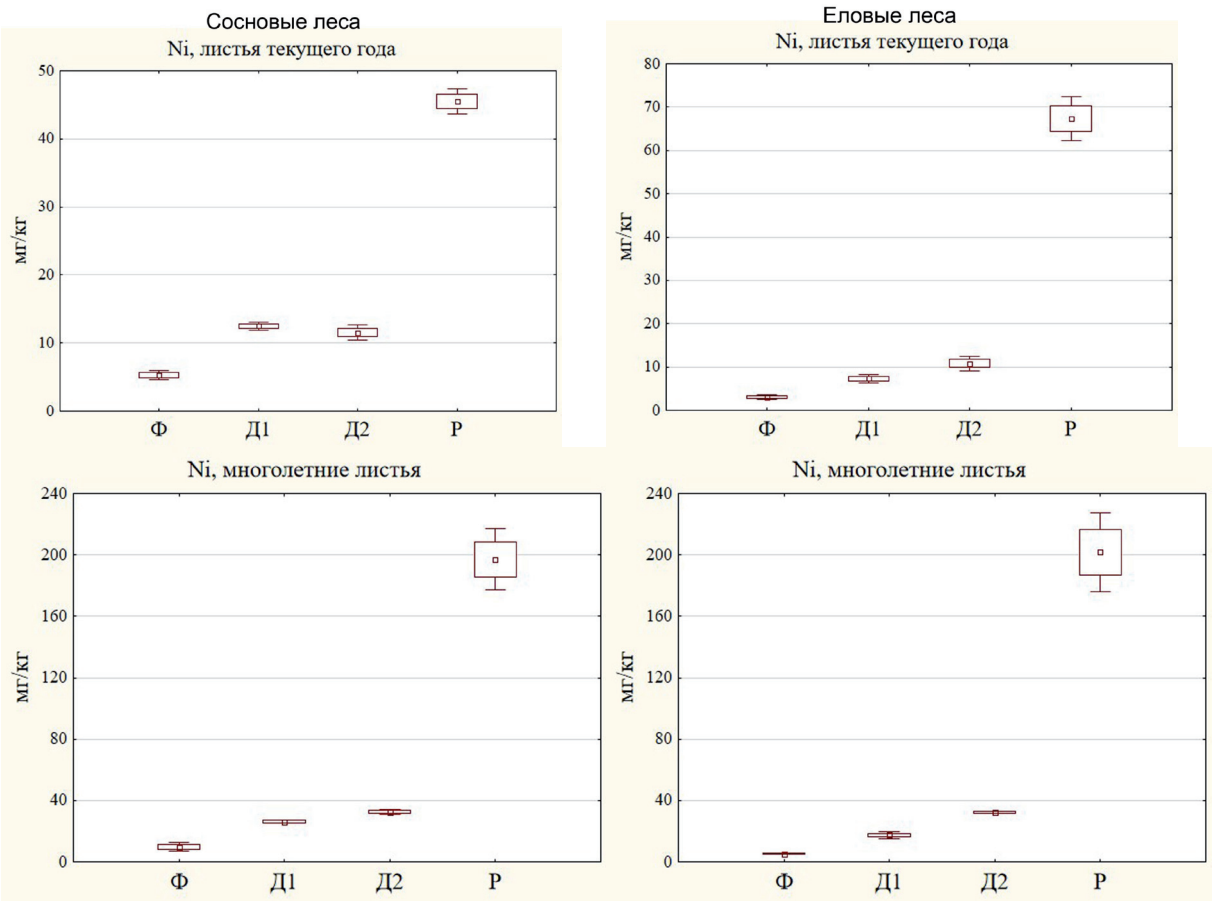


Рис. 2. Концентрация Ni в листьях *Empetrum hermaphroditum* на разных стадиях техногенной дигрессии северотаежных лесов.

Fig. 2. Concentration of Ni in leaves of *Empetrum hermaphroditum* at different stages of pollution-induced digression of north taiga forests.

меди увеличивается в многолетних листьях вороники и снижается в листьях текущего года. Содержание Ni в листьях вороники в сосновых дефолиирующих лесах в 3–4 раза выше фоновых показателей, в еловых дефолиирующих лесах – в 4–6 раза (рис. 2).

Техногенные редколесья. Возрастные особенности распределения N, K, Fe, Al в листьях вороники и брусники сохраняются. Содержание Mn в листьях разного возраста у кустарничков достоверно не изменяется. В еловом редколесье в ассимилирующих органах вороники не обнаружено возрастных различий в накоплении Ca и P. На данной стадии дигрессии у кустарничков нарушаются природные особенности распределения Cu в зависимости от возраста листьев.

В еловом и сосновом редколесьях в листьях брусники снижаются концентрации N, K, P, Mg ($p < 0.05$). Существенное уменьшение характерно для марганца и цинка – в 1.5–3 раза относительно фоновых значений, особенно выражены изменения в многолетних листьях брусники еловых редколесий. В сосновом редколесье в листьях брусники возрастают концентрации Cu, Ni, Al и Fe, еловом – Cu, Ni, S. Концентрации Ni в листьях брусники в сосновых дефолиирующих лесах в 60–130 раз выше фоновых показателей, в еловых дефолиирующих лесах – в 40–80 раз.

Листья вороники техногенных редколесий характеризуются низким содержанием N, P, Mg, Zn ($p < 0.05$). Ассимилирующие органы вороники заметно обедняются Mn, концентрации которого в 3–4 раза (сосновые редколесья) и 15-30 раз(еловые редколесья) ниже фоновых значений. Из тяжёлых металлов на данной стадии дигрессии листья текущего года вороники накапливают Cu, Ni, многолетние– Cu, Ni, Fe. Концентрации Ni в листьях вороники сосновых редколесий возрастают в 10–20 раз, в еловых – в 20–40 раз.

Заключение

Полученные результаты показывают, что на содержание элементов в листьях дикорастущих вечнозеленых кустарничков существенное влияние оказывает тип растительного сообщества, видовые особенности, возраст ассимилирующих органов, а также уровень атмосферного загрязнения. В процессе техногенной дигрессии хвойных лесов ассимилирующие органы кустарничков обедняются элементами питания –N, K, P, Mg, Mn, Zn. В условиях атмосферного загрязнения нарушаются природные возрастные особенности формирования элементного состава листьев. В листьях вороники и брусники дефолиирующих лесов и редколесий существенно возрастает содержание тяжёлых металлов, особенно никеля. Максимальные концентрации Ni выявлены в многолетних листьях *Empetrum hermaphroditum* техногенных редколесий. При оценке состояния дикорастущих кустарничков на техногенно нарушенных территориях необходимо учитывать возрастную и биогеоценотическую изменчивость элементного состава растений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИППЭС КНЦ РАН № 1021051803679-9.

Литература

1. Ершов В.В., Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г., Смирнов В.Э., Горбачева Т.Т. Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината // Сибирский экологический журнал. 2019. № 1. С. 119–132. https://doi.org/10.15372/SEJ20190110.
2. Сухарева Т.А., Ершов В.В., Исаева Л.Г., Шкондин М.А.Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения промышленных выбросов комбинатом «Североникель» // Цветные металлы. 2020. № 8. С. 33–41. https://doi.org/10.17580/tsm.2020.08.05.