
СТРАНИЧКА МОЛОДОГО УЧЕНОГО

УДК 630*160.21:630*425

**Элементный состав листьев древесных растений
в условиях техногенного загрязнения**

Т. А. СУХАРЕВА

*Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН,
ул. Академгородок, 14а, Апатиты, Мурманская обл. 184209 (Россия)**E-mail: sukhareva@inep.ksc.ru*

(Поступила 24.10.11; после доработки 09.12.11)

Аннотация

Изучен химический состав ассимилирующих органов сосны обыкновенной и березы пушистой в зоне влияния медно-никелевого комбината “Печенганикель”, расположенного на северо-западе Мурманской области, в приграничном районе Финляндии, Норвегии и России. Выявлены аномально высокие концентрации меди и никеля в листьях (хвое) деревьев в условиях техногенного загрязнения. Обнаружена недостаточная обеспеченность хвои сосны элементами питания – фосфором и калием. В листьях березы обнаружены более высокие концентрации меди, никеля и серы по сравнению с хвоей сосны.

Ключевые слова: элементный состав, сосна, береза, листья, хвоя, атмосферное загрязнение, комбинат “Печенганикель”, северотаежные леса, Кольский полуостров

ВВЕДЕНИЕ

Сбалансированность минерального состава растений определяет их нормальный рост и развитие. В условиях атмосферного загрязнения в результате фоллиарного и корневого поглощения в ткани растений поступает избыточное количество поллютантов, что вызывает перераспределение многих биогенных элементов. В результате снижается обеспеченность элементами питания не только ассимилирующих органов, отдельных растений, но и лесных биогеоценозов в целом. В Мурманской области крупнейшим источником выбросов в атмосферу подкисляющих веществ и соединений тяжелых металлов служит комбинат “Печенганикель”, функционирующий

с 1946 г. Критические уровни содержания тяжелых металлов превышены на территории площадью свыше 3200 км² [1]. Долговременное техногенное воздействие привело к значительным нарушениям функционирования лесных экосистем, в том числе минерального питания растений. Негативные последствия на лесные экосистемы прослеживаются на десятки километров от источника. Видимые повреждения растительности, вызванные выбросами SO₂, характерны для разных видов растений, включая сосну обыкновенную и березу пушистую. В непосредственной близости к комбинату леса сухостойные или серьезно повреждены. Снижение объемов производства в течение последних двух десятилетий обусловило начальные признаки

восстановления экосистем, но процессы накопления загрязняющих веществ в различных компонентах лесных фитоценозов продолжают.

Цель работы – исследование химического состава ассимилирующих органов лиственных (*Betula pubescens* Ehrh.) и хвойных (*Pinus sylvestris* L.) деревьев в зоне влияния комбината “Печенганикель”.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Растительные пробы отбирали на пробных площадях (ПП), расположенных на различном расстоянии от комбината. Основной тип лесной растительности в районе исследования – березняки травянисто-кустарничковые и кустарничковые, а также сосняки травя-

нисто-кустарничковые и кустарничковые. Всего исследованы 23 ПП (рис. 1): на территории Финляндии – 11 (F-1–F-11), России – 7 (RUS1, RUS2, RUS3, N6, S3, S10, RUS0), Норвегии – 5 (PA, PB, PC, PD, N11). Контрольные ПП заложены на российской (RUS0) и финской (F-11) территориях, на удалении в 42 и 131 км от комбината соответственно.

Образцы хвои сосны и листьев березы отбирали на перечисленных объектах в конце вегетационного периода (август) в 2004 г. На каждой ПП ассимилирующие органы отобраны с пяти деревьев и объединены в смешанный образец. Хвоя сосны разобрана по возрастным классам. В работе представлены данные по химическому составу однолетней хвои.

Количественный химический анализ образцов растений выполнялся в Центре коллек-

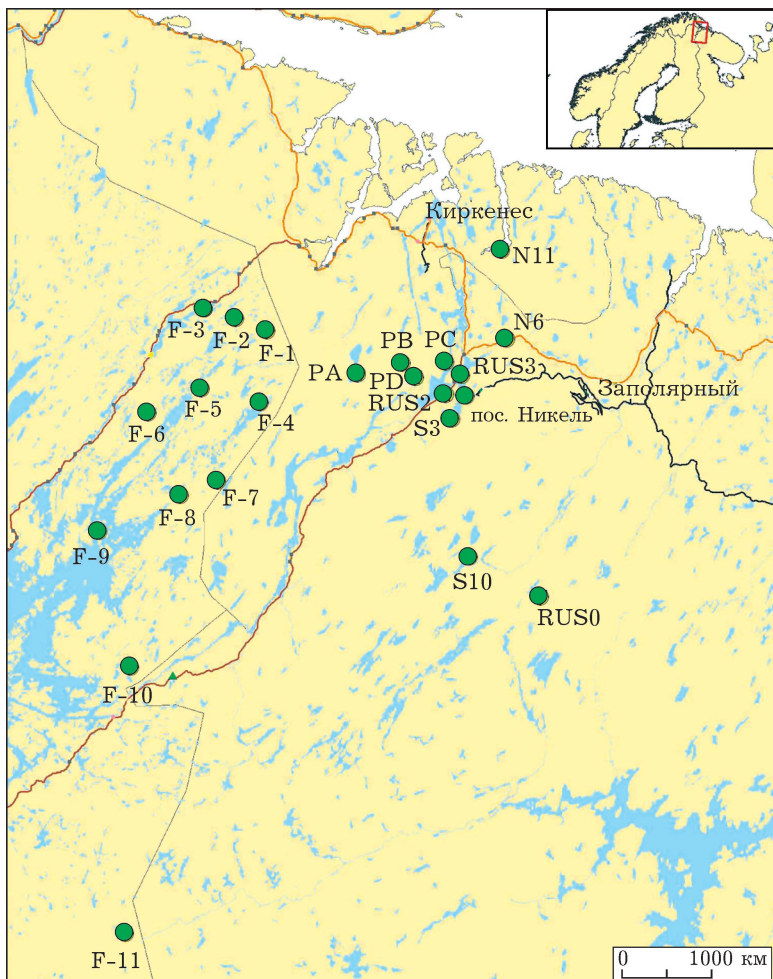


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей на приграничной территории России, Норвегии и Финляндии.

тивного пользования физико-химических методов анализа Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН (Апатиты). Аналитические исследования проводили в соответствии с ГОСТ 30178–96 [2] и другими общепринятыми методиками [3, 4]. Концентрацию химических элементов определяли в вытяжном шкафу после мокрого озоления концентрированной азотной кислотой. Содержание Ca, Mg, Fe, Al, Mn, Cu, Ni, Zn определяли методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии, K – методом атомно-эмиссионной спектрометрии, P – фотокolorиметрическим методом по интенсивности окраски фосфорно-молибденового комплекса (метод Лоури–Лопеса), S – турбидиметрическим методом.

Погрешность измерений не превышает $\pm(3-5)$ %. Точность и правильность методов и результатов измерений оценивались в соответствии с ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002 [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сосна обыкновенная (Pinus sylvestris L.)

В фоновых условиях в хвойных деревьях северотаежных лесов отмечается довольно низкая концентрация Ni и Cu; средние значения составляют 1.4 и 2.0 мг/кг соответственно [6, 7]. Известно, что поступление меди и никеля в растение играет важную роль в процессах метаболизма. Медь служит активатором отдельных ферментов и целых ферментных систем, связанных с окислительно-восстановительными реакциями клетки [8]. Никель в растениях принимает участие в ряде ферментативных реакций: карбоксилирование, гидролиз пептидных связей и др. В небольших концентрациях медь и никель необходимы растениям. Однако в избыточных концентрациях тяжелые металлы могут пре-

ТАБЛИЦА 1

Элементный состав однолетней хвои сосны на различном удалении от комбината “Печенганикель” на пробных площадях (ПП), расположенных в приграничном районе России, Норвегии и Финляндии, мг/кг абс. сухого вещества

ПП	Расстояние, км	Ca	K	P	S	Mg	Mn	Al	Fe	Zn	Ni	Cu
RUS3	2.6	3710	3884	1071	801	971	531	407	237	18	54	24
RUS2	5.1	3256	4420	1127	753	880	608	292	161	20	37	16
RUS1	5.2	3445	4569	1116	800	778	655	257	171	21	35	20
S3	7.0	2585	3097	1002	873	1028	389	337	249	24	43	22
PC	8.1	2721	3945	932	799	805	469	193	69	30	16	10
PD	11.9	2649	3382	1078	777	1145	558	297	47	27	9	7
N6	12.3	2722	4501	1359	955	709	516	429	217	21	56	24
PB	15.3	3571	3492	1189	908	1401	685	199	54	33	11	7
PA	23.3	3070	3785	951	761	832	952	253	40	39	6	4
S10	32.8	3123	3996	1207	731	1053	883	261	90	53	18	4
RUS0	42.2	1696	3907	1259	599	877	588	224	36	28	6	4
F-4	42.3	2710	3511	1200	949	993	500	298	97	39	16	12
F-1	42.7	2222	3349	1022	777	924	394	218	39	41	4	4
F-2	49.4	2539	3763	1074	795	882	568	200	37	42	2	3
F-7	53.7	2386	3611	1157	812	1185	357	251	45	35	5	5
F-5	54.0	2287	3480	1000	741	892	302	224	46	37	16	12
F-3	55.8	3024	4013	1081	795	953	674	210	37	39	2	3
F-8	61.7	3475	4502	1187	826	1130	361	322	44	51	3	4
F-6	65.0	2578	3497	1023	712	927	515	158	38	44	3	4
F-9	79.3	2822	4146	1283	820	1253	717	269	41	44	4	4
F-10	90.0	2193	4516	1209	704	963	424	252	31	40	2	3
F-11	131.0	2602	4395	951	686	974	837	307	28	52	1	3

пятствовать поступлению в растение других элементов питания, приводя к нарушению сбалансированности минерального состава [9].

Как показали исследования, на приграничной территории России, Норвегии и Финляндии концентрации тяжелых металлов (меди и никеля) в зоне влияния комбината “Печенганикель” в хвое сосны значительно превышены (табл. 1). На российской территории, рядом с комбинатом (RUS3, 2.6 км от источника) содержание Ni в однолетней хвое возрастает в 9 раз, Cu – в 6 раз по сравнению с контрольными значениями (RUS0). На территории Норвегии концентрации никеля и меди возрастают в 1.5–9 раз относительно контроля. На финской территории для наиболее близкой к источнику загрязнения точке отбора растительных образцов (F-4) содержание Ni в хвое возрастает в 2.6 раза, а Cu – в 3 раза по сравнению с контрольной площадкой (RUS0) и в 16 и 4 раза соответствен-

но относительно наиболее удаленной мониторинговой станции (F-11). Значительное накопление в хвое Ni и Cu вблизи комбината может быть связано не только с почвенным, но и с фолитарным поглощением загрязнителей.

Коэффициент концентрации (K_C), используемый при проведении биогеохимических исследований, позволяет оценить уровень содержания поллютантов в исследуемом объекте при техногенной нагрузке по отношению к среднефоновому его содержанию, т. е. в хвое деревьев, произрастающих в условиях регионального фона. Аномальными считаются концентрации, для которых $K_C \geq 1.5$ [10]. Данные по коэффициенту концентрации для хвои всех обследованных ПП представлены на рис. 2, а. Видно, что в зоне влияния комбината концентрации тяжелых металлов в хвое существенно превышают фоновые значения. По мере приближения к источнику загрязнения значения K_C возрастают. Максимальные значения K_C обна-

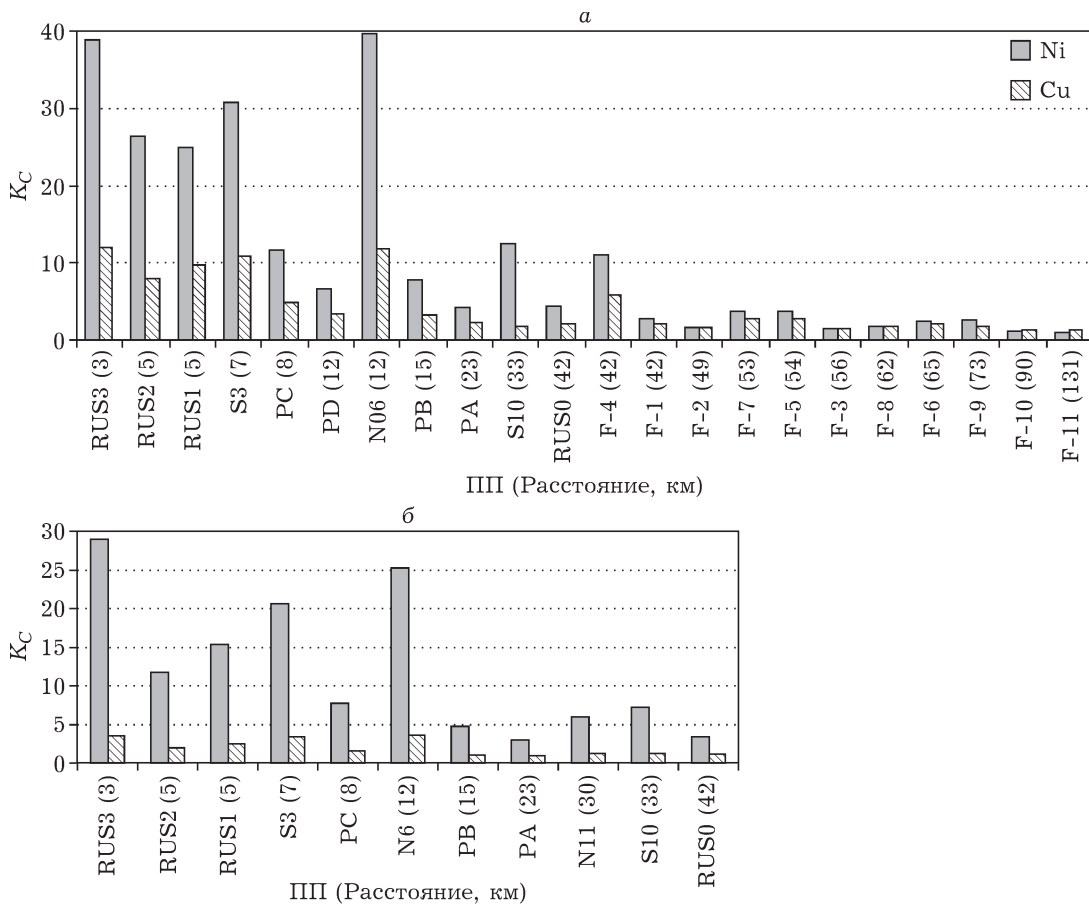


Рис. 2. Коэффициенты концентрации (K_C) никеля и меди в однолетней хвое сосны (а) и в листьях березы (б) на обследованных пробных площадях (ПП), расположенных на различном расстоянии от комбината.

ружены на российских ПП. Судя по значениям K_C , концентрации тяжелых металлов в хвое сосны на обследованной приграничной территории следует считать аномальными. Отметим, что аномально высокий уровень аккумуляции никеля и меди в хвое сосны сохраняется и на значительном расстоянии от комбината, что свидетельствует о дальности распространения атмосферных выбросов.

В условиях сильного техногенного загрязнения не только возрастает содержание тяжелых металлов в хвое, но изменяется их нормальное соотношение. Согласно исследованиям хвои сосны в фоновых районах [11], содержание меди превышает либо близко к концентрациям никеля, что определяется физиологическими потребностями растения в этих микроэлементах. В нашем случае практически на всех обследованных ПП это соотношение изменяется в обратную сторону. Исключение составляют некоторые удаленные от комбината ПП, расположенные на финской территории. Изменения соотношения Ni : Cu в условиях атмосферного загрязнения отмечалось также другими исследователями и обусловлено как явлениями антагонизма в поглощении элементов, так и разной скоростью поглощения их из почвы [11, 12]. Установлено, что никель в отличие от меди более интенсивно перемещается из корней в надземные органы. Так, примерно 30 % поглощенного корнями никеля транспортируется в листья [14]. Другой причиной может быть преобладание в выбросах никеля [13]. Это также служит причиной его повышенного содержания в ассимилирующих органах, поскольку значительная доля частиц осаждается на поверхности листьев в результате процессов седиментации вблизи источников выбросов или в форме аэрозольных частиц на удалении от комбината.

Исследование накопления серы в растениях имеет большое значение, особенно при оценке воздействий на лесные биогеоценозы предприятий, в выбросах которых преобладает сернистый ангидрид. В северных условиях при коротком вегетационном сезоне основной путь поступления в хвою серы – ее проникновение через устьица [15]. Обнаружено, что на обследованных участках концентрация серы в хвое повышается на 10–60 % по сравнению с контрольными участками

(RUS0, F-11). Высокие концентрации Fe и Al обнаружены как непосредственно вблизи комбината (в радиусе 3–5 км), так и на некотором удалении от него (7–12 км от источника). Высокие концентрации железа обнаружены на еще более удаленных ПП (N6, F-4), на расстоянии более 30 км от комбината.

Несмотря на высокую приспособляемость растений к конкретным условиям среды и способность к саморегулированию минерального состава, при сильном техногенном воздействии возникают нарушения и отклонения различного плана. Как правило, они связаны с выщелачиванием элементов питания из почвы и ассимилирующих органов, а также с избыточным поступлением в растительный организм тяжелых металлов и серы, сопутствующим данному процессу. В результате в растении изменяется соотношение основных макро- и микроэлементов.

В условиях воздушного загрязнения наблюдается увеличение содержания кальция в хвое, что может быть связано с его активным поглощением из органогенного горизонта, где также отмечено более высокое содержание данного элемента по сравнению с фоновыми районами [1]. Известно, что основной источник минерального питания бореальных растений с корневой стратегией питания – органогенный горизонт. Основная часть сосущих корней растений с корневой стратегией питания находится в этом горизонте либо непосредственно под ним, что позволяет “перехватывать” элементы питания, мигрирующие с почвенными водами [16]. По-видимому, увеличение концентрации кальция в хвое сосны в данных условиях может также объясняться поглощением данного элемента из почвенных вод, сформированных в минеральных горизонтах, обогащенных этими элементами благодаря специфике почвообразующих пород.

Концентрация цинка в хвое, напротив, снижается. Уменьшение содержания Zn и увеличение концентраций никеля, меди и железа, вероятно, в значительной степени обусловлены проявлением известного антагонизма в парах: Zn–Ni, Zn–Cu, Fe–Zn. В условиях воздушного промышленного загрязнения почвы могут обедняться цинком в результате реакций замещения в почвенном поглощающем комплексе катионов цинка протонами и катионами

ТАБЛИЦА 2

Элементный состав листьев березы на пробных площадях (ПП), расположенных на различном удалении от комбината “Печенганикель” (2000 и 2004 гг.), мг/кг абс. сухого вещества

ПП	Расстояние, км	Ca	K	P	S	Mg	Mn	Al	Fe	Zn	Ni	Cu
RUS3	2.6	4708	7833	2157	1337	2697	361	26	182	90	87	21
RUS2	5.1	5479	7355	2314	1054	2567	912	15	108	109	35	11
RUS1	5.2	5001	8517	2085	1349	2737	930	15	123	121	46	15
PC	8.1	5503	7820	1933	1777	2862	1640	28	78	86	14	10
PB	15.3	5840	5713	2004	1561	2984	930	21	63	105	14	7
N6	12.3	5106	9695	2606	1525	2308	1026	20	204	129	76	22
PA	23.3	8036	6366	1954	1362	2381	1981	19	59	123	9	5
N11	30.0	6649	5251	2171	1546	3514	1391	28	67	82	18	8
RUS0	42.2	5695	7738	2790	964	2374	946	15	60	133	10	7

тяжелых металлов, входящих в состав выбросов [16, 17]. Другая причина обеднения хвои этим элементом – выщелачивание катионов металлов из листьев кислыми осадками.

В исследуемом районе обеспеченность хвои P и K, как правило, опускается ниже уровня дефицита (для фосфора дефицитный уровень его содержания в однолетней хвое не превышает 1.1–1.2 г/кг, для калия – 4 г/кг [18]). Следует отметить, что дефицитные уровни для данных элементов выявлены не только на ПП рядом с комбинатом, но и на контрольных участках: RUS0 – дефицит калия, F-11 – дефицит фосфора. Содержание магния сопоставимо с таковым для контрольных участков либо несколько превышает его, что может объясняться вариациями в составе почвообразующей породы.

В целом исследование хвои сосны обыкновенной показало, что в зоне влияния комбината значительно возрастает содержание в ней элементов, преобладающих в составе выбросов комбината “Печенганикель” (S, Ni, Cu, Fe). На основе листовой диагностики выявлен дефицитный уровень калия и фосфора в хвое. Возможно, это связано с нарушением поглощения сосной данных элементов вследствие проявления антагонизма между Ca и K, Ca и P.

Береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.)

Береза – типичное древесное растение бореальных лесов. В отличие от хвойных деревьев, исследования химического состава березы не столь многочисленны. Тем не ме-

нее для данного вида можно отметить несколько характерных особенностей минерального состава. Ассимилирующие органы березы отличаются довольно высоким содержанием минеральных элементов (5.2 % на сухое вещество) [19]. Из зольных элементов преобладают кальций и калий. Известно, что береза является концентратором цинка [20]. Нами также установлено, что в листьях березы в больших количествах содержится цинк (табл. 2). Наряду с цинком береза также аккумулирует магний. Таким образом, концентрации магния и цинка в березовых листьях значительно превышают таковые в хвое сосны (см. табл. 1, 2). На контрольном участке (RUS0) в фотосинтезирующих органах березы выявлено достаточно высокое содержание серы – более 900 мг/кг. Концентрация железа в листьях березы также выше по сравнению с хвойными деревьями.

Под воздействием азротехногенного загрязнения в листьях березы существенно возрастают концентрации основных поллютантов, прежде всего никеля, меди и серы. На территории России содержание никеля в листьях березы на ПП в 7–8 раз выше контроля (RUS0), содержание меди – в 2–3 раза. На территории Норвегии на исследуемых ПП концентрации данных металлов в листьях березы возрастают в 2–3 раза по сравнению с контролем. На рис. 2, б приведены данные по K_C , рассчитанные для листьев березы. В расчетах использовано фоновое региональное содержание никеля и меди в листьях березы (3 и 6 мг/кг соответственно) [7]. Наиболее вы-

ТАБЛИЦА 3

Элементный состав листьев березы на пробных площадях (ПП), расположенных на различном удалении от комбината “Печенганикель” (2000 и 2004 гг.), мг/кг абс. сухого вещества

ПП	Расстояние, км	Ca	K	P	S	Mg	Mn	Al	Fe	Zn	Ni	Cu
S3	7.0	6814	7782	2285	1794	2992	481	252	572	198	68	29
		4770	6950	2210	1527	2378	385	68	264	120	62	20
S10	32.8	5943	6813	2437	1209	2686	1299	61	209	175	24	8
		5506	7225	2297	962	2173	931	48	125	126	22	7

Примечание. В числителе – данные 2000 г., в знаменателе – 2004 г.

сокие значения K_C отмечены на российской территории, в радиусе 12–15 км от источника загрязнения. Коэффициенты концентрации никеля значительно выше по сравнению с K_C меди.

В условиях техногенного загрязнения содержание серы в листьях березы возрастает на 30–60 %. Следует отметить, что в листьях березы Cu, Ni, S аккумулируются в более высоких концентрациях по сравнению с ассимилирующими органами сосны обыкновенной. Вблизи источника загрязнения в листьях березы также возрастают концентрации железа и алюминия. Напротив, ассимилирующие органы березы обедняются такими элементами питания, как кальций, марганец, цинк.

Сравнительный анализ химического состава ассимилирующих органов, проведенный в 2000 и 2004 гг., показал, что концентрации основных поллютантов – серы и тяжелых металлов (Cu, Ni, Fe) – несколько снизились (табл. 3). Тем не менее листья продолжают обедняться важнейшими элементами питания (Ca, Mg, Mn, Zn), что, несомненно, оказывает негативное воздействие на функционирование всего растительного организма. Следовательно, несмотря на снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, говорить о нормализации минерального состава растений на территориях, подверженных воздействию медно-никелевого производства, преждевременно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Элементный состав ассимилирующих органов древесных растений в значительной мере трансформируется под влиянием такого мощного стрессового фактора, как атмос-

ферное загрязнение. В листьях древесных растений существенно возрастают концентрации элементов, входящих в состав выбросов медно-никелевого комбината “Печенганикель”, прежде всего никеля, меди и серы. В листьях березы аккумулируются более высокие концентрации тяжелых металлов и серы по сравнению с ассимилирующими органами сосны. Установлено, что в условиях сильного загрязнения концентрации P и K достигают уровня, определяемого для сосны обыкновенной как дефицитный. Недостаточная обеспеченность хвои сосны этими элементами выявлена для исследуемых территорий России, Норвегии и Финляндии. Для биоиндикационных исследований с целью оценки состояния лесных биогеоценозов целесообразно использовать ассимилирующие органы хвойных и лиственных деревьев, которые весьма чувствительны к условиям произрастания.

Работа выполнена в рамках международного проекта “Разработка и внедрение совместной системы мониторинга и оценки состояния окружающей среды в приграничном районе Норвегии, Финляндии и России” в 2004–2005 гг. и при поддержке Программы РАН “Биологическое разнообразие” (подпрограмма “Разнообразие и мониторинг лесных экосистем”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Current State of Terrestrial Ecosystems in the Joint Norwegian, Russian and Finish Border Area in Northern Fennoscandia. Helsinki: Finish Forest Research Institute, 2008. 98 p.
- 2 ГОСТ 30178–96. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов.
- 3 Обухов А. И., Плеханова И. О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1991. 184 с.
- 4 Большой практикум по физиологии растений / Отв. ред. Б. А. Рубин. М.: Высш. шк., 1978. 408 с.

- 5 ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений.
- 6 Лукина Н. В., Сухарева Т. А., Исаева Л. Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. М.: Наука, 2005. 245 с.
- 7 Сухарева Т. А. // Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием "Экологические функции лесных почв в естественных и нарушенных ландшафтах". Апатиты, 12-16 сентября, 2011. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. Ч. 2. С. 149-153.
- 8 Чернавина И. А. Физиология и биохимия микроэлементов. М.: Высш. шк., 1970. 310 с.
- 9 Kukkola E., Rautio P., Huttunen S. // *Environ. Experim. Botany*. 2000. Vol. 43. P. 197-210.
- 10 Саев Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П., Смирнова Р. С., Башаркевич И. Л., Онищенко Т. Л., Павлова Н. Л., Трефилова Н. Я., Ачкасов А. И., Саркисян С. Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- 11 Лянгузова И. В. // Динамика лесных сообществ Северо-Запада России. СПб.: ООО "ВВМ", 2009. С. 25-28.
- 12 Андреева И. В., Говорина В. В. // *Агрохимия*. 2008. № 6. С. 68-71.
- 13 Kozlov M. V. // *Ambio*. 2000. Vol. 29. P. 512-517.
- 14 Рассеянные элементы в бореальных лесах / Отв. ред. А. С. Исаев. М.: Наука, 2004. 616 с.
- 15 Raitio H., Tuovinen J.-P., Antilla P. // *Water, Air and Soil Pollution*. 1995. Vol. 85 (3). P. 1361-1366.
- 16 Лукина Н. В., Никонов В. В. Питательный режим лесов Северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. 316 с.
- 17 Eiliv S., Lukina N., Nikonov V., Aamlid D. and Roysset O. // *Environ. Monitoring and Assessment*. 2000. Vol. 60. P. 71-88.
- 18 Huettl R. F. // *Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region* / Huettl and Mueller. Dombois (Eds.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993. P. 97-114.
- 19 Никонов В. В., Лукина Н. В. Биогеохимические функции лесов на северном пределе распространения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. 315 с.
- 20 Gosz J. R., Likens G. E., Bormann F. N. // *Ecol. Monogr.* 1973. Vol. 43. P. 173-191.