

УДК 630*524.39+630*174.754

В.А. Усольцев*, **Е.Л. Воробейчик****,
И.Е. Бергман**, **М.Р. Трубина****, **А.В. Бачурина***
(V.A. Usoltsev, E.L. Vorobeichik,
I.E. Bergman, M.R. Trubina, A.V. Bachurina)

*Уральский государственный лесотехнический университет;

** Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург



Воробейчик Евгений Леонидович родился в 1965 г., окончил в 1987 г. Днепропетровский государственный университет, доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе Института экологии растений и животных УрО РАН, заведующий лабораторией экотоксикологии популяций и сообществ. Имеет 90 печатных работ по проблемам влияния промышленного загрязнения на наземные экосистемы.



Бергман Игорь Евгеньевич родился в 1985 г., окончил в 2008 г. лесохозяйственный факультет Оренбургского государственного агроуниверситета, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник лаборатории экотоксикологии популяций и сообществ Института экологии растений и животных УрО РАН. Имеет 12 печатных работ по проблемам оценки и моделирования биологической продуктивности лесов.



Трубина Марина Рудольфовна родилась в 1959 г., закончила в 1982 г. биологический факультет Уральского государственного университета, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экотоксикологии популяций и сообществ Института экологии растений и животных УрО РАН. Имеет 50 печатных работ по влиянию промышленного загрязнения на популяции и сообщества растений.

СТРУКТУРА ФИТОМАССЫ НИЖНЕГО ЛЕСНОГО ЯРУСА ВБЛИЗИ МЕДЕПЛАВИЛЬНЫХ ЗАВОДОВ УРАЛА (BIOMASS STRUCTURE OF FOREST UNDERSTORY NEAR COPPER SMELTERS ON THE URAL)

Исследовано изменение структуры фитомассы и первичной продукции различных компонентов нижнего яруса в градиентах загрязнений от медеплавильных заводов Урала.

Change of biomass and NPP structure in different components of forest understory in pollution gradients near copper plants on the Ural is studied.

На Урале одним из наиболее интенсивных источников токсичных выбросов в атмосферу является медеплавильное производство, в частности Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) в Челябинской области и Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ) в Свердловской области. Поэтому представляет несомненный интерес анализ их воздействия на наземные экосистемы, включая все их ключевые компоненты. Результаты такого рода работ важны для решения различных теоретических и прикладных вопросов экологии, прежде всего связанных с раскрытием механизмов устойчивости экосистем к стрессирующим факторам, проверкой теоретических построений, верификацией моделей реакции на внешние воздействия (Воробейчик, Козлов, 2012).

При изучении влияния атмосферного загрязнения на продукционные процессы исследователи чаще всего анализируют реакцию древесного яруса; меньше работ посвящено анализу реакции подчиненных ярусов растительности (напр.: Freedman, Hutchinson, 1980; Воробейчик, Хантемирова, 1994; Трубина, Махнев, 1997; Salemaa et al., 2001; Kozlov et al., 2009), а описание изменений надземной биомассы и продуктивности всего растительного сообщества в градиентах промышленного загрязнения содержится лишь в немногих публикациях (Степанов и др., 1992; Черненкова, 2002). Недостаток такого рода информации – одна из наиболее важных причин, затрудняющих построение общей картины трансформации биоты под действием промышленного загрязнения (Zvereva, Kozlov, 2012).

Исследования выполнены в градиентах загрязнения сосновых и березовых насаждений разнотравно-злаковых (вблизи КМК) и елово-пихтовых травяных насаждений (к западу от СУМЗ). В основу исследования положен метод пробных площадей, заложенных согласно требованиям ОСТ 56-60-83. Таксационная характеристика 89 пробных площадей, а также показатели фитомассы и чистой первичной продукции (ЧПП) древесного яруса опубликованы ранее (Усольцев и др., 2011).

Наряду с определением биологической продуктивности основного яруса была изучена структура фитомассы и ЧПП подроста, подлеска и живого почвенного покрова (ЖНП) в нижнем ярусе насаждений. Для этого проведены учеты на трех мини-площадках размером 5×5 м в пределах каждой пробной площади с использованием методики БИН РАН (Методы..., 2002). Диапазон варьирования высот растений подроста и подлеска разбивали на три градации по каждому виду и в пределах каждой градации вели пересчет по диаметру у основания корневой шейки штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Модельные растения каждого вида (всего 515) взяты на пробных площадях в градиенте загрязнения (табл. 1) по одному растению в каждой ступени толщины. Растения высотой менее 0,5 м фракционировали, взвешивали и сушили при 100-105 °С до постоянной массы. У корневой шейки по годичным кольцам определяли возраст, делением на который полученной массы скелетной части растения определяли ее первичную продукцию.

У растений высотой более 0,5 м секатором отделяли облиственные побеги, из их общего количества в средней части кроны брали навеску массой около 200-500 г, взвешивали; у нее отделяли листву и повторно взвешивали. Затем листву и остальную часть навески сушили и рассчитывали содержание сухого вещества в обеих фракциях. По их значениям определяли сухую массу фракций всего растения. Первичную продукцию скелетной части рассчитывали аналогично вышеприведенной методике. Полученные значения скелетной части и листвы каждого вида соотносили с их суммой площадей сечений и затем по общей сумме площадей сечений, полученной пересчетом на мини-площадках, находили фитомассу скелетной части и листвы и переводили ее на 1 га. Фитомассу ЖНП определяли сплошным укосом на площадках 50×50 см по 15 шт. на каждой пробной площади с последующей сушкой до абсолютно сухого состояния. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

Количество модельных растений нижнего яруса, взятых для определения их фитомассы и первичной продукции

Элемент яруса	Вид растения	Количество моделей
Сосновые насаждения, КМК		
Подрост	Береза повислая	20
	Сосна обыкновенная	36
	Осина	21
<i>Итого подрост</i>		77
Подлесок	Ольха серая	11
	Кизильник	12
	Липа мелколистная	7
	Ракитник русский	23
	Рябина обыкновенная	21
	Черемуха обыкновенная	18
<i>Итого подлесок</i>		92
Итого в сосновых насаждениях		169
Березовые насаждения, КМК		
Подрост	Береза повислая	25
	Сосна обыкновенная	49
	Осина	28
<i>Итого подрост</i>		102
Подлесок	Ольха серая	11
	Кизильник	12
	Липа мелколистная	7
	Ракитник русский	34
	Рябина обыкновенная	27
	Черемуха обыкновенная	18
	Шиповник иглистый	3
<i>Итого подлесок</i>		112
Итого в березовых насаждениях		214

Элемент яруса	Вид растения	Количество моделей
Елово-пихтовые насаждения, СУМЗ		
Подрост	Береза повислая	14
	Ель сибирская	22
	Пихта сибирская	23
	Сосна обыкновенная	2
	Осина	5
<i>Итого подрост</i>		66
Подлесок	Бузина черная	6
	Жимолость татарская	5
	Ива козья	3
	Калина красная	1
	Липа мелколистная	4
	Малина обыкновенная	6
	Можжевельник обыкновенный	6
	Ракитник русский	3
	Рябина обыкновенная	17
	Смородина черная	3
	Черемуха обыкновенная	5
Шиповник иглистый	7	
<i>Итого подлесок</i>		66
Итого в елово-пихтовых насаждениях		132
Всего		515

Таблица 2

Фактические значения надземной фитомассы и ЧПП основного и нижнего ярусов сосновых, березовых и елово-пихтовых насаждений в градиентах загрязнений от КМК и СУМЗ

Зона*	Фитомасса, т/га						Годичная продукция, т/га				
	L^{**} , км	Древесный ярус	Нижний ярус				Древесный ярус	Нижний ярус			
			Под-рост	Под-лесок	ЖНП	Итого		Подрост	Под-лесок	ЖНП	Итого
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сосновые насаждения, КМК											
1	4,2	112,9	0,002	0,007	0,111	0,12	1,73	0,0002	0,0008	0,111	0,112
	5,5	179,6	0,016	0,002	0,310	0,33	2,10	0,0018	0,0002	0,310	0,312
Среднее		146,2	0,009	0,0045	0,210	0,224	1,92	0,0010	0,0005	0,210	0,212
2	6,6	147,4	0,180	0,553	0,349	1,08	2,63	0,0187	0,0503	0,349	0,418
	8,3	217,0	0,195	0,577	0,433	1,21	1,98	0,0177	0,0523	0,433	0,503
	13,8	221,0	0,370	0,020	0,693	1,08	4,75	0,0307	0,0023	0,693	0,726
Среднее		195,1	0,248	0,383	0,492	1,12	3,12	0,0224	0,0350	0,492	0,549
3	32	252,4	0,193	0,542	0,515	1,25	4,86	0,0149	0,0431	0,515	0,573
Общее среднее		188,4	0,159	0,283	0,402	0,845	3,01	0,0140	0,0248	0,402	0,441

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Березовые насаждения, КМК											
1	3,5	79,7	0,02	0,44	0,021	0,481	2,34	0,002	0,049	0,008	0,059
	3,5	102,1	0,08	0,03	0,009	0,119	3,09	0,009	0,003	0	0,012
	3,5	121,7	0,17	0	0,008	0,178	3,76	0,019	0	0,004	0,023
	3,8	128,0	0,016	0,002	0,02	0,038	3,43	0,002	0,0002	0,018	0,020
	3,8	101,9	0,011	0,008	0,017	0,036	2,96	0,0020	0,0009	0,012	0,015
	3,8	96,0	0,002	0,007	0,023	0,032	2,83	0,0002	0,0008	0,014	0,015
	3,8	111,5	0,009	0,001	0,007	0,017	3,34	0,0009	0,0001	0,006	0,007
	4,7	87,7	0,016	0,002	0,091	0,109	3,09	0,002	0,0002	0,091	0,093
Среднее	103,6	0,041	0,061	0,025	0,126	3,11	0,0046	0,0068	0,019	0,030	
2	6,4	114,8	0,195	0,577	0,113	0,885	4,46	0,018	0,052	0,113	0,183
	8,5	126,1	0,436	0,425	0,514	1,375	4,31	0,039	0,039	0,514	0,592
	9,2	135,1	0,065	0,334	0,322	0,721	4,43	0,005	0,026	0,322	0,353
	9,2	151,8	0,134	0,221	0,255	0,61	5,08	0,010	0,017	0,255	0,282
	9,2	161,3	0,005	0,604	0,168	0,777	5,45	0	0,047	0,168	0,215
	10,6	214,3	0,195	0,577	0,566	1,338	6,82	0,018	0,052	0,538	0,608
	10,6	197,2	0,436	0,425	0,65	1,511	5,99	0,039	0,039	0,536	0,614
	10,6	216,9	0,373	0,380	0,599	1,352	7,07	0,034	0,034	0,569	0,637
	12,3	188,8	0,182	0,068	0,670	0,920	6,22	0,015	0,006	0,662	0,683
	12,3	123,6	0,027	0,363	0,651	1,041	4,29	0,002	0,031	0,642	0,675
	12,3	161,1	0,082	0,198	0,517	0,797	5,45	0,007	0,016	0,509	0,532
13,1	163,2	0,370	0,020	0,678	1,068	4,72	0,031	0,002	0,678	0,711	
Среднее	162,9	0,208	0,349	0,475	1,033	5,36	0,0182	0,0301	0,459	0,507	
3	17,5	168,0	0,021	0,440	0,613	1,074	4,91	0,018	0,031	0,613	0,662
	18,5	247,2	0,051	0,119	0,863	1,033	8,27	0,004	0,008	0,848	0,86
	18,5	219,1	0	0,460	1,074	1,534	7,29	0	0,033	1,068	1,101
	18,5	261,3	0,370	0,020	1,074	1,464	8,65	0,027	0,001	1,046	1,074
	25,8	214,4	0	0,148	0,677	0,825	7,61	0	0,011	0,672	0,683
	25,8	232,0	0,089	0,541	0,511	1,141	8,09	0,007	0,041	0,496	0,544
	25,8	229,6	0	0,546	0,749	1,295	8,01	0	0,042	0,748	0,790
	28,7	231,7	0,153	0,140	0,955	1,248	7,68	0,011	0,011	0,955	0,977
	28,7	250,9	0,632	0,366	0,908	1,906	8,36	0,049	0,028	0,908	0,985
	28,7	150,3	0,173	0,101	0,916	1,190	5,13	0,013	0,008	0,913	0,934
	31,0	149,1	0,193	0,542	0,553	1,288	5,45	0,015	0,043	0,553	0,611
	31,7	238,6	0,181	0,548	0,675	1,404	8,44	0,014	0,042	0,672	0,728
	31,7	261,4	0,405	0,249	0,627	1,281	8,99	0,031	0,019	0,609	0,659
31,7	288,6	1,340	0,271	0,616	2,227	10,2	0,103	0,021	0,599	0,723	
Среднее	224,4	0,258	0,321	0,772	1,351	7,6	0,021	0,024	0,764	0,809	
Общее среднее	191,5	0,211	0,301	0,546	1,058	6,59	0,018	0,025	0,534	0,577	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Елово-пихтовые насаждения, СУМЗ											
1	1	10,1	1,12	0	0,329	1,45	0,45	0,161	0	0,323	0,484
		11,8	2,05	0	0,471	2,52	0,49	0,266	0	0,458	0,724
		108,5	1,58	0	0,478	2,06	4,95	0,118	0	0,456	0,574
	1	50,7	3,71	0,651	0,260	4,62	3,11	0,273	0,038	0,029	0,340
		67,6	1,19	0,250	0,154	1,59	3,07	0,084	0,016	0,058	0,158
		88,4	3,63	0,026	0,113	3,77	3,85	0,303	0,003	0,017	0,323
	1,5	140,3	2,59	0,017	0,115	2,72	5,39	0,150	0,007	0,025	0,182
		108,9	8,62	0,032	0,173	8,82	4,02	0,576	0,006	0,053	0,637
		134,7	2,01	3,463	0,221	5,69	5,33	0,252	1,442	0,056	1,758
	4	221,3	4,54	0,884	0,136	5,57	8,72	0,219	0,045	0,129	0,500
		159,6	2,81	0,218	0,286	3,32	7,03	0,174	0,047	0,241	0,464
		179,2	1,93	1,299	0,121	3,35	6,69	0,102	0,125	0,116	0,460
Среднее	106,8	2,98	0,570	0,238	3,79	4,43	0,223	0,144	0,163	0,550	
2	6	194,3	4,67	0,001	0,037	4,71	8,75	0,212	0,001	0,018	0,232
		197,9	3,27	0,151	0,090	3,51	8,85	0,149	0,027	0,025	0,202
		256,7	3,33	0,052	0,010	3,40	11,0	0,149	0,011	0,007	0,166
	7	211,3	0,74	0,466	0,206	1,41	9,05	0,039	0,099	0,181	0,319
		207,7	3,44	0,61	0,431	4,48	8,37	0,156	0,222	0,355	0,733
		267,6	0,76	0,544	0,073	1,38	12,8	0,033	0,147	0,060	0,240
	10	198,4	1,05	0,046	0,219	1,32	9,57	0,058	0,016	0,200	0,274
		157,2	1,10	0,045	0,380	1,53	8,02	0,082	0,028	0,336	0,446
		162,6	2,28	0,073	0,253	2,60	8,00	0,132	0,033	0,236	0,370
Среднее	206,0	2,29	0,221	0,189	2,70	9,38	0,112	0,065	0,158	0,331	
3	20	188,1	1,89	0,099	0,245	2,23	6,19	0,103	0,017	0,226	0,346
		139,6	1,71	0,74	0,406	2,86	5,46	0,088	0,099	0,295	0,482
		204,7	3,07	0,213	0,269	3,56	7,48	0,161	0,037	0,23	0,428
	30	203,3	2,52	0,851	0,310	3,68	6,55	0,142	0,146	0,263	0,551
		148,3	1,55	1,206	0,232	2,98	5,06	0,083	0,188	0,21	0,481
		231,7	0,05	1,012	0,301	1,36	7,59	0,016	0,188	0,204	0,407
	34	171,4	0,95	0,322	0,279	1,55	6,03	0,055	0,109	0,249	0,413
		225,3	1,69	1,762	0,273	3,72	7,62	0,081	0,284	0,233	0,598
		155,2	0,03	0,822	0,348	1,2	5,22	0,001	0,149	0,318	0,469
Среднее	185,3	1,50	0,781	0,296	2,57	6,36	0,081	0,135	0,248	0,464	
Общее среднее	176,7	2,56	0,581	0,265	3,40	7,16	0,161	0,129	0,206	0,504	
* 1, 2 и 3 – зоны загрязнений, соответственно импактная, буферная и фоновая; ** L – расстояние от источника загрязнений.											

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что по мере удаления от КМК, соответственно перехода от импактной зоны загрязнений к фоновой, происходит увеличение фитомассы и ЧПП не только древесного, но и основных компонентов нижнего яруса – подроста, подлеска и ЖНП. При этом наблюдается перераспределение их участия в общей массе и ЧПП нижнего яруса: возрастание доли подроста и подлеска и снижение доли ЖНП в сосновых насаждениях и, напротив, снижение доли подроста и подлеска и возрастание доли ЖНП в березовых насаждениях (табл. 3). Такая разнонаправленная динамика требует дополнительных исследований, особенно если учесть, что сосняки и березняки находятся в одном градиенте загрязнений в непосредственной близости друг от друга и отнесены к одному разнотравно-злаковому типу.

Таблица 3

Изменение соотношения долевого участия подроста, подлеска и ЖНП в общей массе и ЧПП нижнего яруса насаждений в разных зонах загрязнений, %

Зона	Фитомасса, %				Годичная продукция, %			
	Подрост	Подлесок	ЖНП	Итого	Подрост	Подлесок	ЖНП	Итого
Сосновые насаждения, КМК								
1	4	2	94	100	0,5	0,2	99,3	100
2	22	34	44	100	4	6	90	100
3	16	43	41	100	3	7	90	100
Березовые насаждения, КМК								
1	32	48	20	100	15	23	62	100
2	20	34	46	100	4	6	90	100
3	19	24	57	100	3	3	94	100
Елово-пихтовые насаждения, СУМЗ								
1	79	15	6	100	41	26	30	100
2	85	8	7	100	34	20	48	100
3	58	30	12	100	17	29	53	100

Иными закономерностями характеризуется градиент загрязнений от СУМЗ: если фитомасса и ЧПП древесного яруса увеличиваются по мере удаления от завода, то названные показатели нижнего яруса, напротив, снижаются. Возможно, это связано с тем, что по мере приближения к источнику загрязнений происходит выпадение пораженных деревьев и на освобождающейся площади происходит замена древесного яруса кустарничками и травяным покровом. Но при дальнейшем приближении к СУМЗ деградируют как основной, так и нижний ярус.

Работа завершена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-05-01218) и Президиума УрО РАН (проект 12-М-23457-2041).

Библиографический список

Воробейчик Е.Л., Козлов М.В. Воздействие точечных источников эмиссии поллютантов на наземные экосистемы: методология исследований, экспериментальные схемы, распространенные ошибки // *Экология*. 2012. № 2. С. 83–91.

Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимости доза–эффект // *Экология*. 1994. № 3. С. 31–43.

Методы изучения лесных сообществ / под ред. В.Т. Ярмишко и И.В. Лянгузовой; НИИХимии СПбГУ. СПб., 2002. 240 с.

Степанов А.М. и др. Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги / А.М. Степанов, Р.Р. Кабиров, Т.В. Черненькова [и др.]; под ред. А.М. Степанова. М.: ВНИЦлесресурс, 1992. 246 с.

Трубина М.Р., Махнев А.К. Динамика напочвенного покрова лесных фитоценозов в условиях хронического загрязнения фтором // *Экология*. 1997. № 2. С. 90–95.

Усольцев В.А. и др. Влияние промышленных выбросов на биологическую продуктивность лесных экосистем Урала / В.А. Усольцев, Е.Л. Воробейчик, И.Е. Бергман [и др.] // *Лесная таксация и лесоустройство: межвуз. науч.-практ. жур.* 2011. № 1-2 (45-46). С. 58-69.

Черненькова Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 190 с.

Freedman B., Hutchinson T.C. Long-term effects of smelter pollution at Sudbury, Ontario, on forest community composition // *Can. J. Bot.* 1980. V. 58. № 19. P. 2123–2140.

Kozlov M.V., Zvereva E.L., Zverev V.E. Impacts of point polluters on terrestrial biota: Comparative analysis of 18 contaminated areas. Dordrecht: Springer, 2009. 466 p.

Salemaa M., Vanha-Majamaa I., Derome J. Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland // *Environ. Pollut.* 2001. V. 112. № 3. P. 339–350.

Zvereva E.L., Kozlov M.V. Changes in the abundance of vascular plants under the impact of industrial air pollution: a meta-analysis // *Water, Air, Soil Pollut.* 2012. DOI 10.1007/s11270-011-1050-z.

