

5. Зубарева О.Н., Скрипальщикова Л.Н., Перевозникова В.Д. Аккумуляция пыли компонентами березовых фитоценозов в зоне воздействия известняковых карьеров // Экология. 1999. № 5. С. 339–343.
6. Еремин В.М. Анатомия коры видов рода *Pinus* Советского Союза // Бот. журн. 1978. Т. 63. № 5. С. 649–663.
7. Чавчавадзе Е.С., Умаров М.У., Волкова С.Б. Влияние техногенного загрязнения атмосферы на структуру древесины *Salix caprea* L. и *Betula tortuosa* Ledeb. // Раст. ресурсы, 2002. Вып. 4. С. 104–111.
8. Таран И.В. Рекреационные леса Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1985. 228 с.
9. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска. Новосибирск, Академическое изд-во Гео, 2009. 179 с.
10. Яценко-Хмелевский А.А. Основы и методы анатомического исследования древесины. М.-Л., Изд-во АН СССР. 1954. 337 с.

THE CHANGES IN THE MINERAL COMPOSITION OF PLANT BY DECREASING EMISSION LOAD ON FOREST ECOSYSTEMS

Sukhareva T.A.

Institute of the North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia
E-mail: sukhareva@inep.ksc.ru

Abstract. The results of long-term investigations (1991–2007) of foliar mineral composition of dominant plant boreal pine forests under conditions of air borne industrial pollution from the copper-nickel smelter «Severonickel» are discussed. Near the source of pollution the leaf has increased copper, nickel, ferrum concentrations and decreased concentrations of biophil-elements (Ca, K, Mg, Mn). Owing to the reduction in total emissions to the atmosphere (by 3–5 times for 20 years) the concentrations of main pollutants (S, Cu, Ni, Fe) in the assimilating organs became lower, but contents some nutrients reach the deficiency level (K, P, Mg, Mn, Zn).

ИЗМЕНЕНИЯ В МИНЕРАЛЬНОМ СОСТАВЕ РАСТЕНИЙ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ЭМИССИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Сухарева Т.А.

Учреждение Российской академии наук Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, 184209, Апатиты, Мурманская обл., ул. Академгородок, 14а, E-mail: sukhareva@inep.ksc.ru

Важным фактором, определяющим нормальный рост и развитие растений, является сбалансированность их минерального состава. В условиях атмосферного загрязнения в результате фолиарного 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 является комбинат «Североникель», функционирующий с 1938 г. Долговременное техногенное воздействие привело к значительным нарушениям функционирования лесных экосистем, в т. ч. минерального питания растений.

Целью исследования явилось изучение многолетней динамики минерального состава листьев доминирующих растений древесного, кустарничкового и лишайникового ярусов в процессе техногенной дигрессии северотаёжных лесов.

Исследования проведены в период с 1991 по 2007 гг. минерального состава листьев (хвои) растений в сосняках кустарничково-лишайниковых, формирующихся в сходных природных условиях, но испытывающих разную эмиссионную нагрузку в районе воздействия комбината «Североникель». По данным ОАО «Кольская ГМК» [2], за исследуемый период атмосферные выбросы SO₂ и тяжёлых металлов (Ni, Cu, Cd и др.) комбинатом сократились в 3–5 раз. В условиях атмосферного загрязнения выделены следующие основные стадии дигрессии лесных экосистем: фоновые леса (Ф), дефолирующие леса (Д) и техногенные редколесья (Р) [3]. Изучение проводили на 4 постоянных пробных площадках, по градиенту промышленного загрязнения, в сосновых лесах (8 (Р), 31 (Д), 48 (Д) и 270 (Ф) км от комбината). Образцы хвои отбирали на каждой площадке в 5-кратной повторности из верхней

трети кроны, черники, брусники, вороники и лишайника *Cladina stellaris* в 3-кратной повторности в межкрупных пространствах. В лабораторных условиях хвою разбирали по возрастным классам. У брусники и вороники анализировали листья текущего года. Металлы (Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu, Ni, Zn) определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии, S, P – колориметрически.

Сосна обыкновенная. Сосна является одной из основных лесообразующих пород на территории Мурманской области и благодаря чувствительности к изменению условий произрастания широко используется в экологических исследованиях. Минеральный состав фотосинтезирующих органов сосны в условиях атмосферного загрязнения претерпевает значительные изменения (табл.1). При приближении к источнику техногенного загрязнения в сосновой хвое многократно увеличивается содержание меди, никеля, железа. Максимальные концентрации перечисленных элементов отмечены в хвое техногенных редколесий. Аккумуляция тяжелых металлов в ассимилирующих органах обусловлена как корневым и фоллиарным поглощением, так и простым осаждением на поверхность растений из атмосферы. При техногенном воздействии концентрация серы в хвое сосны превышает фоновые значения примерно в 2 раза, максимум отмечен в техногенных редколесьях. Концентрации Mn и Zn в хвое постепенно снижаются в процессе дигрессионной сукцессии.

Таблица 1. Содержание минеральных элементов в хвое сосны текущего года по градиенту загрязнения от комбината «Североникель» в разные периоды исследования, мг/кг

Элемент	1991–1993				2005–2007		
	Ф	Д		Р	Д		Р
	260 км	48 км	31 км	8 км	48 км	31 км	8 км
Ca	1512	1901	3293	2910	948	1227	2095
K	5725	4743	7208	7067	5707	6367	7038
P	1382	1651	1691	1791	1869	1574	1576
Mg	977	1052	1148	983	878	870	880
Mn	365	393	474	306	266	402	214
S	603	н.о.	1103	1268	583	708	785
Al	148	288	281	221	238	130	188
Fe	22	43	51	81	24	23	35
Zn	30	35	37	20	28	25	19
Ni	1	12.7	24	101	6	22	59
Cu	2	10.0	16	69	7	10	28

Примечание: здесь и в табл.5 н.о. – не определяли

В связи с сокращением выбросов загрязняющих веществ в районе исследования в последние 15–20 лет особый интерес представляет не только пространственная, но и временная (многолетняя) динамика минерального состава растений. За исследуемый период произошли некоторые изменения в элементном составе хвои. Снизились концентрации основных поллютантов (S, Cu, Ni, Fe). В 2005–2007 гг. содержание серы в ассимилирующих органах не превышало критических значений, установленных для районов с низкой обеспеченностью азотом (<900 мг/кг) [7] на всех изучаемых объектах. В дефолирующих лесах концентрация меди в хвое снизилась ($p < 0,05$), а никеля изменилась незначительно и в некоторых случаях осталась сопоставимой с уровнем 1991–1993 гг. В техногенных редколесьях выявлено достоверное снижение содержания меди и никеля. Содержание железа снижается примерно в 2 раза, но превышение фоновых значений сохраняется. Изменение уровня эмиссионной нагрузки на лесные фитоценозы за период исследования привело к уменьшению в хвое элементов-загрязнителей за счёт уменьшения вклада фоллиарного поглощения, но в отношении важнейших биогенных элементов позитивной динамики не обнаружено. В дефолирующих лесах хвоя сосны обедняется Ca, K, Mg, Al и Zn, хотя в техногенном редколесье концентрации остаются на прежнем уровне.

При этом следует заметить, что наиболее выраженное снижение подвижных элементов Mg, K и P наблюдалось в многолетней хвое, что объясняется их активной ретранслокацией в растущие ткани не только в фенологические сроки [3]. В хвое текущего года не всегда можно диагностировать низкую обеспеченность элементами питания, способными к ретранслокации из многолетних органов. Это подтверждают наши исследования мобильных элементов в хвое старших возрастных классов. В многолетней хвое содержание калия, фосфора, магния, цинка за период исследования

уменьшилось. На стадии техногенных редколесий перечисленные элементы становятся дефицитными. В дефолирующих лесах снизилась концентрация калия в хвое сосны ($p < 0,0001$) и не превышает в среднем 4000 мг/кг, что соответствует уровню дефицита [6]. В техногенных редколесьях многолетняя хвоя сосны обедняется калием и фосфором ($p < 0,01$). За исследуемый период (1991–2007) на всех стадиях техногенной дигрессии в многолетних фотосинтезирующих органах значительно ($p < 0,01$) снизилась концентрация магния: в хвое ели дефолирующих лесов с 767 до 348 мг/кг, техногенных редколесий – с 772 до 385 мг/кг, т. е. более чем в 2 раза.

Черника. В условиях сильного атмосферного загрязнения листья черники накапливают в 2–3 раза больше никеля и меди, чем брусника и вороника. Способность листьев поглощать тяжёлые металлы зависит от их анатомо-морфологических особенностей: сложные листья с большой поверхностью, опушённые или шероховатые накапливают больше металлов, чем простые, мелкие, гладкие, с восковым слоем [4, 5]. В листьях черники не обнаружено достоверных различий по содержанию никеля и меди по двум периодам наблюдений (табл. 2). Содержание серы в листьях черники также сопоставимо с уровнем 1991–1993 гг., остаётся весьма высоким и почти в 2 раза превышает региональный фон. Содержание железа за исследуемый период снизилось у черники только техногенных редколесий. Кроме того, в питательном режиме проявляются негативные изменения, выражающиеся в обеднении листьев многими необходимыми для нормального функционирования растительного организма элементами питания. В 2005–2007 гг. по сравнению с предыдущим периодом в листьях черники снизилось ($p < 0,05$) содержание кальция и марганца на всех стадиях техногенной дигрессии сосновых лесов.

Таблица 2. Минеральный состав листьев черники, мг/кг

Элемент	1991–1993			2005–2007	
	Ф	Д	Р	Д	Р
	260 км	31 км	8 км	31 км	8 км
Ca	8601	10161	8248	9152	7332
K	6534	8937	13012	5377	7734
P	1526	1369	1376	1572	1351
Mg	2489	2038	917	1992	897
Mn	1301	2607	2457	2338	1380
S	1151	1608	1531	1746	1477
Al	177	121	136	160	176
Fe	71	41	120	45	92
Zn	15	7	7	12	11
Ni	2	23	144	28	177
Cu	4	13	65	9	49

Брусника. В листьях брусники за исследуемый период снизилось содержание Ni, Cu, Fe (табл. 3). В накоплении серы не обнаружено достоверных изменений по двум периодам исследования. На стадии дефолирующих лесов (31 км) и редколесья значительно снижается содержание алюминия в отличие от черники, в листьях которой обнаружены более высокие концентрации Al в 2005–2007 гг. По сравнению с началом 90-х гг. брусника обедняется такими макроэлементами, как кальций и магний. В листьях кустарничков рода *Vaccinium* происходит достоверное снижение содержания калия ($p < 0,01$). Черника и брусника являются концентраторами марганца, поэтому снижение содержания данного элемента в их листьях менее существенно. Содержание фосфора, напротив, возрастает.

Вороника. В 2005–2007 гг. в листьях вороники снижается содержание основных поллютантов (Ni, Cu, Fe) (табл. 4). Достоверных изменений в содержании серы не обнаружено. На всех стадиях техногенной дигрессии отмечается уменьшение концентрации кальция от уровня 1991–1993 гг., но его содержание находится в пределах природного варьирования. Кроме того, происходит также существенное снижение Mn: в дефолирующих лесах – в 2–3 раза, в техногенных редколесьях – в 3–4 раза. Аккумуляция магния уменьшилась в дефолирующих лесах, а редколесье осталась сопоставимой за исследуемый период. В отношении фосфора и алюминия обнаружены сходные тенденции с брусникой: значительно увеличивается содержание фосфора и снижается алюминия как в дефолирующих лесах, так и в техногенном редколесье. В листьях вороники наряду с калием, возрастает содержание ещё одного мобильного элемента – фосфора.

Таблица 3. Минеральный состав листьев брусники, мг/кг

Элемент	Ф	1991–1993			2005–2007		
		Д		Р	Д		Р
	260 км	48 км	31 км	8 км	48 км	31 км	8 км
Ca	4654	8040	7759	6283	5942	5296	5046
K	4169	3922	6793	7338	3864	3461	4149
P	1101	638	727	798	1153	1004	984
Mg	1349	1937	1614	1364	1159	1410	1028
Mn	864	1417	1094	740	1112	984	743
S	949	860	1286	1324	1383	1787	1079
Al	56	105	152	116	96	33	62
Fe	25	13	25	43	23	17	38
Zn	23	26	15	13	23	13	21
Ni	1	2	19	79	7	13	42
Cu	5	5	10	33	5	5	10

Таблица 4. Минеральный состав листьев вороники, мг/кг

Элемент	Ф	1991–1993			2005–2007		
		Д		Р	Д		Р
	260 км	48 км	31 км	8 км	48 км	31 км	8 км
Ca	5856	9933	6721	5889	6174	4934	5129
K	5985	4663	5009	5192	5811	6020	6566
P	1448	920	698	468	1399	1423	1392
Mg	1733	2331	1126	1066	1341	1355	1086
Mn	351	1029	404	191	253	183	60
S	1033	819	964	881	971	1138	1004
Al	36	83	136	434	44	20	13
Fe	41	105	178	778	36	31	41
Zn	18	13	8	13	12	12	10
Ni	2	9	107	97	13	15	53
Cu	7	27	67	62	3	7	13

Лишайники. Лишайникам в отличие от выше рассмотренных видов сосудистых растений присуща атмосферная стратегия питания, что позволяет их использовать как информативных биоиндикаторов для оценки региональных атмосферных нагрузок и миграции атмосферных загрязнителей [8]. При аэротехногенном воздействии лишайники заметно обогащаются элементами загрязнителями по сравнению с другими видами растений. Это обусловлено тем, что обмен элементов у лишайников осуществляется через всю поверхность их талломов [1]. Степень аккумуляции тяжёлых металлов лишайниками гораздо выше, чем у сосны и кустарничков. Превышение по сравнению с другими видами составляет 3–8 раз. Анализ лишайников, отобранных в 1993 и 2007 гг. в дефолирующих лесах, расположенных в 48 км от источника загрязнения, показал снижение содержания меди в 8 раз, железа в 5 раз, никеля почти в 2 раза (табл. 5). Лишайники меньше стали накапливать калия, магния, алюминия и цинка и, напротив, больше кальция и марганца.

Таблица 5. Минеральный состав лишайников, мг/кг

Расстояние от источника	Год	Ca	K	P	Mg	Mn	S	Al	Fe	Zn	Cu	Ni
Ф, 260 км	2007	393	1223	379	183	76	224	111	125	11	2	1
Д, 48 км	1993	122	1141	н.о.	224	20	н.о.	453	1229	23	81	45
	2007	255	735	261	127	32	213	286	258	11	10	24
Д, 31 км	2007	433	1294	559	169	89	221	192	155	20	33	93

Таким образом, воздействие на лесные экосистемы газовоздушных выбросов промышленных предприятий вызывает ряд сходных изменений в элементном составе различных видов растений. Наблюдается многократное возрастание поллютантов в листьях растений и обеднение их многими важнейшими для функционирования растений элементами. Наибольшую чувствительность к атмосферному воздействию демонстрируют лишайники, в талломах которых обнаруживаются более высокие концентрации Ni, Cu,

Fe, а на стадии техногенного редколесья исследуемый вид *Cladina stellaris* отсутствует. Черника также является весьма чувствительной к атмосферному воздействию и накапливает больше поллютантов, чем другие виды кустарничков. Сравнительная оценка минерального состава листьев (хвои), выполненная в период с 1991 по 2007 гг., выявила снижение концентраций никеля, меди, железа, в отдельных случаях серы в доминирующих растениях сосновых лесов Мурманской области. Наиболее очевидные изменения химического состава наблюдаются в сосновых редколесьях, где отмечаются наиболее высокие уровни эмиссионной нагрузки на лесные экосистемы. Вместе с тем снижение концентрации основных поллютантов не оказало положительного влияния на другие параметры минерального питания: сохраняется недостаточная обеспеченность элементами питания, некоторые элементы становятся дефицитными. Значительные нарушения минерального питания растений в районе воздействия горно-металлургического производства, несмотря на снижение уровня атмосферных выбросов, обусловлено значительным нарушением питательного режима почв, в которых сохраняются экстремально высокие концентрации загрязняющих веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Научный мир, 2002. 336 с.
2. Ежегодник Кольской ГМК. 2007. № 5. 87 с.
3. Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 1998. 316 с.
4. Парибок Т.А. Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. С.82–99.
5. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжёлым металлам. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 172 с.
6. Huettl R.F. Mg deficiency – a «new» phenomenon in declining forests – symptoms and effects, causes, recuperation // Forest Decline in the Atlantic and Pacific Region / Huettl and Mueller. Dombois (Eds.). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993. P. 97–114.
7. Manninen S., Huttunen S., Rautio P., Perämäki P. Assessing the critical level of SO₂ for Scots pine in situ // Environ. Pollut. 1996. Vol. 93. № 1. P. 27–38.
8. Puckett K.J. Bryophytes and lichens as monitor of metal deposition // Lichens, bryophytes and air quality / Ed. T.H.Nash, V.Wirth. B.; Stuttgart, 1988. P. 231–267.

EFFECTS OF SHORT-TERM AND LONG-TERM LOW TEMPERATURE TREATMENTS ON THE NET-PHOTOSYNTHESIS OF CUCUMBER

Sysoeva M.I., Ikkonen E.N., Sherudilo E.G.

Institute of Biology KRC RAS, Pushkinskaya St. 11, Petrozavodsk, 185910, Russia, Phone +7 (8142) 76-27-12,
E-mail: likkonen@gmail.com

Abstract. The effects of long-term and short-term low temperature treatments on the photosynthesis of young cucumber plants (*Cucumis sativus* L.) have been studied. The long-term low temperature decreased the intensity of cucumber leaves net-photosynthesis. Short-term temperature drop increased net-photosynthesis of cucumber leaves in the range of high temperatures under the low light intensities and in the range of high temperatures under the low light intensities in compare with control plant leaves. It is concluded that temperature drop enhanced cucumber plant photosynthetic ability to adapt.

ВЛИЯНИЕ КРАКОВРЕМЕННЫХ И ДЛИТЕЛЬНЫХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА НЕТТО-ФОТОСИНТЕЗ ЛИСТЬЕВ ОГУРЦА

Сысоева М.И., Икконен Е.Н., Шерудило Е.Г.

Институт биологии КарНЦ РАН, 185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11, Тел.: (8142) 76-27-12
E-mail: likkonen@gmail.com

Влияние постоянных низких температур на фотосинтез растений достаточно хорошо изучено. В частности, показано, что фотосинтез огурца – типичного представителя теплолюбивых растений,