

УДК 581.52 + 582.475 + 504.5 : 546.3

## ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНЫХ ВЫБРОСОВ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА НА ЖИЗНЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДРОСТА СОСНЫ В ИЛЬМЕНСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ЗАПОВЕДНИКЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2014 А.Г. Мумбер, О.Е. Чащина, Н.Б. Куянцева, А.Б. Потапкин

Ильменский государственный заповедник УрО РАН

Поступила в редакцию 12.05.2014

С помощью индикационных приемов дана комплексная оценка воздействия выбросов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) на состояние подростка сосны в Ильменском заповеднике. Многолетние побеги сосны накапливают большие концентрации тяжелых металлов и являются более точными индикаторами для экспресс-диагностики состояния окружающей среды.

Ключевые слова: *сосна обыкновенная Pinus sylvestris, подрост, промышленное загрязнение, тяжелые металлы, Карабашский медеплавильный комбинат, биоиндикация, Южный Урал*

В связи с активно происходящим процессом трансформации естественного растительного покрова многократно возрастает роль особо охраняемых природных территорий (ООПТ), в задачи которых входит длительная инвентаризация биологического разнообразия, организация наблюдений за природными экосистемами и их охрана. Территория Ильменского гос. заповедника (ИГЗ) более 90 лет изъята из хозяйственной деятельности. Она включает эталонные для своей природной зоны сообщества. Однако с прекращением распространенных таких форм природопользования как: рубка леса, промысел, собирательство, массовый выпас и сенокошение, антропогенные воздействия сохранились. Наиболее интересным нам представлялось проанализировать влияние на растительный покров заповедника факторов, не зависящих от режима даже самой строгой охраны, например, нахождение в непосредственной близости крупных промышленных предприятий и их токсических выбросов.

На территории ИГЗ преобладает лесная растительность (лесопокрытая площадь составляет 81%), на долю сосняков приходится 55%. Объектом для сравнения послужил Карабашский медеплавильный комбинат (КМК), загрязняющий окружающую среду сернистым ангидридом

и полиметаллической пылью. Столетняя производственная деятельность сформировала вокруг завода техногенную пустошь с деградированной растительностью и почвенным покровом. Воздействие аэротехногенного переноса на ИГЗ выявлено при исследовании характера распределения тяжелых металлов в снеговом покрове, поверхностных водах и донных отложениях. Состояние лесных сообществ изучено недостаточно.

Для территории исследования характерна неоднородная роза ветров: 28% воздушных масс переносится в восточном направлении, 17% – северо-восточном, 15% – северном, 5% – северо-западном, 15% – юго-восточном, 9% – южном, 7% – юго-западном, 4% – западном [2]. Сернокислотному влиянию выбросов КМК подвержены, в соответствии с розой ветров, непосредственно г. Золотая в наибольшей степени и северо-западный склон Ильменского хребта [8].

**Цель исследования:** с помощью биоиндикационных методов дать комплексную оценку воздействия аэротехногенного переноса КМК на состояние подростка сосны в Ильменском заповеднике.

**Методика исследований.** Заложены 11 постоянных пробных площадей (ППП) в сосновых лесах зеленомошной группы типов леса (ТЛУ 2) разнотравно-злаковых и черничных размером 20 x 20 м в южном направлении от источника загрязнения: 1-5 ППП – на территории КМК, 6-11 ППП – в районе ИГЗ. Для характеристики древостоев использованы стандартные таксационные описания (табл. 1). Отбор растительных и почвенных проб проведен в соответствии с ГОСТ 17.4.02-84, ГОСТ 28168-89.

*Мумбер Александр Геннадьевич, старший инженер. E-mail: silver@mineralogy.ru*

*Чащина Ольга Евгеньевна, кандидат биологических наук, ученый секретарь. E-mail: sh-ch@mail.ru*

*Куянцева Надежда Борисовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник. E-mail: borisovna@mineralogy.ru*

*Потапкин Андрей Борисович, старший инженер*

Концентрации металлов определяли на атомно-абсорбционных спектрометрах Aanalyst 400 (PerkinElmer) с пламенной атомизацией (Fe, Cu, Zn) и Aanalyst 300 (PerkinElmer) с графитовой печью HGA-850 (Pb, Cd). Лаборатория, в которой выполняли измерения, сертифицирована: аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.514536. Градиент ухудшения условий роста выстраивали на основе накопления тяжелых

металлов (ТМ) в пробах почв и растительных образцах (табл. 2) и выражали через коэффициент суммарной токсической нагрузки  $K_i$  [1]. В основу работы положен принцип сравнительного анализа нарушенных и эталонных для данной природной зоны фитоценозов с целью выявления процессов изменения растительности под воздействием антропогенных факторов [3].

**Таблица 1.** Таксационные характеристики сосновых древостоев на ППП

№ ПП П	Расстояние до источника выбросов, км	Высота над уровнем моря, м	Состав древостоя	Сомкнутость	Средний возраст, лет	CV, %	Возрастной интервал, лет	Средний диаметр стволов, см	CV, %	Повреждаемость древостоя
1	6,73	349	6С4Б	0,6	94,8 ±2,9	7,0	84-101	30,0 ± 1,7	13,3	с.повр
2	3,62	330	7С3Б	0,6	109,5 ±11	24,7	94-121	28,4 ± 1,9	15,2	повр
3	6,79	393	8С2Б	0,5-0,6	97,0±7,1	17,7	92-100	25,0 ± 1,1	10,6	повр
4	5,65	322	9С1Б	0,5-0,6	88,4 ±1,9	4,9	85-96	26,4 ± 1,1	9,8	с.повр
5	8,67	335	10С+Б	0,5	89,8 ±1,5	3,8	85-94	24,6 ± 1,0	9,1	с.повр
6	16,51	367	10С	0,6	112,6 ±2,3	4,7	112-120	28,0 ± 1,0	8,7	повр
7	20,83	362	10С	0,7	105,4 ±1,9	4,0	101-112	27,2 ± 1,5	12,3	повр
8	48,54	319	9С1Б	0,6-0,7	147,2 ±9,8	14,8	111-170	39,2 ± 0,8	6,1	повр
9	48,07	322	10С+Б	0,6	79,6 ±2,0	5,7	76-86	26,0 ± 0,8	7,6	повр
10	32,50	314	10С+Б	0,6	157,4 ±3,7	5,3	144-165	27,0 ± 0,8	7,4	повр
11	32,84	336	10С+Б	0,6	73,6±1,7	5,4	69-79	27,2 ± 1,0	8,3	повр

*Примечание:* CV – коэффициент вариации; с.повр – сильно поврежденный; повр – поврежденный древостой

Изучена морфология годичных (двухлетних и трехлетних) побегов виргинильных особей сосны в градиенте токсической нагрузки, для чего с каждой ППП взяты по 6 побегов с 3-х модельных растений. Оценены возраст подроста, высота (см); отдельно для хвои двухлетнего и трехлетнего года жизни определены количество пар хвоинок, количество пар хвоинок на 1 см, длина хвоинок (мм), длина побега (см). В качестве объектов для виталитетного анализа подростов сосны на ППП использовали растения одного возрастного состояния, которые относили к высшему (а), промежуточному (в) и низшему (с) классам виталитета. По характеру распределения полученных групп составляли виталитетные спектры, позволившие ранжировать исследованные ценопопуляции (ЦП) на процветающие, равновесные и депрессивные [4]. С использованием выравнивания средних значений параметров по ЦП методом взвешивания оценивали индекс виталитета ценопопуляций (IVC), коэффициент жизнестойкости (Q) и коэффициент степени процветания (q) [4, 5]. Для оценки благоприятности условий местообитаний применяли интегральный показатель эффективности вегетативного роста [6]. Диапазон варьирования каждого признака разбивали на 5 классов с одинаковым

объемом по равномерной шкале (табл. 3, 4). Номеру класса по порядку соответствовала величина балла. Оценка состояния ЦП проводилась при суммировании балльных значений всех признаков (табл. 5). Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программ «STATISTICA 6,0» и «MS EXCEL».

**Таблица 2.** Характеристика суммарной токсической нагрузки на ППП

№ ППП	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
1	17,61	16,38	14,96	8,88
2	24,58	6,47	7,74	8,59
3	17,09	4,35	4,27	12,03
4	28,97	11,66	12,31	17,47
5	11,68	6,90	7,17	9,60
6	3,98	3,33	3,23	6,30
7	3,68	3,04	3,14	6,79
8	1,32	1,18	1,09	1,72
9	1	1	1	1
10	1,22	1,46	1,13	0,85
11	1,78	1,64	1,29	6,25

*Примечание:*  $K_1$  – кора сосны,  $K_2$  – двухлетние иглы сосны,  $K_3$  – трехлетние иглы сосны,  $K_4$  – водорастворимые микроэлементы в пробах почв

**Таблица 3.** Балловые оценки величины морфометрических признаков двухлетних побегов *Pinus sylvestris*

Баллы	Длина побегов, см	Количество пар хвоинок, шт	Количество пар хвоинок на 1 см	Длина хвоинок, мм
1	2,5-4,9	12,0-33,6	0,8-7,94	9,0-21,6
2	5,0-7,3	33,7-55,2	7,95-15,08	21,7-34,2
3	7,4-9,7	55,3-76,8	15,09-22,22	34,3-46,8
4	9,8-12,1	76,7-98,4	22,23-29,36	46,9-59,4
5	12,2-14,5	98,5-120,0	29,37-36,5	59,5-72,0

**Таблица 4.** Балловые оценки величины морфометрических признаков трехлетних побегов *Pinus sylvestris*

Баллы	Длина побегов, см	Количество пар хвоинок, шт	Количество пар хвоинок на 1 см	Длина хвоинок, мм
1	1,5-3,9	4,0-18,0	0,16-3,44	5,0-18,6
2	4,0-6,3	19,0-32,0	3,45-6,5	18,7-32,2
3	6,4-8,7	33,0-46,0	6,6-9,5	32,3-44,8
4	8,8-11,1	47,0-60,0	9,6-12,5	44,9-58,4
5	11,2-13,5	61,0-74,0	12,6-15,5	58,5-72,0

**Таблица 5.** Оценка величины признаков в баллах исследованных ЦП, индекс виталитета ЦП (IVC) *Pinus sylvestris* по двухлетним (А) и трехлетним побегам (Б) в градиенте химического загрязнения

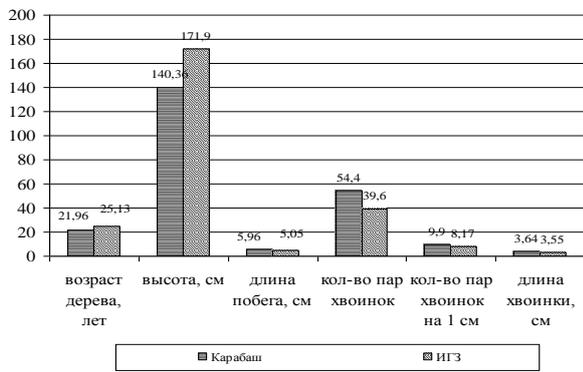
№ ППП	Длина побега, см		Количество пар хвоинок, шт		Количество пар хвоинок на 1 см		Длина хвоинок, мм		Общая сумма баллов		IVC	
	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б	А	Б
1	2	2	1	2	1	2	2	3	6	9	3,6	2,73
2	2	3	2	2	1	2	4	4	9	11	4,32	3,14
3	1	2	3	4	3	4	3	3	10	13	4,8	3,9
4	1	2	1	2	1	2	2	3	5	9	3,16	2,69
5	3	2	3	4	2	3	2	3	10	12	6,1	3,46
6	1	1	1	2	2	2	3	3	7	8	3,56	2,48
7	2	2	2	2	1	1	2	3	7	8	3,4	2,26
8	2	3	2	2	1	2	4	4	9	11	4,34	3,17
9	2	4	2	5	2	2	2	4	8	15	4	4
10	1	1	2	2	2	3	2	3	7	9	3,54	2,94
11	1	2	2	2	2	2	2	3	7	9	3,38	2,95

**Обсуждение результатов.** Самые высокие концентрации токсикантов выявлены в длительно существующих частях деревьев: в коре и в трехлетних иглах. Средний возраст сосновых насаждений в зоне действия КМК составляет в среднем 95,9, для территории ИГЗ – 112,6 лет; средний диаметр стволов в лесах г. Карабаша равен 26,9 см, в заповеднике – 29,1 см. Наибольшие значения CV для определения текущего радиального прироста сосны установлены для территории КМК, что является показателем нестабильности среды.

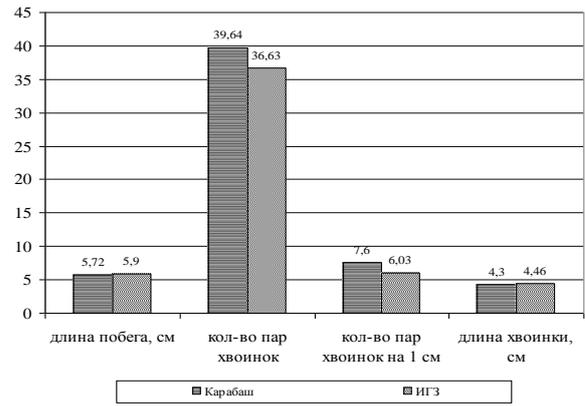
Для оценки влияния аэротехногенного переноса на состояние морфоструктуры побеговой системы сосны (рис. 1) проведен анализ изменения средних значений длины двух- и трехлетней

хвои на ППП (сообщества объединили в 2 группы: КМК и ИГЗ). Возраст и высота подроста сосны на территории ООПТ характеризуются большими значениями, однако все остальные признаки у молодых деревьев лучше развиты на ППП в районе г. Карабаш за исключением трехлетней хвои. Показано, что длительное воздействие загрязнения вызывает уменьшение линейных параметров фотосинтезирующих органов, которое связывают с негативным воздействием ТМ на растяжение клеток вследствие нарушения эластичности клеточных стенок и уменьшения оводненности тканей. Однако снижение плотности охвоения (облиствения) побегов в кроне по мере удаления от источника загрязнений показано для многих пород [9]. Больше количество

пар хвоинок на годичном побеге и количество пар хвоинок на 1 см, отмеченные в сосняках территории КМК, возможно представляют собой эффекты ксерофитизации, связанной с осветлением полога (меньшие значения сомкнутости, в среднем 0,5), или проявление «физиологической сухости», вызванной сернокислотными выбросами. Средний прирост в высоту у молодых деревьев в Карабаше составляет 6,39 см (в диапазоне 4,27-7,45 см), в ИГЗ равен 6,84 см (5,5-9,4 см). Сравнение с данными 20-летней давности [7] показывает, что изученные характеристики сосняков для зоны воздействия КМК сохранились на неизменном уровне, несмотря на уменьшение объемов производства.



А)

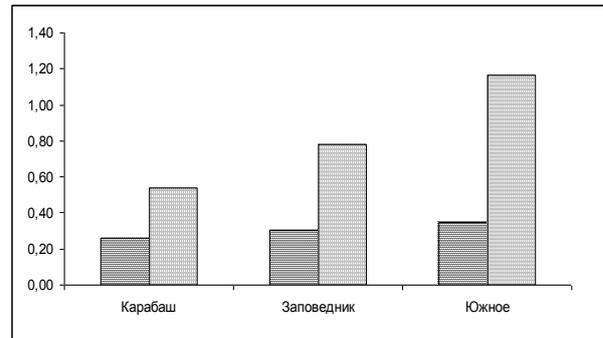
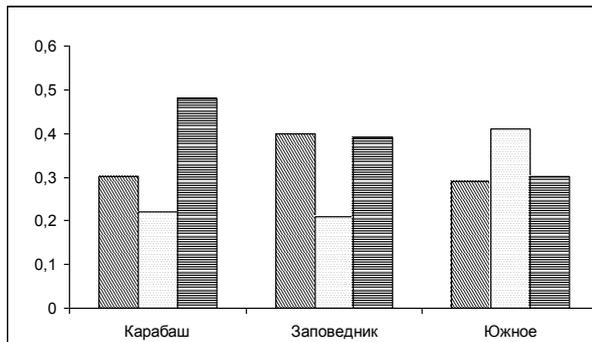


Б)

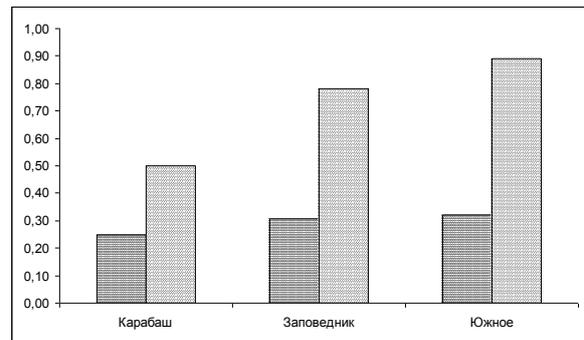
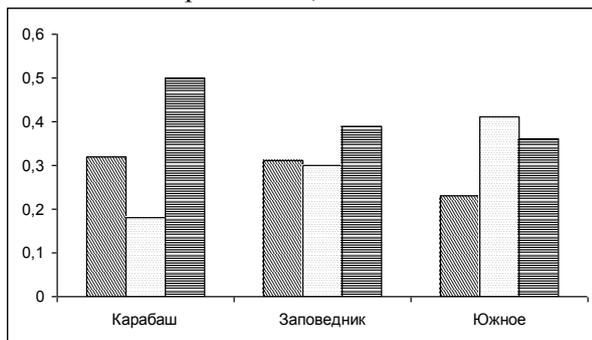
Рис. 1. Морфология побеговой системы сосны на ППП: А) 2-х- летние побеги, Б) 3-х - летние побеги

Так, содержание пыли в выбросах КМК уменьшилось в 4,9 раз (на 2003 г.), а SO<sub>2</sub> в 2,88 раза. В связи с тем, что К<sub>i</sub>, рассчитанные на основе содержания ТМ в разных частях растений, различаются, то и ранги ППП в рядах уменьшения загрязнения при сравнении средних показателей отдельных параметров сосновых древостоев не всегда совпадают. Поэтому при построении виталитетных спектров пробные площади были разделены на три группы: КМК (ППП № 1-5), ИГЗ (ППП № 6-11) и Южное лесничество (ППП № 8, 9), расположенные дальше всех от источника загрязнения.

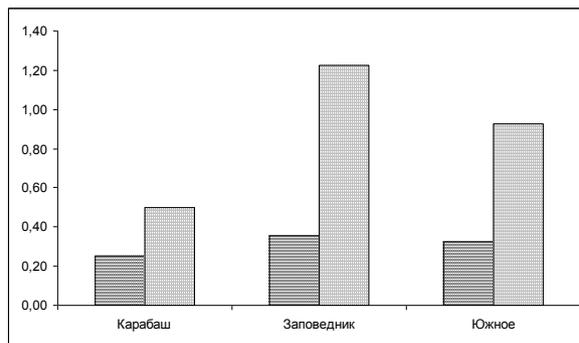
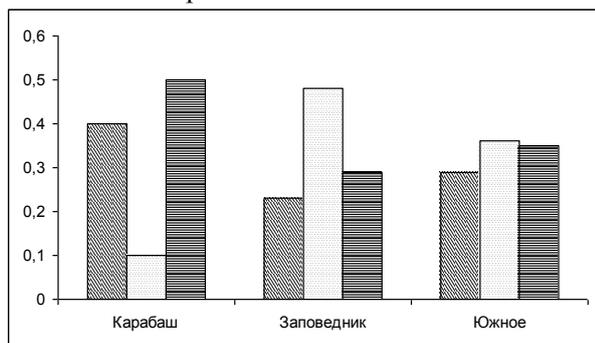
Длина побега, см



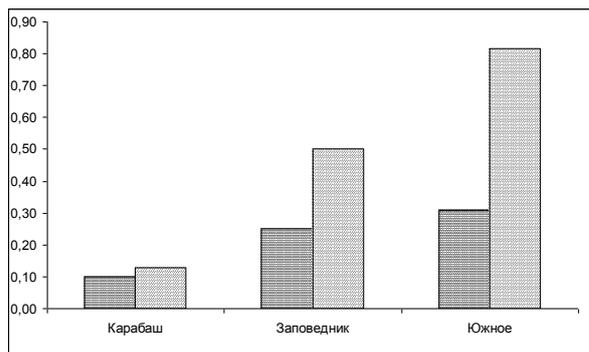
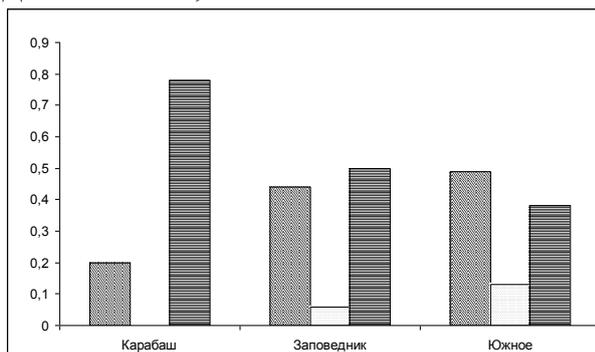
Количество пар хвоинок, шт.



Количество пар хвоинок на 1см



Длина хвоинки, мм



■ a

□ b

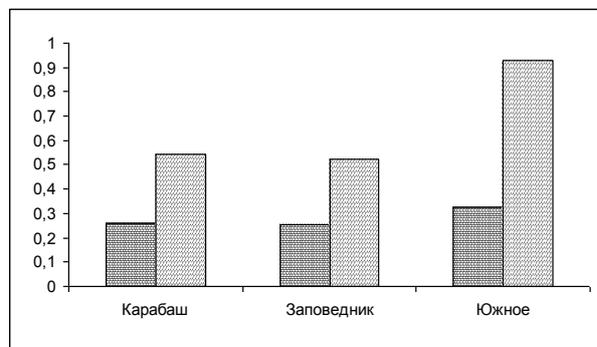
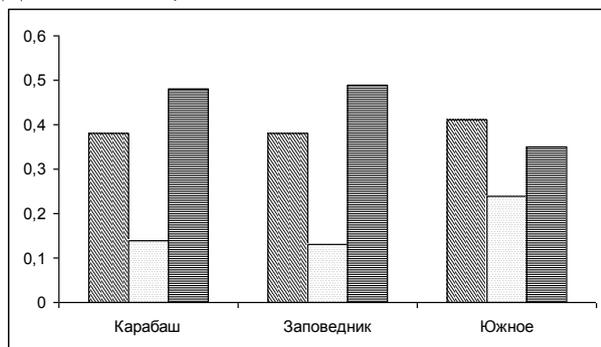
▨ c

▩ Q

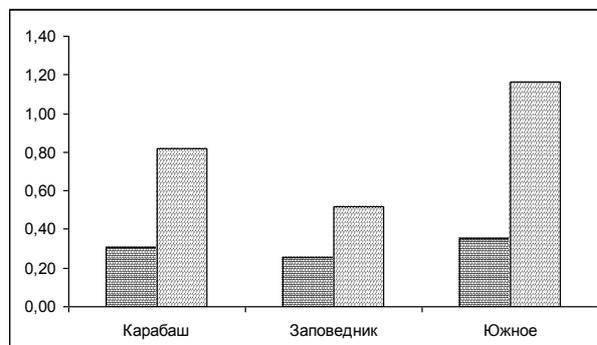
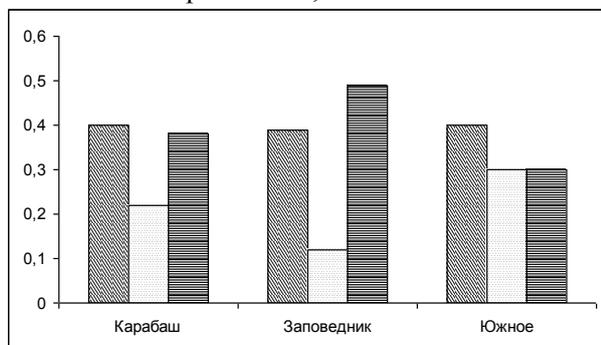
▧ q

**Рис. 2.** Виталитетные спектры ЦП сосны (морфометрические признаки 2-летних побегов), коэффициенты жизненности (Q) и коэффициенты степени процветания ЦП (q) в градиенте химического загрязнения: классы жизненности: a – высокий виталитет, b – средний, c – низкий

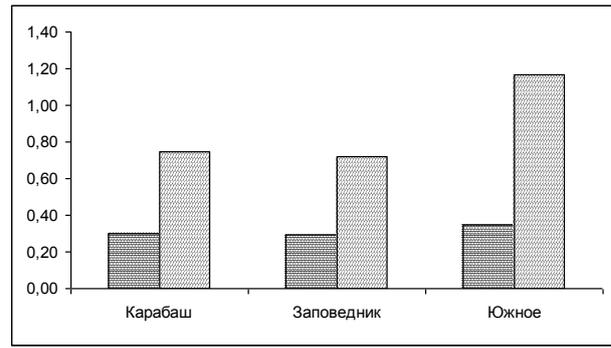
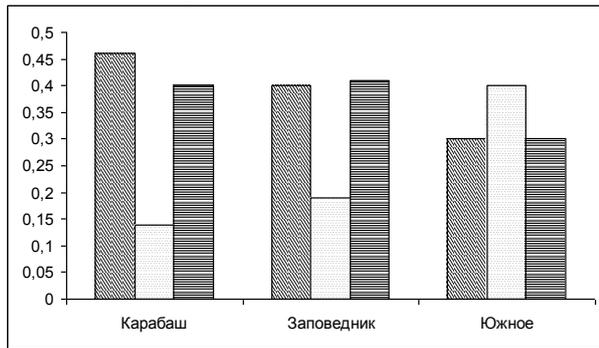
Длина побега, см



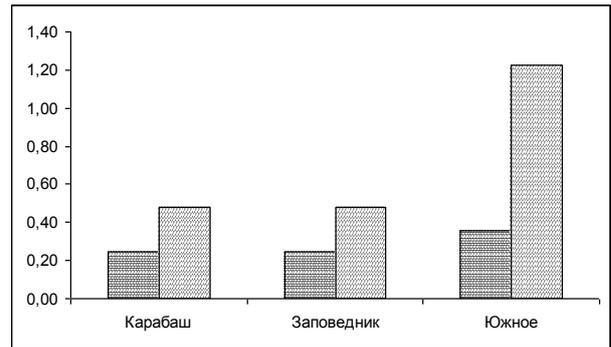
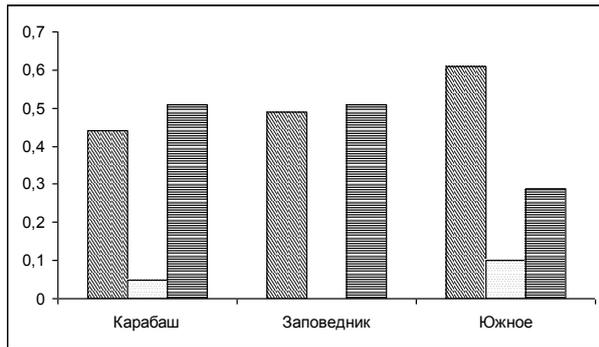
Количество пар хвоинок, шт.



Количество пар хвоинок на 1см



Длина хвоинки, мм



■ а

□ б

▨ с

▩ Q

▧ q

**Рис. 3.** Виталитетные спектры ЦП сосны (морфометрические признаки 3-летних побегов), коэффициенты жизнестойкости (Q) и коэффициенты степени процветания ЦП (q) в градиенте химического загрязнения

Для района КМК большинство ЦП характеризуются как депрессивные с правосторонними виталитетными спектрами (кроме признака «количество пар хвоинок»). В заповеднике 50% ЦП сосны относятся к процветающим (с левосторонними виталитетными спектрами) и равновесным, остальные – депрессивные. В Южном лесничестве 50% ЦП сосны характеризуются как процветающие и 50% – как равновесные. В градиенте уменьшения химического загрязнения (КМК – ИГЗ – «Южное») в ЦП уменьшается встречаемость особей низкого класса жизнестойкости, при этом возрастают коэффициенты жизнестойкости и коэффициенты степени процветания, принимающие максимальные значения в основных древостоях Южного лесничества (рис. 2, 3). В изменении интегрального показателя эффективности вегетативного роста прослеживаются подобные закономерности (табл. 5): в градиенте уменьшения содержания ТМ (КМК – ИГЗ – «Южное») рассматриваемый усредненный для всех ППП показатель возрастает. Для двухлетних побегов подроста сосны он принимает значения 8,0 – 7,5 – 8,5, для трехлетних побегов составляет 12,8 – 10,0 – 13,0, соответственно. IVС изменяется для двухлетних побегов в ряду 4,36 –

3,7 – 4,2, а для трехлетних побегов - 3,2 – 3,0 – 3,6.

Таким образом, изученные интегральные показатели выше в ЦП сосны из Южного лесничества, расположенных дальше всех от источника загрязнения. Изменения морфометрических характеристик побегов подроста сосны в ЦП происходят не линейно в направлении уменьшения токсикантов в среде и в органах растений; наиболее четко различия просматриваются на краях изученного градиента.

**Выводы:** 3-летние побеги растений сосны являются более точными индикаторами, так как накапливают большие концентрации ТМ. Показано воздействие аэротехногенного переноса КМК на состояние подроста сосны в Ильменском заповеднике, которое распространяется на расстояние до 30-35 км с севера на юг. Установлена разная разрешающая способность биоиндикационных методов, используемых для экспресс-диагностики состояния окружающей среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Безель, В.С. Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты. Монография. – Екатеринбург: Изд-во «Гощицкий», 2006. 277 с.

2. Белогуб, Е.В. Карабашский рудный район: материалы к путеводителю геолого-экологической экскурсии: монография // Е.В. Белогуб, В.Н. Удачин, Г.Г. Кораблев. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2003. 40 с.
3. Горчаковский, П.Л. Антропогенные изменения растительности: мониторинг, оценка, прогнозирование // Экология. 1984. №5. С. 3-16.
4. Злобин, Ю.А. Принципы и методы изучения ценологических популяций растений. Монография. – Казань: Изд-во Казан, ун-та, 1989. 146 с.
5. Иибирдин, А.Р. Стратегии жизни ценопопуляции *Serphalanthera rubra* (L.) Rich, на территории Башкирского государственного заповедника // А.Р. Иибирдин, М.М. Ишмуратова, Т.В. Журнова / Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Серия Биология. Вып. 1 (9). Материалы VII Всерос. попул. сем. «Популяции в пространстве и времени». – Нижний Новгород; Изд. ННГУ, 2005. С. 85-98.
6. Карнаухова, Н.А. Оценка состояния популяций *Hedysarum thymum* Krasnob. (Fabaceae) на Алтае / Н.А. Карнаухова, И.Ю. Селютина // Сибирский экологический журнал. 2013. №4. С. 543-550.
7. Степанов, А.М. Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги / А.М. Степанов и др. – М.: ЦЕПЛ, 1992. 246 с.
8. Макунина, Г.С. Деградация и химические свойства почв Карабашской техногенной аномалии // Почвоведение. 2002. № 3. С. 368-376.
9. Ярмишко, В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. Монография. – СПб, 1997. 210 с.

## INFLUENCE OF ACID EMISSIONS FROM KARABASH COPPER SMELTER ON THE VITAL STATUS OF PINE UNDERGROWTH IN ILMEN STATE NATURE RESERVE (SOUTH URALS)

© 2014 A.G. Mumber, O.E. Chashchina, N.B. Kuyantseva, A.B. Potapkin

V.I. Lenin Ilmen State Nature Reserve named after V.I. Lenin UB RAS

With the help of indication methods the estimation of emissions from Karabash Copper Smelter (South Urals) on the characteristics of pine undergrowth in Ilmen State Nature Reserve are given. Perennial shoots of pine accumulate high concentrations of heavy metals and are more precise indicators for express-diagnostics of the environment.

Key words: Scots pine, *Pinus sylvestris*, undergrowth, industrial pollution, heavy metals, Karabash Copper Smelter, bioindication, South Urals

---

Alexander Mumber, Senior Engineer. E-mail: silver@mineralogy.ru

Olga Chashchina, Candidate of Biology, Scientific Secretary. E-mail: sh-ch@mail.ru

Nadezhda Kuyntseva, Candidate of Biology, Senior Research Fellow. E-mail:

borisovna@mineralogy.ru

Andrey Potapkin, Senior Engineer