

УДК 630*581.192:630*425

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ЭМИССИОННОЙ НАГРУЗКИ

© 2013 Т.А. Сухарева

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты

Поступила в редакцию 25.05.2013

Выполнен анализ долговременных (1991-2011 гг.) изменений минерального состава растений, лишайников, почвы сосновых лесов Кольского полуострова в зоне воздействия горно-металлургических предприятий. Показано, что содержание поллютантов в почвенно-растительном покрове остаются высокими, несмотря на снижение уровня атмосферных выбросов. Наиболее чувствительными к техногенному воздействию оказываются зеленые мхи и лишайники.

Ключевые слова: *сосновые леса, атмосферное загрязнение, Кольский полуостров, почва, растения, лишайники, элементный состав*

Оценка состояния лесных экосистем и разработка критериев и методов этой оценки остаётся важной проблемой экологии. Поступление промышленных эмиссий в атмосферу является мощным фактором, определяющим состояние лесных биогеоценозов. Изучение воздействия воздушного загрязнения на наземные экосистемы имеет особое значение для Мурманской области, где основными источниками загрязнения являются предприятия горно-металлургического комплекса. Продолжительное действие медно-никелевого производства в регионе привело к трансформации лесных растительных сообществ на значительных территориях. Площади зоны дигрессии с глубокими нарушениями состава и структуры лесных экосистем составляют 1200 км² в окрестностях комбината «Североникель» (г. Мончегорск) и 500 км² – комбината «Печенганикель» (п. Никель). На площади около 39 000 км² (около 40% лесной территории области) обнаруживаются визуальные признаки повреждения лесов [4]. В последние два десятилетия сократилось поступление сернистого газа в атмосферу. По данным управления по экологическому мониторингу и охране окружающей среды ОАО «Кольская ГМК», годовые объёмы выбросов SO₂ комбинатом «Североникель» снижались от 195,7 тыс.т. в 1991 г. до 33,5 тыс.т. в 2009 г., никеля – от 2,7 до 0,4 тыс.т., меди – от 1,7 до 0,4 тыс. тонн соответственно. Годовые объёмы выбросов SO₂ комбината «Печенганикель» снижались от 257,5 тыс.т. в 1991 г. до 102,7 тыс.т. в

2009 г., объёмы выбросов Ni и Cu за исследуемый период практически не изменились и остаются высокими – 0,3 и 0,2 тыс. тонн соответственно. Долговременное техногенное воздействие привело к значительным нарушениям функционирования лесных экосистем, в том числе минерального питания растений и почвы. В последние два десятилетия выбросы загрязняющих веществ существенно сократились, поэтому представляется актуальным оценить состояние различных компонентов лесных биогеоценозов в ответ на снижение эмиссионной нагрузки.

Цель исследования: изучение динамики элементного состава растений, лишайников и почвы в сосновых лесах Кольского полуострова на основе данных многолетнего мониторинга, проводимого в зоне воздействия медно-никелевых предприятий региона.

Объекты и методы. Исследования осуществлялись в сосняках кустарничково-лишайниковых и кустарничковых, которые формируются в сходных природных условиях, но испытывают разные техногенные нагрузки. В соответствии с уровнем загрязнения и состоянием растительности на территориях, подверженных воздействию промышленных эмиссий, выделены следующие основные стадии дигрессии лесных экосистем: фоновые леса, дефолирующие леса и техногенные редколесья [1]. Обследованы постоянные пробные площади по градиенту промышленного загрязнения в сосновых лесах, соответствующих основным стадиям техногенной дигрессии, в районе комбинатов «Североникель» (8, 31 и 270 км) и «Печенганикель» (5, 14, 44 км). Объектами исследования послужили: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), черника (*Vaccinium myrtillus*

Сухарева Татьяна Алексеевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник. E-mail: sukhareva@inep.ksc.ru

L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), вороника (*Empetrum hermaphroditum* Hagerup.), лишайники (*Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar et Vězd.) и зелёные мхи (*Pleurozium schreberi* (Brid.) и *Hylocomium splendens* (Hedw.)). Образцы отбирались на каждой площадке в 5-ти кратной повторности: хвоя сосны – из верхней трети кроны, листья черники, брусники, вороники, зелёные мхи, а также талломы лишайников – в межкрупных пространствах, почвенные образцы – под кроной сосны. В лабораторных условиях хвою, листья брусники и вороники, зелёные мхи разбирали по возрастным классам. В статье представлены результаты химического анализа листьев (хвои) текущего года. Проведено изучение доступных для растений соединений элементов в органогенном горизонте Al-Fe-подзолистых

почв. Почвенные образцы экстрагировали 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (pH=4.65). Использовали соотношение почвы и вытеснителя 1:25. Растительные образцы подвергались мокрому озолению концентрированной HNO_3 . Металлы (Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn) в образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии, К – атомно-эмиссионной спектрометрии на спектрофотометре атомно-абсорбционном ААС-360, Р – фотоколориметрическим методом по интенсивности окраски фосфорно-молибденового комплекса (метод Лоури-Лопеса), S – турбидиметрическим методом на фотометре КФК-3. Для статистической обработки экспериментальных использовали пакеты программ “STATISTICA 6.0” и Microsoft Excel 6.0.

Таблица 1. Динамика элементного состава лишайников и листьев (хвои) растений и в районе воздействия комбината «Североникель», мг кг^{-1} абс. сухого вещества

Объект исследования	Год	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al	Fe	Zn	Cu	Ni
фон (270 км от комбината)												
сосна	1991	1596	5264	1559	1205	373	608	174	34	41	4	3
	2007	1577	5576	1508	977	365	628	149	22	32	2	1
черника	2007	8601	6534	1526	2489	1301	1151	177	71	15	4	2
брусника	2007	4654	4169	1101	1349	864	949	56	25	23	5	1
вороника	2007	5856	5985	1448	1733	351	1033	36	41	18	7	2
	2011	5084	6562	1586	1860	332	1493	55	51	18	7	5
лишайник	2007	393	393	379	183	76	224	111	125	11	2	1
дефолирующие леса (31 км от комбината)												
сосна	1991	3293	7208	1691	1148	448	1103	281	51	37	16	24
	2007	1409	6886	1511	918	429	805	150	23	28	10	22
черника	1993	10161	8937	1369	2038	2607	1608	121	41	7	13	23
	2007	9152	5377	1572	1992	2338	1746	160	45	12	9	28
брусника	1993	7759	6793	727	16141	1094	1286	152	25	15	10	19
	2007	5296	3461	1004	1410	984	1787	33	17	13	5	13
	2011	5882	4859	1266	1291	1059	1874	67	28	15	5	8
вороника	1993	6721	5009	698	1126	404	964	136	178	8	67	57
	2007	4934	6020	1423	1355	183	1138	20	31	12	7	15
	2011	5089	6178	1266	1164	233	1071	44	36	11	6	11
лишайник	2007	433	1294	559	169	89	221	192	154	20	33	93
	2011	800	1338	528	175	34	407	207	191	14	36	70
техногенные редколесья (8 км от комбината)												
сосна	1991	2910	7067	1791	983	306	1670	221	81	20	69	101
	2007	2095	7038	1576	880	214	785	188	35	19	28	59
черника	1993	8248	13012	1376	917	2457	1531	136	120	7	65	144
	2007	7332	7734	1351	897	1380	1477	176	92	11	49	177
брусника	1993	6950	6469	822	1438	579	1278	121	46	15	32	63
	2007	5046	4149	984	1028	743	1079	62	38	21	10	42
	2011	5449	3586	702	1015	788	1583	112	39	17	14	58
вороника	1993	5889	5192	468	1066	191	881	434	78	13	62	97
	2007	5129	6566	1392	1086	65	1049	13	41	10	13	53
	2011	4742	6283	1255	1018	125	806	43	40	8	16	46

Результаты и обсуждение. Воздействие на лесные экосистемы газовоздушных выбросов промышленных предприятий вызывает ряд сходных изменений в элементном составе различных видов растений и лишайников. Наблюдается многократное возрастание поллютантов в

ассимилирующих органах и обеднение их многими важнейшими для функционирования элементами. Наибольшую чувствительность к атмосферному воздействию демонстрируют лишайники, в талломах которых обнаруживаются высокие концентрации Ni, Cu, Fe (табл. 1, 2), а

на стадии техногенного редколесья исследуемый вид *Cladonia stellaris* отсутствует. Следует отметить, что степень аккумуляции тяжёлых металлов лишайниками гораздо выше, чем у хвойных деревьев и кустарничков. Содержание никеля и меди в лишайниках в 3-8 раз выше, чем в листьях сосудистых растений [3]. Зелёные мхи, как и лишайники, в большом количестве накапливают тяжёлые металлы. В условиях загрязнения содержание никеля и меди во мхах многократно превышают фоновые значения. Высокая аккумуляционная способность мхов связана с тем, что на поверхности этих растений может происходить катионный обмен: основные катионы, входящие в состав зелёных мхов, могут обмениваться на катионы тяжёлых металлов, т.е. мхи действуют подобно искусственным ионообменникам [5]. Содержание железа в образцах мха,

отобранных в зоне воздействия комбината, также значительно превышает фоновые показатели (табл. 2), а концентрация серы возрастает 1,5-2 раза. Содержание других элементов питания (Ca, K, Mg, Zn) в зелёных мхах вблизи источника загрязнения также выше, чем на фоновой территории. Известно, что основными механизмами поглощения зелёными мхами минеральных элементов из окружающей среды являются улавливание взвешенных в атмосфере частиц с обменом ионов внутриклеточным поглощением, как и у лишайников, а также поглощение минеральных элементов из субстрата с помощью ризоидов [2]. Из кустарничков наиболее чувствительной к атмосферному воздействию оказалась черника, в листьях которой на стадии техногенного редколесья отмечены самые высокие концентрации поллютантов – Ni, Cu, Fe (табл. 1).

Таблица 2. Динамика элементного состава лишайников и листьев (хвои) растений в районе воздействия комбината «Печенганикель» мг кг⁻¹ абс. сух. вещества

Объект исследования	Год	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al	Fe	Zn	Cu	Ni
фон (44 км от комбината)												
сосна	1991	1577	4078	н.о.	813	478	н.о.	203	29	35	4	6
	2011	2460	4796	1713	1345	482	1020	234	46	42	5	11
лишайник	1991	160	481	н.о.	155	34	н.о.	141	242	10	18	20
	2011	393	1340	542	222	57	798	77	217	12	18	24
зеленые мхи	1991	2340	5588	н.о.	1097	255	н.о.	194	375	21	22	34
	2011	2719	5707	1412	1204	501	1159	210	103	28	21	33
дефолирующие леса (14 км от комбината)												
сосна	1991	1685	6394	н.о.	901	101	н.о.	171	158	31	18	31
	2011	2696	5666	2172	1326	623	1443	404	83	38	20	31
лишайник	1991	116	1223	н.о.	495	16	н.о.	486	1180	30	62	69
	2011	346	1840	790	315	51	893	146	974	25	147	178
зеленые мхи	1991	5517	6891	н.о.	1572	280	н.о.	753	2924	37	97	138
	2011	4817	615	1032	1318	509	1265	232	985	35	182	239
техногенные редколесья (5 км от комбината)												
сосна	1991	1678	7362	н.о.	838	147	н.о.	170	112	62	33	24
	2011	2987	6261	1761	1276	331	1823	250	168	35	36	46
зеленые мхи	2011	4041	7015	1322	1706	367	1854	207	1929	38	315	438

Примечание: здесь и в табл. 3, н.о. – не определяли

Снижение объемов выбросов загрязняющих веществ комбинатом «Североникель» за период 1991-2011 гг. обусловило уменьшение содержания основных элементов-загрязнителей в фотосинтезирующем аппарате сосны. В дефолирующих лесах снизилась концентрация меди в хвое, а никеля изменилась незначительно и в некоторых случаях осталась сопоставимой к уровню 1991 г. В техногенных редколесьях содержания тяжёлых металлов снизились более значительно. За исследуемый период в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях обнаружено снижение содержания железа в сосны в 2-4 раза, что также обусловлено сокращением объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Изменение уровня эмиссионной нагрузки на лесные фитоценозы за период

исследования привело к уменьшению в хвое элементов-загрязнителей за счёт уменьшения вклада фолиарного поглощения, но в отношении важнейших биогенных элементов позитивной динамики не обнаружено. В дефолирующих лесах хвоя сосны обедняется Ca, K, Mg, Al и Zn, в техногенном редколесье – Ca, Mg, Al (табл. 1). Содержания тяжёлых металлов в хвое сосны в районе комбината «Печенганикель» остаются весьма высокими. За исследуемый период (1991-2011 гг.) на расстоянии 5 км концентрации никеля и железа в хвое сосны возросли. На более удаленных от комбината пробных площадях (14 км) концентрация меди и никеля в хвое сопоставима с уровнем 1991 г., а содержание железа сократилось в 2-6 раза. На условно-фоновой территории (44 км) содержание меди в хвое осталось

на прежнем уровне, а никеля увеличилось почти в 2 раза (табл. 2). В 2011 г. в хвое обнаруживаются более высокие концентрации кальция и марганца. Сосна, как известно, является пионерным видом, может поселяться на обнаженных субстратах и получать элементы питания из минеральных горизонтов. В окрестностях комбината, где формируются техногенные редколесья, почвообразующие породы, содержащие габбро и габбронориты, обогащены основными катионами. Благодаря этому сосна в окрестностях комбината существенно не обедняется основными катионами и может содержать даже повышенные по сравнению с фоном концентрации кальция [1]. Содержание калия в хвое за исследуемый период несколько снизилось, что может быть обусловлено антагонистическим взаимодействием данного элемента с кальцием.

При техногенном воздействии поглощение элементов питания растениями во многом определяется минеральным составом почвы, процессами выщелачивания химических элементов из растительных тканей кислыми осадками; фоллярным поглощением загрязняющих веществ; антагонистическими отношениями между элементами и дисбалансом поглощения элементов из почвы. В условиях атмосферного загрязнения в дефолирующих лесах и техногенных редколесьях закономерности формирования

питательного режима почв нарушаются, что обусловлено разрушением существующих в природе взаимосвязей. В почвах древесных парцелл техногенных редколесий, где выявлены наиболее высокие потоки кислотообразующих веществ и тяжёлых металлов [1], а древесные растения сильно повреждены, отмечено возрастание содержания Ni, Cu, Fe, S (табл. 3). Одновременно органогенный горизонт почвы обедняется важнейшими минеральными элементами – Ca, Mg, Mn, Zn, K, P, необходимыми для поддержания сбалансированного минерального состава растений и соответственно нормального функционирования растительного организма, а значит, и лесного фитоценоза в целом. В техногенных редколесьях почва обедняется Mn и Zn, что обусловлено их замещением в почвенном поглощающем комплексе ионами водорода и алюминия и выносом из органогенного горизонта в результате интенсификации потока кислотообразующих веществ из атмосферы [1]. В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях концентрации практически всех доступных элементов питания (Ca, K, P, Mg, Mn, Zn) снижаются, что обусловлено затуханием процессов отмирания растительного органического вещества и реакциями замещения катионов протонами водорода и алюминия.

Таблица 3. Элементный состав органогенного горизонта почвы (A_0) сосновых парцелл, мг кг^{-1} абс. сух. вещества (комбинат «Североникель»).

Стадия сукцессии, км*	Год	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al	Fe	Zn	Cu	Ni
Ф, 270 км	1991	1553	1417	256	403	89	79	н.о.	6	11	1	1
	2007	2161	805	180	259	93	122	47	7	21	1	1
Д, 31 км	1991	787	246	27	61	90	87	215	34	8	89	58
	2007	1419	263	113	151	127	73	192	19	19	58	80
Р, 8 км	1991	919	191	32	126	31	134	87	44	11	300	348
	2007	1010	315	45	127	32	117	73	166	10	917	287

Примечание: Ф – фоновые леса; Д – дефолирующие леса; Р – техногенные редколесья, * км – расстояние от комбината

Выводы: долговременные наблюдения в зоне влияния горно-металлургических предприятий показали, что в настоящее время в почве сохраняются высокие концентрации элементов-загрязнителей. В большинстве случаев их содержание остаётся либо сопоставимым с 1991-1993 гг., либо их концентрации даже возрастают. В сосновых редколесьях содержание Ni сопоставимо с уровнем накопления в начале 90-х г. XX в., но существенно возросла концентрация Cu. Содержание поллютантов в фотосинтезирующем аппарате растений и талломах лишайников также остаются высокими. В зоне воздействия комбината «Печенганикель» лишайники и зелёных мхи стали накапливать даже больше тяжёлых

металлов по сравнению с уровнем 1991-1993 гг. В хвое сосны вблизи комбината также отмечено возрастание аккумуляции Ni и Cu. Некоторые позитивные изменения выявлены в окрестностях комбината «Североникель», где за исследуемый период отмечено снижение Cu, Ni, Fe и S в растениях и лишайниках. Одновременно ассимилирующие органы продолжают обедняться важнейшими элементами питания (Ca, Mg, Mn, Zn), необходимыми для нормального функционирования организмов.

Работа выполнена при поддержке Программы РАН «Биологическое разнообразие»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лукина, Н.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты / Н.В. Лукина, В.В. Никонов. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1998. 316 с.
2. Рассеянные элементы в бореальных лесах. / Под ред. А.С. Исаева. – М.: Наука, 2004. 616 с.
3. Сухарева, Т.А. Изменения в минеральном составе растений при уменьшении эмиссионной нагрузки на лесные экосистемы // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды. Материалы Международной конференции (Петрозаводск, 20-24 июня 2011 г.). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. С. 331-335.
4. Rìgina, O. Introduction into the environmental problems in the Kola Peninsula // Detection of pollution-induced forest decline in the Kola Peninsula using remote sensing and mathematical modeling. Licentiate Thesis. Raport/report 9. – Swedish University of Agricultural Sciences, 1998. P. 8-34.
5. Rùhling, A. Sorption and retention of heavy metals in the woodland moss *Hylocomium splendens* / A. Rùhling, G. Tyler // Oikos. 1970. Vol. 21. P. 92-97.

**ASSESSMENT THE PINE FORESTS STATE IN ZONE OF
COPPER-NICKEL ENTERPRISES INFLUENCE
AT EMISSION LOADING REDUCTION**

© 2013 Т.А. Sukhareva

Institute of Industrial Ecology Problems at the North KSC RAS, Apatity

The analysis of long-term (1991-2011) changes in mineral structure of plants, lichens, soils at pine forests of Kola Peninsula in a zone of influence of mining and metallurgical enterprises is made. It is shown that the maintenance of pollutants in soil-vegetable cover remain high, despite decrease in level of atmospheric emissions. The most sensitive to technogenic influence there are green mosses and lichens.

Key words: *pine forests, atmospheric pollution, Kola Peninsula, soil, plants, lichens, element structure*