

УДК 581.13 : 669.018.674(470.21)

Динамика содержания тяжёлых металлов в ассимилирующих органах растений локальной зоны воздействия комбината "Североникель"

Н.В. Салтан

Полярно-альпийский ботанический сад-институт
им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН

Аннотация. В статье представлен анализ многолетней динамики содержания тяжёлых металлов в ассимилирующих органах растений локальной зоны комбината "Североникель". Показано, что данная динамика не зависит от изменений, происходящих в атмосферных осадках и почве, и является индивидуальной для каждого вида растений, каждой площадки и элемента.

Abstract. The analysis of multi-year dynamics of heavy metals content in assimilating organs of plants from the impact zone of Severonickel has been presented in the paper. It has been shown that the dynamics does not depend on changes taking place in atmospheric precipitations or soils. It is individual for each plant species, for each monitoring plot, and for each element.

Ключевые слова: мониторинг, тяжёлые металлы, ассимилирующие органы растений, локальная зона комбината "Североникель"
Key words: monitoring, heavy metals, assimilating organs of plants, the Severonickel industrial complex

1. Введение

Проблемы питательного режима лесов и изменения химического состава растительности в зависимости от высокого уровня загрязнения, обусловленного деятельностью комбината "Североникель", изучались многими исследователями (*Лесные экосистемы...*, 1990; *Брускина, Карабань*, 1992; *Лукина, Никонов*, 1996; *Черненкова*, 2002). В результате этих исследований были выявлены значительная аккумуляция элементов-загрязнителей (Ni, Cu) в фотосинтезирующих органах растений, прежде всего в период наивысших объёмов выбросов (1980-1990 гг.), и уменьшение в листьях растений важных элементов питания (кальция, магния, марганца, цинка) в условиях аэротехногенного загрязнения.

За последние двадцать лет выбросы загрязняющих веществ комбинатом значительно сократились (*Доклад...*, 2012), но, несмотря на это, концентрации металлов в атмосферных осадках, особенно в снежном покрове, остаются экстремально высокими (*Кашулина, Салтан*, 2008). Кроме того, за время деятельности комбината в почвах аккумуляровалось значительное количество металлов. Однако анализ результатов комплексных исследований химического состава растений в локальной зоне воздействия комбината "Североникель" за 2002, 2005-2007 гг. (*Кашулина, Салтан*, 2008) показал, что даже в экстремальных условиях локальной зоны потребление элементов растениями в соответствии с видовыми особенностями преимущественно сохранено.

Целью данной статьи является анализ изменений и степени варьирования содержания основных (Ni, Cu) и сопутствующих (Mn, Zn) элементов-загрязнителей в ассимилирующих органах растений локальной зоны в течение длительного периода времени (2002-2011 гг.).

2. Материалы и методы

Полярно-альпийским ботаническим садом-институтом им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН совместно с ОАО "Кольский геологический информационно-лабораторный центр" (КГИЛЦ) проведены комплексные экологические исследования в локальной зоне комбината "Североникель" (радиусом 20 км) в течение 2002-2011 гг. В качестве объектов выбраны четыре малых водосбора, расположенные:

- водосбор I – на расстоянии 17 км ССВ от комбината (самый удалённый и наименее загрязнённый);
- водосбор II – 8 км ССВ от комбината (второй по уровню загрязнения, характеризующийся значительным повреждением экосистем);
- водосбор IV – северо-западнее комбината на расстоянии 4 км (самый загрязнённый, с полным повреждением экосистем – техногенная пустошь);

– водосбор V – 1,5 км ВСВ от комбината (третий по уровню загрязнения, с умеренным повреждением экосистем).

На указанных водосборах в 2001 г. заложены три стационарные площадки, предназначенные для почвенно-геоботанического мониторинга и представляющие все основные типы элементарных ландшафтов.

В конце каждого вегетационного сезона на стационарных площадках отобраны смешанные образцы листьев наиболее широко представленных в локальной зоне сосудистых растений: берёзы (*Betula pubescens*), ивы (*Salix ssp.*), сосны (*Pinus friesiana*), ели (*Picea obovata*), брусники (*Vaccinium vitis-idaea*), вороники (*Empetrum hermaphroditum*). В статье приведены данные для стационарных площадок I-2, II-2, IV-2 и V-3.

На открытых местах исследуемых водосборов (кроме IV) оборудованы площадки по отбору проб дождевых вод, который проводился в течение девяти лет: осенний период 2001 г., летне-осенние периоды 2002, 2005-2011 гг. Опробование снежного покрова произведено в конце марта – начале апреля 2005-2011 гг. непосредственно на площадках почвенно-геоботанического мониторинга и на территории метеостанции г. Мончегорска.

В 2002, 2005-2011 гг. отобраны пробы верхнего трёхсантиметрового слоя органогенного горизонта почв, т.к. именно в этом слое аккумулируется основная масса металлов аэротехногенного происхождения (Кацулина, 2002).

Содержание микроэлементов (Ni, Cu, Zn, Mn) в образцах растений (перед анализом растения не отмывались) установлено в аккредитованной лаборатории ОАО "КГИЛЦ" атомно-абсорбционным методом после их разложения концентрированной азотной кислотой. В фильтрах и растворах снеговых и дождевых вод, полученных от разложения твёрдого остатка на фильтре, определялись микрокомпоненты (Ni, Cu, Zn, Mn) методом атомной абсорбционной спектрометрии (ААС).

Содержание тяжёлых металлов (Ni, Cu, Zn, Mn) в почвах выявлено методом ААС после разложения воздушно-сухой пробы концентрированной азотной кислотой.

Подробное описание стационарных площадок, методики полевых работ и химических анализов приведено в работе (Кацулина, Салтан, 2008).

3. Результаты исследований

Химический состав растений зависит от влияния целого комплекса факторов, которые могут быть условно объединены в три группы: биохимические факторы, определяемые преимущественно биологическими особенностями конкретного вида организмов, их возрастом, фазой развития, частью растения; ландшафтно-геохимические факторы, связанные с условиями обитания растений; кристаллохимические факторы, определяемые свойствами ионов, входящих в состав растений (Алексеевко, 2001).

Никель и медь

Никель и медь являются главными элементами-загрязнителями, входящими в состав выбросов комбината "Североникель". Они ассоциируются с крупными частицами выбросов (Берлянд, 1985) и выпадают преимущественно в локальной зоне комбината.

При сравнении содержания металлов-загрязнителей Ni и Cu в рассматриваемых видах растений, произрастающих как в локальной зоне, так и в фоновых условиях, было отмечено, что наиболее высокое его значение характерно для листьев *ивы* и *берёзы*; в *воронике* оно выше только на самых загрязнённых площадках: II-2 (по меди) и IV-2 (по никелю). Максимальное содержание Ni в листьях *ивы* и *берёзы* на большинстве площадок наблюдалось в 2006 и 2008 гг. Минимальные значения Ni в листьях *берёзы* на большинстве площадок отмечены в 2007 г., в листьях *ивы* – в 2011 г. (рис. 1). Сравнение величины варьирования (отношение максимального содержания металла к минимальному) показало, что наибольшее варьирование содержания Ni свойственно листьям *ивы* (табл. 1).

Содержание меди в листьях растений локальной зоны было ниже, чем никеля (рис. 2). Характер многолетнего распределения содержания меди в листьях *берёзы* имел сходство с характером распределения никеля только на площадках II-1, II-2, IV-2, в листьях *ивы* – на площадках I-1, II-1, II-2 (рис. 1-2). Наиболее высокие значения содержания меди в листьях *берёзы* на большинстве площадок были отмечены в 2008 г., а наиболее низкие – в 2010-2011 гг. В листьях *ивы* высокие концентрации меди наблюдались на разных площадках в различные годы, а самые низкие на большинстве площадок пришлось на 2011 г. Величина варьирования содержания меди в листьях *берёзы* и *ивы* в многолетней динамике была выше, чем у никеля, особенно в листьях *ивы* (табл. 1).

Ответной положительной реакцией на снижение выбросов никеля и меди в листьях *берёзы* и *ивы* не наблюдалось.

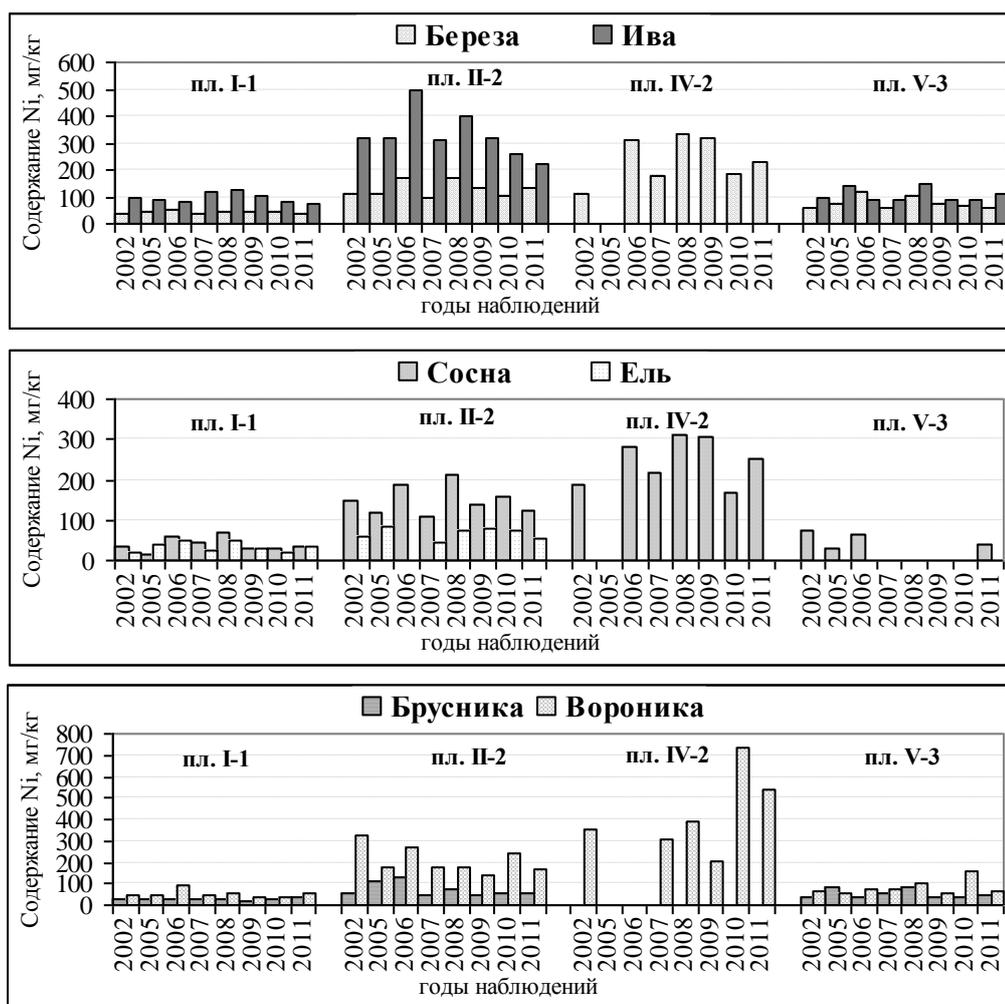


Рис. 1. Многолетняя динамика содержания Ni (мг/кг) в листьях растений, произрастающих на стационарных площадках

Таблица 1. Варьирование содержания металлов в листьях растений, произрастающих на стационарных площадках, за период 2002-2011 гг.

Вид растения	Номер площадки															
	I-1				II-2				IV-2				V-3			
	Макс./мин.															
	Ni	Cu	Zn	Mn	Ni	Cu	Zn	Mn	Ni	Cu	Zn	Mn	Ni	Cu	Zn	Mn
Берёза	1,4	2,3	2,6	2,4	1,8	1,8	2,0	4,1	2,9	2,5	3,5	4,1	2,1	2,6	2,5	2,3
Ива	1,7	4,3	2,8	2,4	2,3	3,2	6,0	3,4	—	—	—	—	1,7	2,0	2,8	2,7
Сосна	4,0	3,4	5,1	2,2	2,0	5,8	4,7	3,5	1,9	2,2	3,7	2	2,4	2,9	1,5	2,6
Ель	2,4	5,7	5,8	3,2	1,8	3,2	4,2	3,9	—	—	—	—	—	—	—	—
Вороника	2,5	2,4	6,4	4,3	2,4	3,6	4,7	3,6	3,6	2,1	4,0	5,4	2,7	4,2	3,4	1,7
Брусника	2,2	5,1	2,6	2,1	2,6	5,5	2,3	3	—	—	—	—	2,6	3,0	2,3	2,2

Хвойные деревья (ель и сосна), находящиеся в локальной зоне, по содержанию никеля и меди в хвое существенно различаются (рис. 1-2), тогда как в фоновых условиях они имеют довольно близкие значения этого показателя (табл. 2). Так, для сосны характерно более высокое содержание Ni и Cu, чем для ели. Следует отметить, что ель представлена на небольшом количестве площадок, тогда как сосна более распространена в локальной зоне. Однако на площадках водосбора II (с высоким уровнем загрязнения) в хвое ели содержание Ni и Cu гораздо ниже, чем в хвое сосны.

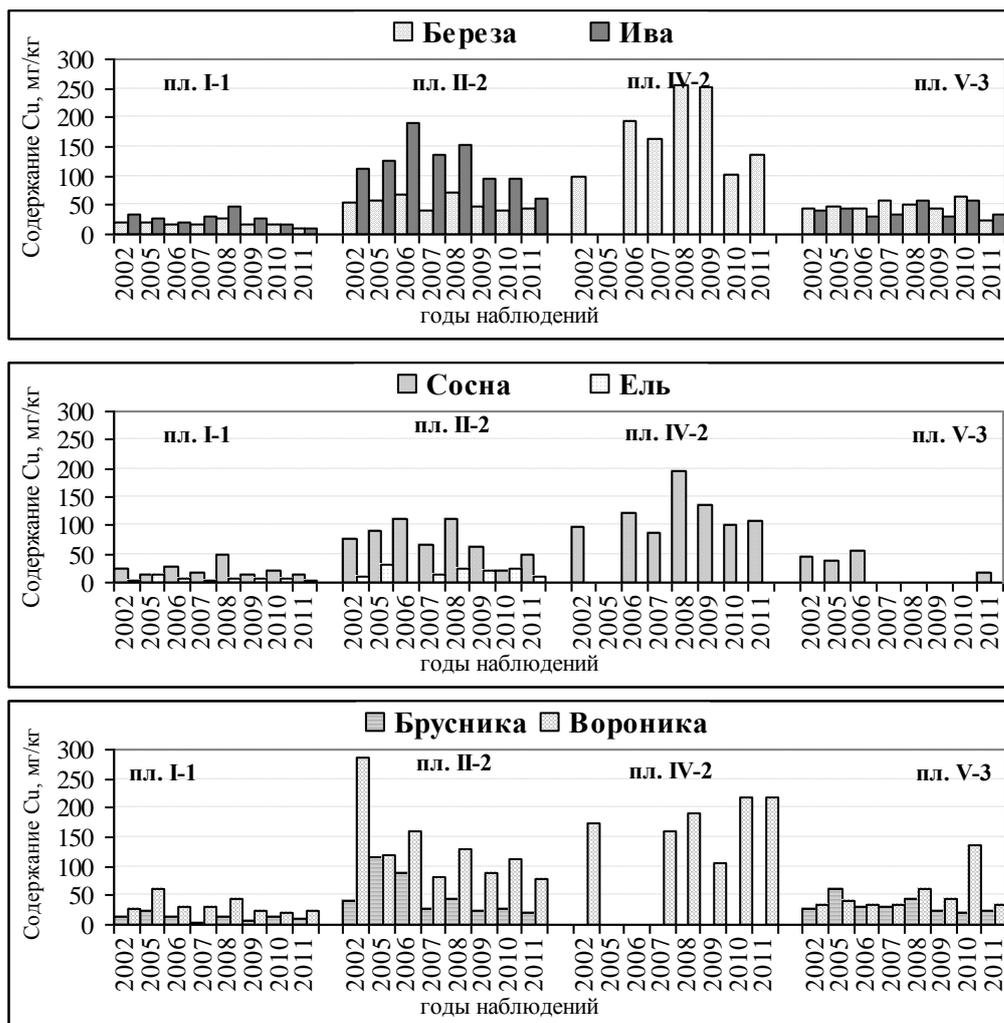


Рис. 2. Многолетняя динамика содержания Cu (мг/кг) в листьях растений, произрастающих на стационарных площадках

В хвое сосны максимальное содержание меди и никеля на всех площадках отмечено в 2008 г., минимальные значения по никелю выявлены на большинстве площадок в 2005 и 2007 гг., по меди – в 2011 г. В хвое ели наибольшее содержание никеля определено в 2008 г.; меди – в 2005 г. на площадках I-1 и II-2, в 2006 г. – на остальных площадках. Наименее высокое содержание никеля в хвое ели выявлено преимущественно в 2002 г., меди – в 2007 и 2011 гг.

Величина варьирования содержания никеля и меди у хвойных деревьев выше, чем у лиственных. Высокие значения варьирования отмечены как на самых загрязнённых, так и на малозагрязнённых площадках (табл. 1).

Среди опробованных *вечнозеленых кустарничков* высоким содержанием Ni и Cu выделяется вороника. В её листьях концентрация этих элементов иногда даже выше, чем в листьях берёзы и ивы (рис. 2). В работе (Кашулина, Салтан, 2008) выдвинуто предположение о том, что вороника из-за сильной степени угнетения утрачивает контроль над поступлением элементов. В фоновых условиях в листьях вороники также содержание никеля и меди выше, чем у хвойных деревьев и брусники (табл. 2).

Многолетняя динамика содержания никеля и меди в листьях вороники и брусники была различной. В большинстве случаев для брусники и вороники минимумы содержания никеля и меди пришлось на 2009 г., максимумы отмечены в разные годы на различных площадках. Несмотря на существенное снижение количества выбросов комбинатом "Североникель", в листьях кустарничков не наблюдалось снижения содержания меди и никеля.

Варьирование содержания никеля и меди в листьях кустарничков отмечалось в том же диапазоне, что и у хвойных деревьев (табл. 1). Наибольшая величина варьирования содержания никеля в

листьях вороники выявлена на площадке IV-2 (брусника на этой площадке отсутствует), на остальных площадках она мало отличалась от концентрации никеля в листьях брусники (табл. 1).

Таким образом, анализ данных многолетних наблюдений показал, что в локальной зоне высокий уровень загрязнения окружающей среды существенно сказался на содержании никеля и меди в ассимилирующих органах вороники и сосны. Потребление Ni и Cu в листьях растений, находящихся в локальной зоне, обусловлено преимущественно биологическими особенностями вида, только в больших количествах, чем в естественных условиях.

Анализ варьирования содержания металлов-загрязнителей показал, что среди исследованных видов растений наибольшим варьированием содержания никеля в ассимилирующих органах выделяются сосна и вороника, меди – сосна и ель. При этом величина варьирования не зависит от уровня загрязнения исследуемой площадки.

Цинк и марганец

Цинк и марганец являются сопутствующими элементами-загрязнителями, входящими в состав выбросов комбината "Североникель". Согласно данным химического анализа снеговых и дождевых вод за 2001-2007 гг. концентрации цинка и марганца превышают аналогичные в фоновых условиях в десятки раз (Капулина, Салтан, 2008).

Среди изученных видов растений наиболее высоким содержанием Zn выделяются берёза (прежде всего на менее загрязнённых площадках I-1 и V-3) и ива, что характерно для берёзы и ивы, растущих в естественных незагрязнённых условиях (рис. 3, табл. 2). Результаты многолетних наблюдений продемонстрировали различную динамику содержания цинка в листьях берёзы и ивы, находящихся на стационарных площадках. Следует отметить, что с 2007 г. в листьях берёзы на площадках I-1 и V-3 концентрация цинка постепенно снижалась (рис. 3). Величина варьирования содержания Zn в листьях ивы более высокая (особенно на площадке II-2 со значительным уровнем загрязнения), чем в берёзе (табл. 1).

В локальной зоне содержание марганца в листьях берёзы преимущественно выше, чем в листьях ивы, и уступает концентрации Mn в бруснике, тогда как в фоновых условиях листья берёзы занимают лидирующее положение по этому элементу, а листья ивы характеризуются самыми низкими фоновыми значениями содержания марганца (табл. 2). Согласно данным наблюдений многолетней динамики в берёзе и иве самое высокое содержание Mn зафиксировано на большинстве площадок в 2008 г., минимальные же концентрации в листьях берёзы отмечены преимущественно в 2005 и 2010 гг., ивы – в разные годы наблюдений (рис. 4).

Соотношения максимального содержания к минимальному показали, что содержание марганца было наиболее варьиремым в листьях берёзы и ивы, произрастающих на самых загрязнённых площадках (табл. 1).

По содержанию цинка хвоя ели и сосны уступает листовым деревьям как в локальной зоне, так и в фоновых условиях; при этом содержание Zn в хвое ели и сосны практически одинаковое (рис. 3, табл. 2). В ряду многолетних наблюдений выявлено сходство хвойных по распределению максимальных величин содержания цинка: у ели и сосны максимумы содержания цинка на большинстве площадок отмечены в 2002 г.; минимумы пришлись на разные годы наблюдений. Также у хвойных деревьев выявлено более высокое варьирование концентрации цинка относительно берёзы и ивы, при этом величина варьирования не зависела от уровня загрязнения площадки (табл. 1).

Содержание марганца в хвое ели и сосны находилось на более низком уровне, чем в листьях берёзы, что характерно и для фоновых территорий. На менее загрязнённой площадке I-1 содержание Mn было выше в хвое ели, а на более загрязнённой площадке II-2 – в хвое сосны, тогда как в фоновых условиях содержание марганца в хвое ели значительно выше, чем в сосне (табл. 2). Максимальные содержания марганца в хвое ели на всех площадках выявлены в 2008 г., минимальные – в 2010 г. В хвое сосны распределение максимальных и минимальных величин содержания Mn на площадках было различным (рис. 4). Величина варьирования содержания марганца была более высокой в хвое ели, чем в хвое сосны. При этом на площадке II-2 (как у листовых) оно было максимальным и у ели, и у сосны.

В листьях кустарничков локальной зоны (как и в фоновых условиях) содержание цинка ниже, чем в ассимилирующих органах деревьев (листопадных и хвойных). При этом в воронике обнаружено наиболее низкое содержание цинка, особенно на самой загрязнённой площадке IV-2 (рис. 3). Согласно результатам многолетних наблюдений в листьях кустарничков, подобно хвойным, наивысшие концентрации цинка выявлены на большинстве площадок в 2002 г., а самые низкие зафиксированы в разные годы. Следует отметить, что в 2011 г. на большинстве площадок содержание цинка в листьях вороники и брусники выросло по сравнению с предыдущими двумя годами (2009-2010 гг.). Наиболее высокое варьирование содержания цинка было свойственно листьям вороники, прежде всего на менее загрязнённой площадке I-1 (табл. 1).

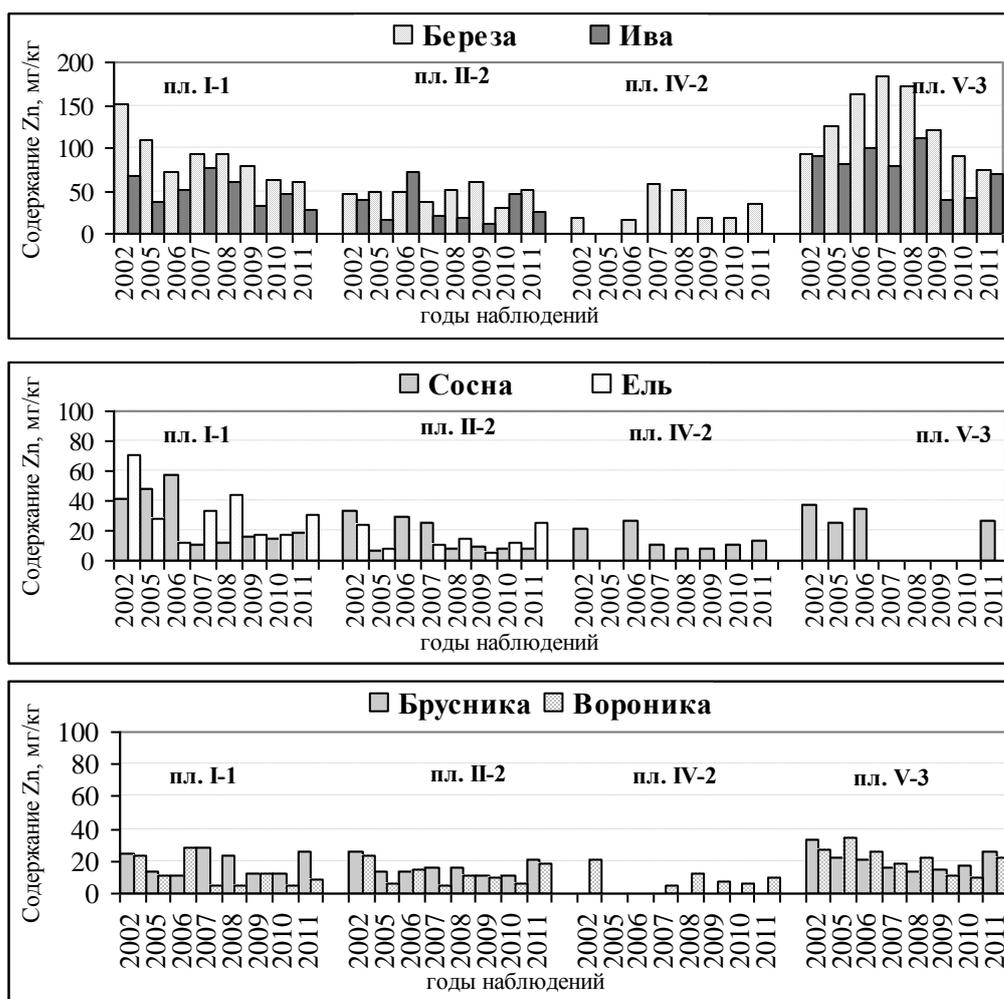


Рис. 3. Многолетняя динамика содержания Zn (мг/кг) в листьях растений на стационарных площадках

Содержание марганца в листьях брусники, произрастающей в локальной зоне, было самым высоким по сравнению со всеми опробованными видами растений. Многие исследователи указывают на интенсивную аккумуляцию марганца видами рода *Vaccinium* (Левина, 1969; Манаков, 1961; Раменская, 1974; Парибок, 1983). По мнению Т.А. Парибок, сравнительно большое накопление Mn кустарничками в подзоне северной тайги связано с его большой доступностью в условиях кислой реакции почв. В листьях вороники содержание Mn значительно ниже. Многолетняя динамика изменения содержания марганца в листьях брусники и вороники была неодинаковой (рис. 4). Содержание Mn было максимальным на большинстве площадок в листьях брусники и вороники в 2005 и 2008 гг., а минимальным – в 2007 и 2010-2011 гг. Наибольшее варьирование содержания Mn было характерно для вороники, причём независимо от уровня загрязнения площадки.

Степень загрязнения

Для оценки степени загрязнения ассимилирующих органов растений локальной зоны (табл. 2) в качестве фоновых значений использованы данные широкомасштабного международного проекта "Экогеохимия Баренц-региона" (Reimann et al., 2001).

Согласно данным таблицы наиболее высокие уровни загрязнения свойственны хвое сосны, самые низкие – листьям ивы (табл. 2). Уровни загрязнения никелем и медью для большинства видов растений различны. Наиболее значительные различия (до 10 раз) по степени загрязнения Ni и Cu свойственны листьям брусники (табл. 2), что объясняется более высокой величиной отношения Cu/Ni, характерной для брусники, произрастающей в фоновых условиях. Как было показано нами ранее, степень загрязнения растений локальной зоны зависит от фоновых концентраций, следовательно, чем ниже содержание загрязняющего элемента в фоне, тем выше степень его загрязнения (Кашулина, Салтан, 2008).

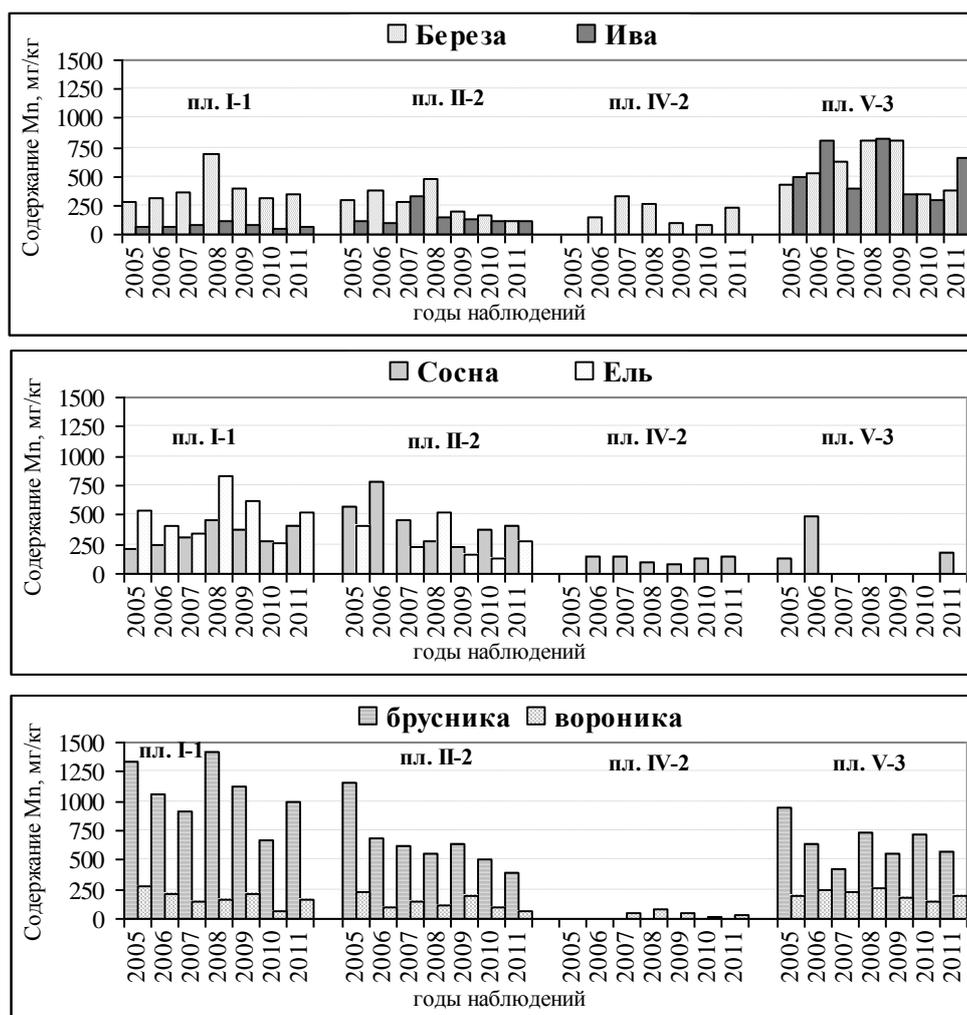


Рис. 4. Многолетняя динамика содержания Mn (мг/кг) в листьях растений на стационарных площадках

Таблица 2. Фоновые концентрации элементов в листьях/хвое растений (Reimann et al., 2001) и отношение медианы концентраций металлов в листьях/хвое растений локальной зоны к фону

Вид растения	Параметр	Ni	Cu	Mn	Zn
Берёза	Фон, мг/кг	3.9	5.7	1470	205
	Медиана/фон	21	7	0.3	0.3
Ива	Фон, мг/кг	8.97	7.7	310	125
	Медиана/фон	16	6	0.7	0.3
Сосна	Фон, мг/кг	1.13	3	535	39.7
	Медиана/фон	65	16	0.4	0.6
Ель	Фон, мг/кг	1.3	2.1	805	41
	Медиана/фон	32	8	0.5	0.5
Брусника	Фон, мг/кг	0.68	4.1	1210	26
	Медиана/фон	60	6	0.6	0.6
Вороника	Фон, мг/кг	2.59	5.2	510	13
	Медиана/фон	30	10	0.3	0.8

Поведение металлов в системе "почва – растение"

В настоящее время загрязнение почв никелем и медью в локальной зоне достигло экстремально высокого уровня; их содержание в почве превышает фоновые значения в сотни и тысячи раз (Кашулина,

2002). Марганцем и цинком почва обеднена, поскольку они менее конкурентоспособны по сравнению с другими элементами, содержащимися в почве в достаточно большом количестве.

Для сравнительной оценки изменений, происходящих в почве и растениях, был проведён корреляционный анализ между многолетней динамикой распределения содержания изучаемых элементов в почве и растениях (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между содержанием металлов (мг/кг) в листьях растений и почве в многолетней динамике (2002-2011 гг.)

Вид растения	Номер площадки			
	I-1	II-2	IV-2	V-3
<i>r</i> (Ni)				
Берёза	-0,41	0,48	0,33	0,54
Ива	0,41	0,07	—*	0,56
Сосна	0,29	0,57	0,21	—*
Ель	0,22	0,29	—*	—*
Вороника	-0,34	-0,20	-0,05	0,79
Брусника	0,11	0,12	—*	0,53
<i>r</i> (Cu)				
Берёза	0,36	0,27	0,68	-0,08
Ива	0,53	-0,35	—*	0,43
Сосна	0,41	0,09	0,88	—*
Ель	0,00	-0,08	—*	—*
Вороника	-0,25	-0,06	-0,04	-0,19
Брусника	0,09	-0,13	—*	0,90
<i>r</i> (Zn)				
Берёза	-0,04	0,35	0,88	-0,78
Ива	-0,33	0,14	—*	-0,18
Сосна	0,22	0,35	0,35	—*
Ель	0,34	0,56	—*	—*
Вороника	0,02	0,54	-0,10	0,22
Брусника	0,24	0,68	—*	0,97
<i>r</i> (Mn)				
Берёза	0,94	0,85	0,52	0,47
Ива	0,74	-0,18	—*	0,42
Сосна	0,77	0,43	0,01	—*
Ель	0,87	0,87	—*	—*
Вороника	0,03	0,21	0,56	0,29
Брусника	0,66	0,39	—*	0,80

Примечание. Жирным шрифтом выделен коэффициент корреляции *r* при уровне значимости 95 % ($p > 0,05$); * – данный вид растения отсутствует на площадке.

Проанализировав указанные в таблице данные, можно сделать вывод о том, что связь между распределением содержания металлов по годам в системе "почва – растение" в целом отсутствует. Единичные высокие коэффициенты корреляции для Cu и Zn получены за счёт совпадения максимальных величин их содержания в почве и растении. По марганцу были получены значимые величины корреляции для листьев берёзы и хвои ели (только на двух площадках), сосны – на одной площадке (I-1).

Поведение металлов в системе "атмосферные осадки – растение"

Несмотря на существенное снижение выбросов комбинатом "Североникель", концентрации основных элементов-загрязнителей в атмосферных осадках локальной зоны остаются высокими, особенно в зимних осадках. По оценкам на основе медиан, концентрации никеля в растворённой части снега превышают фоновые до 2 000 раз, меди – до 1 500, цинка и марганца – до 20 раз (в единичных образцах концентрации цинка опускаются ниже природного варьирования). В дождевых водах локальной зоны медиана концентрации растворённого никеля превышает фоновые условия в 100-300 раз, меди – в 50-150, цинка и марганца – не более чем в 2-3 раза (Кашулина, Салтан, 2008).

Поскольку атмосферные осадки являются источником поступления элементов в листья растений, то был проведён корреляционный анализ, который показал, что изменения содержания металлов в листьях

растений в многолетней динамике в целом не зависели от изменений, наблюдаемых в атмосферных осадках в исследуемые годы. Об этом свидетельствуют низкие и часто отрицательные коэффициенты корреляции; единичные высокие коэффициенты корреляции получены за счёт совпадения максимальных концентраций в обеих средах на отдельных площадках (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между содержанием металлов (мг/кг) в листьях растений и суммарными (твёрдая и растворённая фазы) концентрациями в атмосферных осадках (снег и дождь, мкг/л)

Вид растения	Снег				Дождь		
	Номер площадки						
	I-1	II-2	IV-2	V-3	I-1	II-2	V-3
<i>r</i> (Ni)							
Берёза	0,14	0,18	-0,47	-0,32	0,35	0,61	0,30
Ива	0,22	0,10	—*	-0,23	0,66	0,46	0,87
Сосна	0,29	-0,21	-0,14	—*	0,38	0,77	—*
Ель	0,03	-0,85	—*	—*	0,64	0,34	—*
Вороника	0,44	-0,06	-0,04	-0,07	0,05	-0,16	-0,15
Брусника	0,54	-0,04	—*	-0,04	-0,43	0,11	0,83
<i>r</i> (Cu)							
Берёза	0,45	0,87	-0,26	-0,56	0,91	0,45	-0,10
Ива	0,43	-0,05	—*	-0,08	0,78	0,66	0,09
Сосна	0,56	0,26	-0,70	—*	0,56	0,77	—*
Ель	-0,05	-0,75	—*	—*	0,61	0,46	—*
Вороника	0,54	-0,25	-0,25	-0,29	0,57	0,56	-0,37
Брусника	0,18	0,02	—*	-0,07	0,48	0,33	0,93
<i>r</i> (Zn)							
Берёза	-0,04	0,96	-0,44	-0,15	0,12	0,82	-0,16
Ива	-0,43	-0,38	-0,59	-0,59	-0,48	0,38	-0,01
Сосна	0,06	-0,40	-0,33	—*	-0,12	0,36	—*
Ель	-0,52	-0,64	—*	—*	-0,32	-0,53	—*
Вороника	0,37	-0,30	-0,21	-0,33	0,07	-0,06	0,65
Брусника	-0,54	-0,50	—*	-0,34	-0,41	-0,36	0,37
<i>r</i> (Mn)							
Берёза	0,63	-0,05	0,08	0,57	0,03	0,47	0,06
Ива	0,84	-0,18	—*	-0,25	0,03	-0,45	0,75
Сосна	0,35	-0,20	-0,01	—*	-0,55	0,58	—*
Ель	0,61	-0,03	—*	—*	0,22	0,68	—*
Вороника	0,38	-0,17	-0,23	0,28	0,57	-0,59	0,41
Брусника	0,63	-0,06	—*	-0,55	0,56	-0,16	0,22

Примечание. Жирным шрифтом выделен коэффициент корреляции *r* при уровне значимости 95 % ($p > 0,05$); * – данный вид растения отсутствует на площадке.

4. Заключение

Проанализировав результаты наблюдений многолетней динамики содержания основных (Ni, Cu) и сопутствующих (Zn, Mn) металлов-загрязнителей в ассимилирующих органах растений локальной зоны комбината "Североникель", можно сделать следующие выводы:

- 1) изменения содержания тяжёлых металлов в листьях растений индивидуальны для каждого вида растений и каждой площадки и не носят закономерного характера;
- 2) в локальной зоне потребление металлов в листьях растений в первую очередь определяется видовыми особенностями;
- 3) снижения содержания основных загрязнителей в листьях изученных растений не произошло, несмотря на уменьшение объёмов выбросов комбинатом "Североникель";
- 4) наиболее высокие значения варьирования содержания тяжёлых металлов характерны для сосны и вороники, наименьшие значения – для берёзы; при этом уровень варьирования не зависит от уровня загрязнения площадки;

5) наименьшей величиной варьирования отличается никель, остальные изучаемые элементы варьировали в исследованных растениях в большем диапазоне значений (от 2 до 6 раз), что, вероятно, связано с более высокой биофильностью данных металлов;

6) в настоящее время содержание Ni и Cu (основных загрязнителей) в листьях растений находится на достаточно высоком уровне, превышающем фоновые значения в десятки раз. Марганец и цинк (сопутствующие загрязнители), наоборот, являются дефицитными, поскольку их содержание в растениях гораздо ниже, чем в фоновых условиях;

7) сравнительный анализ многолетних изменений содержания тяжёлых металлов в системе "почва – растение" и "атмосферные осадки – растения" свидетельствует о разнонаправленном характере изменений в этих обследованных средах.

Благодарности. Выражаю сердечную благодарность зав. лабораторией почвоведения ПАБСИ КНЦ РАН, д-ру биол. наук Г.М. Кашулиной за неоценимую помощь и всем сотрудникам лаборатории почвоведения за поддержку и сотрудничество.

Литература

- Reimann C., Koller F., Frengstad B., Kashulina G., Niskavaara H., Englmaier P.** Comparison of the element composition in several plant species and their substrate from a 1,500,000 km²-area in Northern Europe. *The Science of the Total Environment*, v. 278, p. 87-112, 2001.
- Алексеев В.А.** Основные факторы накопления химических элементов организмами. *Биология. Соровский образовательный журнал*, т. 7, № 8, с. 20-24, 2001.
- Берлянд М.Е.** Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. *Л., Гидрометеиздат*, 448 с., 1985.
- Брускина И.М., Карабань Р.Т.** Накопление серы и металлов в листьях берёзы и хвое сосны в районе медно-никелевых производств. *Лесное хозяйство*, № 10, с. 10, 1992.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2011 году. *Мурманск, Ростсервис*, 152 с., 2012.
- Кашулина Г.М.** Аэротехногенная трансформация почв Европейского Субарктического региона. *Апатиты, КНЦ РАН*, ч. 1, 158 с., 2002.
- Кашулина Г.М., Салтан Н.В.** Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината "Североникель". *Апатиты, КНЦ РАН*, 239 с., 2008.
- Левина В.И.** Сезонная динамика влажности и химических свойств подзолистых, горно-подзолистых и горно-тундровых почв Мурманской области. Почвенные режимы на Полярном Севере. *Л., Наука*, с. 5-58, 1969.
- Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. *Под ред. В.А. Алексеева. Л., Наука*, 198 с., 1990.
- Лукина Н.В., Никонов В.В.** Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. *Апатиты, КНЦ РАН*, ч. 1, 213 с., 1996.
- Манаков К.Н.** Поглощение растительностью минеральных элементов и азота из почвы в лесах Кольского полуострова. *Почвоведение*, № 8, с. 34-41, 1961.
- Парибок Т.А.** Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия. Растения в экстремальных условиях минерального питания. *Л., Наука*, с. 82-99, 1983.
- Раменская М.Л.** Микроэлементы в растениях Крайнего Севера. *Л., Наука*, 159 с., 1974.
- Черненко Т.В.** Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. *М., Наука*, 191 с., 2002.