

**В.А. Усольцев, И.С. Цепордей, В.Ф. Ковязин, А.Ф. Уразова,  
А.В. Борников**

**БИОМАССА ГЕНЕРАТИВНЫХ ОРГАНОВ  
СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ И БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ  
В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
ОТ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА НА УРАЛЕ**

*Введение.* Возможные изменения биологической продуктивности лесных сообществ связывают сегодня с изменениями климата, промышленными загрязнениями, сведением лесов и другими антропогенными факторами. Оценка и прогнозирование ответной реакции биоты на воздействие загрязнения является важнейшей задачей экологического мониторинга, и в этом направлении реализовано несколько методических подходов [Феклистов и др., 2005; Коротеева и др., 2011; Зверев, 2012; Жуйкова, Безель, 2018]. Основное внимание уделяется изучению биомассы и чистой первичной продукции ассимилирующих органов и древесных компонентов лесных сообществ, а биомасса генеративной сферы, определяющей стабильность популяции [Zhuikova et al., 2002], исследуется крайне редко [Храмова, Храмов, 1974; Габеев, 1976; Усольцев и др., 2012; 2017].

**О соотношении продуктивности генеративных и вегетативных органов дерева.** Хотя масса генеративных органов дерева несомненно является важным компонентом общей продуктивности и стабильности лесного сообщества, ее учет при весовом фракционировании биомассы осуществляется крайне редко вследствие того, что межгодичное варьирование урожая семян несопоставимо выше варьирования остальных компонентов [Храмова, Храмов, 1974; Wesołowski et al., 2015]. Урожай семян деревьев варьирует по годам в диапазоне от максимума до минимума, и эта периодичность обусловлена как биологическими особенностями той или иной породы, так и погодными условиями года [Holmsgaard, Olsen, 1960; Ovington, Murray, 1964; Wesołowski et al., 2015].

Современные имитационные модели распределения ассимилятов в дереве построены на ранжировании отдельных его частей по приоритетам в получении ассимилятов. В годы обильного плодоношения генеративные органы сильно конкурируют за ассимиляты, но в основном – с камбием

[Kozłowski, Keller, 1966; Kramer, Kozłowski, 1979; Воробьев, 1983; Saleem, 2008; Rosati et al., 2018], а первоочередным приоритетом обладают расходы ассимилятов на дыхание и обеспечение прироста хвои и тонких корней [Palumets, 1990]. Если исходить из подобного ранжирования упомянутых приоритетов, то осуществляемая обычно оценка компонентов биомассы методом рубки модельных деревьев без учета урожая семян теоретически может не вызывать существенного смещения результатов, поскольку в большинстве случаев оно находится в пределах точности весового фракционирования биомассы. Тем не менее, исследование фактического соотношения охвоенности и урожайности семян в 25-летних культурах лиственницы сибирской показало, что деревья с обильным семеношением по отношению к таким же деревьям со слабым семеношением имеют массу хвои меньшую примерно на 30%. Это снижение физиологически компенсируется повышением интенсивности фотосинтеза на 22% и транспирации на 13%, а также увеличением биоэлектрического потенциала на 54% [Карасева, 2001].

У некоторых древесных пород, например, у кедра сибирского, можно совместить определение биомассы вегетативных и генеративных органов, рассчитывая массу шишек путем ретроспективного подсчета следов опавших шишек за требуемое число лет [Воробьев, 1979]. Но у большинства древесных пород, в том числе у сосны обыкновенной и березы белой, подобная процедура невозможна, и оценку вклада массы их генеративных органов в общую биологическую продуктивность дерева и древостоя нужно выполнять не «деструктивным» методом на временных пробных площадях, а на стационарных объектах с выводом показателя, среднего за 10–15 лет [Храмова, Храмов, 1974].

### **Свойства генеративной сферы деревьев в связи с загрязнениями.**

Обычно под влиянием промышленных выбросов (фтора, оксидов серы, озона, тяжелых металлов и др.) исследуются качество и жизнеспособность пыльцы, количество (урожай) и размеры шишек и семян, партенокарпия, всхожесть и энергия прорастания семян и др. Закономерности распределения ограниченного количества ассимилятов растения являются одним из основных составляющих теории истории жизни (life-history theory) [Reznik, 1985; Vitzthum, 2008; Ahlström, 2011]. Согласно некоторым частным исследованиям в рамках этой теории доля репродуктивных элементов относительно вегетативных (соматических) органов в растениях должна уменьшаться при повышении уровня стресса [Grime, 1979; Tuomi et al., 1983; Nemborg, Karlsson, 1998]. С другой стороны, в биологии известно яв-

ление гормезиса – стимулирующего воздействия умеренной дозы стрессора, согласно которому при низких дозах загрязнений может наблюдаться повышенная семенная продуктивность особей и сообществ [Cedergreen et al., 2007; Calabrese, 2008; Calabrese, Blain, 2009; Khamidullin et al., 2016; Marthandan et al., 2018].

Эта неопределенность проявляется и на уровне лесных сообществ. Установлено, что загрязнения отрицательно влияют на их генеративные органы [Houston, Dochinger, 1977; Федотов и др., 1983; Keller, Beda, 1984; Sidhu, Staniforth, 1986; Wolters, Martens, 1987; Venne et al., 1989; Ставрова, 1990; Сох, 1992; Осколков, 1999; Аникеев, 2000; Tretyakova, Noskova, 2004; Паничева, 2005; Носкова, Третьякова, 2006; Поташева, 2008; Зенкова, Казанцева, 2008; Валетова, 2009; Zvereva et al., 2010; Ибрагимова, 2010; Agalakova, Gusev, 2011; Barker, Tingey, 2012; Erofeeva, 2014; Korshikov et al., 2015; Kumari, 2018], а внесение удобрений в оптимальных дозах оказывает на них положительное влияние [Белобородов и др., 1983; Бреусова, 1984; Ляхова, Мосин, 1984]. Установлено также, что отклик женской генеративной сферы сосны обыкновенной на техногенное воздействие может проявляться лишь в отдельные годы с неблагоприятными климатическими факторами [Павлов, 2003; Вахнина, 2014].

В то же время имеются сведения о положительной реакции генеративной сферы растений на техногенную нагрузку различной интенсивности [Подзоров, 1965; Федорков, 1994; Zhuikova et al., 2002; Коршиков, 2004; Тарханов, 2011; Вахнина, Замана, 2013; Коршиков и др., 2014; Кончина, Гусева, 2014], а также о ее высокой толерантности к промышленным загрязнениям [Антипов, 1979; Вахнина, 2009; Мохначев и др., 2016].

Имеются также исследования, обнаруживающие отсутствие какого-либо тренда в реакции генеративной сферы дерева на загрязнения. Именно такой результат получен при анализе массы генеративных органов березы горной (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hamet-Ahti) на Кольском полуострове вблизи медно-никелевого комбината г. Мончегорска. Отсутствие тренда ученые объясняют тем, что в условиях длительного загрязнения наиболее чувствительные к загрязнениям особи не выдержали конкурентного воздействия и были вытеснены из сообщества. В то же время отмечено, что в отдельные годы березы, растущие на промышленных пустошах, давали больше сережек, чем в незагрязненных лесах [Kozlov, Zvereva, 2004]. Аналогичный «нейтральный» результат получен в аналитическом обзоре 2500 публикаций, посвященных влиянию поллютантов на наземную биоту. В результате синтеза опубликованных данных на основе

мета-анализа не выявлено достоверного влияния загрязнений на интенсивность семеношения, количество семян в шишке и количество генеративных органов, приходящееся на одно растение. Но загрязнение значительно снижает размеры генеративных органов и жизнеспособность как пыльцы, так и семян [Zvereva et al., 2010].

Таким образом, данные о реакции генеративных органов на загрязнения разноречивы, что связано с особенностями биологии древесных пород и экологии местообитаний, с характером атмосферных загрязнений, а также с методологическими неопределенностями и с незавершенностью теоретических представлений о принципиальных закономерностях репродукции растений в условиях антропогенных негативных воздействий [Solntseva, Glazunova, 2010].

Исследование биомассы генеративных органов сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth.) проведено в градиенте загрязнений вблизи Карабашского медеплавильного комбината в течение одного вегетационного периода. Мы не знаем, на какую стадию в названной периодичности семеношения приходится учет массы генеративных органов, и этот показатель в целом может быть как максимальным, так и минимальным относительно среднегодовой «нормы». В исследовании, выполняемом на временных пробных площадях, мы уходим от анализа межгодовой изменчивости биомассы генеративной сферы. Также не входила в задачу нашего исследования оценка партенокарпии генеративных органов и всхожести семян обеих пород.

Независимо от уровня урожайности генеративных органов в текущем году в целях исследования ставились следующие вопросы:

- изменяется ли биомасса генеративных органов на уровне дерева и древостоя в градиенте загрязнений и каковы закономерности этих изменений?
- есть ли различия двух древесных видов по закономерностям изменения биомассы генеративных органов?

*Методика исследования.* Исследование проведено в лесах, прилегающих к Карабашскому медеплавильному комбинату (КМК), расположенному в г. Карабаш Челябинской области на Урале (55°20'...55°40' с. ш.; 60°00'...60°30' в. д.). В соответствии с геоботаническим районированием территория исследования входит в подзону предлесостепных сосново-березовых лесов [Колесников, 1961], в составе которых площадь сосновых и березовых древостоев составляет соответственно 35 и 53% [Усольцев и др., 2012]. Около 70% площадей представлены древостоями, имеющими средний возраст сосны 90–120 лет, березы – 45–50 лет. Климат района кон-

тинентальный, средняя многолетняя температура воздуха  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  с максимумом  $36\text{ }^{\circ}\text{C}$  и минимумом  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , количество осадков 523 мм в год. Преобладают ветры в направлении с юго-запада на северо-восток [Усольцев и др., 2012].

Лесные экосистемы в окрестностях КМК сформировались в результате 100-летнего воздействия вредных выбросов. В результате вокруг КМК в радиусе 4–5 км не только погибли естественные насаждения, но и практически отсутствует древесная растительность. Район исследования представляет зону экологического бедствия [Дзугаев, 2003; Tote et al., 2014]. Здесь сложилась крайне неблагоприятная экологическая обстановка: огромная площадь нарушенных земель, загрязнение почв, атмосферного воздуха, водоемов, подземных вод вредными веществами, гибель растительности. Загрязняющие вещества поступают в атмосферу в виде пыли и газообразных веществ. Они содержат различные токсичные элементы и соединения, среди которых преобладают соединения серы и тяжелые металлы. Объем выбросов за период с 1907 года составил около 15 млн. т [Williamson et al., 2008; Усольцев и др., 2012; Pollard et al., 2015].

Исследования проводились в двух градиентах загрязнения в чистых древостоях сосны обыкновенной и березы повислой. Пробные площади в березовых древостоях закладывались в северо-восточном и южном направлениях от КПК, в то время как в сосновых древостоях – только в северо-восточном направлении (рис. 1). Градиенты загрязнения подразделены на три зоны: импактную, буферную и фоновую. Их удаление от КМК составило соответственно 1–10, 15–25 и 30 км и более [Воробейчик, Хантемирова, 1994].

В более ранних исследованиях было выявлено, что содержание тяжелых металлов в подстилке и гумусовом слое почвы существенно изменяется в градиенте загрязнения от КПК (Коротеева и др., 2011). Наше исследование проведено в два этапа. На первом из них в пределах градиентов загрязнения определены концентрации мобильных форм тяжелых металлов в лесной подстилке (табл. 1). В качестве показателя «дозы» загрязнения принят индекс токсичности ( $I$ ), рассчитанный по данным табл. 1 по следующей формуле:

$$I = \frac{1}{k} \cdot \sum \frac{X_{ij}}{X_{i \min}}, \quad (1)$$

где  $I$  – индекс токсичности;  $k$  – количество элементов;  $X_{ij}$  – концентрация  $i$ -го элемента в  $j$ -м местообитании;  $X_{i \min}$  – минимальная концентрация  $i$ -го элемента во всех местообитаниях.



*Рис. 1.* Положение тестовых участков загрязнений в северо-восточном и южном направлениях от Карабаша

*Fig. 1.* Position of contamination test plots in the north-eastern and southern directions from Karabash

На втором этапе в том же градиенте загрязнений подобраны пробные площади для определения надземной биомассы компонентов, в том числе генеративной сферы. Время закладки пробных площадей и обработки модельных деревьев на них – середина сезона роста, когда формирование всех генеративных и ассимиляционных органов уже закончилось, но не начался их отпад. Методика закладки пробных площадей опубликована ранее [Usoltsev et al., 2011; Усольцев и др., 2012].

Таблица 1

## Наличие тяжелых металлов в градиенте загрязнений около КМК

## Presence of heavy metals in the pollution gradient near KCSP

Зона	L, км	Наличие металлов, $\mu\text{г} / \text{г}$						Индекс I	
		Cu	Pb	Cd	Zn	Fe	Ni		
Импактная	3,5	4335,1	2159,9	25,4	4075,6	5236,1	115,5	61	
		3542	2003	23,3	3944,9	3971,9	114,5	51,6	
		4106,7	1562,7	21	3347,9	5626,4	79,6	55,3	
	5	4457,3	2548	29	5397,4	15665,9	27,3	69,7	
		4296,3	2036,6	26,1	5737,1	31054,2	38,2	77	
		4395,9	2196,3	26,8	5717,9	29760,7	37,9	77,7	
Буферная	9	490,1	687,1	9,2	1620,3	782,9	20,4	10,2	
		342	604,3	8,4	1396,1	688,2	18,6	8,2	
		431,3	658,5	8,6	1508,6	832,3	18,4	9,4	
	10,8	247,4	412,4	5,8	1124,7	654	11,1	5,9	
		158,7	330,8	5,1	961,5	415,4	7,5	4,4	
		298,8	462,5	6	1177,6	796,2	10,2	6,7	
	11,9	101,9	254,1	4,3	709,1	570,4	19,5	3,7	
		109	294,5	4,4	781,1	489,3	21,5	3,9	
		102,8	277,7	4,2	701,9	549,7	19,7	3,7	
	Фоновая	18,4	83	179,3	2,8	525,8	570,3	7,2	2,6
			96,7	163,7	2,8	490,6	573,2	7,8	2,7
			89,4	175,8	2,9	513,7	449	7,1	2,6
25,5		23,6	73,2	1,6	284,4	427,4	19	1,6	
		25,1	73,8	1,7	309,1	505,4	21,9	1,8	
		25,1	80,2	1,6	293,4	354,8	20	1,6	
26,6		19,1	56,7	1,5	244,3	347,8	16,9	1,4	
		19,5	55,1	1,2	254,4	291	17,5	1,3	
		17,3	53,1	1,5	283,3	248,3	13,6	1,2	
32		36,8	74	1,8	268,6	685,4	13,4	1,8	
		38,1	73,7	1,7	271	488	12,2	1,6	
		37,3	68,3	1,7	256,7	725,1	13,4	1,8	

Примечание. L – расстояние пробной площади от источника загрязнений.

Поскольку критерием подбора мест закладки пробных площадей было соблюдение одного и того же возраста древостоев и одних и тех же эдафических условий, местá закладки пробных площадей и тестовых участков загрязнений оказались сдвинутыми в градиенте загрязнений. На пробных площадях выполняли пересчет всех деревьев и строили матрицы распределения числа деревьев по ступеням толщины. На каждой пробной площади отбиралось семь модельных деревьев, равномерно распределенных в пределах всего диапазона варьирования диаметра ствола. Модельные деревья служили основой для определения биомассы как вегетативных, так и генеративных органов. Из общего количества модельных деревьев на пробной площади в сосновых древостоях приходилось от 1 до 3 особей с наличием на них шишек и в березовых древостоях от 2 до 4 деревьев с наличием на них сережек. В основном это были деревья верхней части полога. С крон модельных деревьев отделяли и взвешивали все генеративные органы (при их наличии). Сушка образцов производилась до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Для расчета массы генеративных органов на уровне древостоя их массу у каждого дерева (за исключением деревьев, на которых генеративных органов не было обнаружено) умножали на число деревьев данной ступени толщины на 1 га и результаты суммировали.

В градиентах загрязнений заложено 12 и 34 пробных площадей в сосновых и березовых древостоях соответственно. На них взято соответственно 42 и 56 модельных деревьев в пределах диапазонов варьирования деревьев по толщине и определена структура их биомассы, в том числе генеративных органов. Не все модельные деревья оказались семеносящими. Характеристика семеносящих модельных деревьев приведена в табл. 2, а фактические значения массы генеративных органов на 1 га – в табл. 3. Исходные данные обработаны методом регрессионного анализа по программе Statgraphics (<http://www.statgraphics.com/for more information>).

*Результаты исследования.* Используя исходные данные табл. 2, мы рассчитали следующие уравнения для массы генеративных органов:

– для сосны

$$\ln(Pg) = -17,4707 + 3,4641(\ln D) + 5,0843(\ln L) - 0,9539(\ln L)^2; \\ \text{adj}R^2 = 0,665; \quad SE = 0,50; \quad (2)$$

– для берёзы

$$\ln(Pg) = -11,9221 + 2,3040(\ln D) + 3,7663(\ln L) - 0,8644(\ln L)^2; \\ \text{adj}R^2 = 0,427; \quad SE = 0,76. \quad (3)$$



Таблица 2

**Фактические значения массы генеративных органов у семеносящих модельных деревьев сосны и березы в градиенте загрязнений от КМК**

**Actual values of generative organ weights in seed-producing model pine and birch trees in the pollution gradient from KCSP**

Сосна				Береза			
<i>L</i> , км	<i>A</i> , лет	<i>D</i> , см	<i>Pg</i> , кг	<i>L</i> , км	<i>A</i> , лет	<i>D</i> , см	<i>Pg</i> , кг
4,2	74	29,2	0,87	3,8	70	23,4	0,15
4,2	78	23,7	0,28	3,8	63	20,1	0,11
6,6	89	33,7	0,91	3,8	75	17,5	0,78
6,6	87	29,1	2,04	3,8	78	15,3	0,23
6,6	84	22,6	0,95	4,8	80	22,4	0,50
8,3	101	33,6	3,48	4,8	78	18,7	0,24
8,3	103	28,0	0,98	4,8	70	15,9	0,30
8,3	98	26,6	1,17	8,5	86	24,1	2,20
9,5	126	31,2	5,95	8,5	75	18,8	0,55
9,5	104	25,8	0,30	8,5	60	15,9	0,03
9,5	105	23,1	0,27	6,8	73	24,5	0,37
13,8	97	30,3	4,43	6,8	62	21,9	0,28
13,8	98	27,1	2,21	12,3	80	23,8	0,83
13,8	85	20,7	0,60	12,3	58	16,2	0,04
13,8	90	24,1	1,46	12,3	54	13,8	0,29
32,0	52	21,1	0,44	13,1	70	23,7	0,71
–	–	–	–	13,1	57	17,1	0,04
–	–	–	–	13,1	47	14,3	0,06
–	–	–	–	17,5	80	26,3	0,50
–	–	–	–	17,5	55	18,3	0,05
–	–	–	–	17,5	67	19,9	0,16
–	–	–	–	31,0	70	20,6	0,21
–	–	–	–	31,0	56	12,7	0,04

*Примечание.* *A* – возраст дерева; *D* – диаметр ствола на высоте груди; *Pg* – масса генеративных органов модельного дерева в абсолютно сухом состоянии, кг.

Таблица 3

**Фактические значения массы генеративных органов в сосновых  
и березовых древостоях в градиенте загрязнений от КМК\***

**Actual values of weight of generative organs in pine and birch stands  
in the pollution gradient from KCSP\***

Сосновые древостои					Березовые древостои				
<i>N</i>	<i>L</i> , км	<i>A</i> , лет	<i>Hm</i> , м	<i>Pg</i> , т/га	<i>N</i>	<i>L</i> , км	<i>A</i> , лет	<i>Hm</i> , м	<i>Pg</i> , т/га
1	4,2	80	20,6	0.070	1	3,5	69	19	0,129
2	5,5	80	19,9	0.123	2	3,5	69	18,2	0,155
3	5,8	80	21,2	0.152	3	3,5	70	21,2	0,179
4	6,6	80	19,8	0.289	4	3,8	50	14,2	0,168
5	7,3	80	20,4	0.393	5	3,8	69	18,4	0,215
6	8,3	80	19,5	0.512	6	3,8	70	20,4	0,153
7	8,8	80	18,6	0.491	7	3,8	70	21,9	0,194
8	9,5	70	18,6	0.757	8	4,8	45	13,7	0,144
9	13,3	80	20,4	0.848	9	8,5	40	15	0,38
10	13,8	80	20,6	1.124	10	9,2	45	15,1	0,375
11	14,5	70	19,5	1.512	11	9,2	71	21,9	0,400
12	32	80	20,3	0.056	12	9,2	63	20,2	0,405
–	–	–	–	–	13	9,2	69	21,4	0,595
–	–	–	–	–	14	10,6	66	21,6	0,618
–	–	–	–	–	15	10,6	78	25,3	0,505
–	–	–	–	–	16	10,6	62	20,7	0,785
–	–	–	–	–	17	12,3	72	23,3	0,212
–	–	–	–	–	18	12,3	57	19,5	0,25
–	–	–	–	–	19	12,3	63	21,1	0,234
–	–	–	–	–	20	13,1	50	19,5	0,154
–	–	–	–	–	21	17,5	50	17,8	0,122
–	–	–	–	–	22	18,5	69	24,9	0,166
–	–	–	–	–	23	18,5	71	25,6	0,145
–	–	–	–	–	24	18,5	72	25,8	0,175
–	–	–	–	–	25	25,7	72	26,2	0,181
–	–	–	–	–	26	25,7	68	23,6	0,205
–	–	–	–	–	27	25,7	74	27,3	0,19
–	–	–	–	–	28	28,7	71	25,5	0,194
–	–	–	–	–	29	28,7	72	26,1	0,215
–	–	–	–	–	30	28,7	68	23,8	0,148
–	–	–	–	–	31	31	40	16	0,137
–	–	–	–	–	32	31,7	72	25,6	0,197
–	–	–	–	–	33	31,7	72	25,8	0,218
–	–	–	–	–	34	31,7	72	25,6	0,244

*Примечание:* *A* – возраст древостоя; *Hm* – средняя высота древостоя; *Pg* – масса генеративных органов древостоя в абсолютно сухом состоянии, кг.

В уравнениях (2) и (3) возраст и высота дерева в качестве независимых переменных оказались статистически не значимыми. В приводимых здесь и далее уравнениях все регрессионные коэффициенты значимы на уровне вероятности  $P_{05}$  и выше.

Геометрическая 3D-интерпретация наглядно свидетельствует о монотонном увеличении массы генеративных органов обеих пород по мере роста диаметра ствола. Независимо от диаметра ствола масса генеративных органов нарастает в направлении от импактной к буферной зоне с последующим снижением в фоновой зоне (рис. 2).

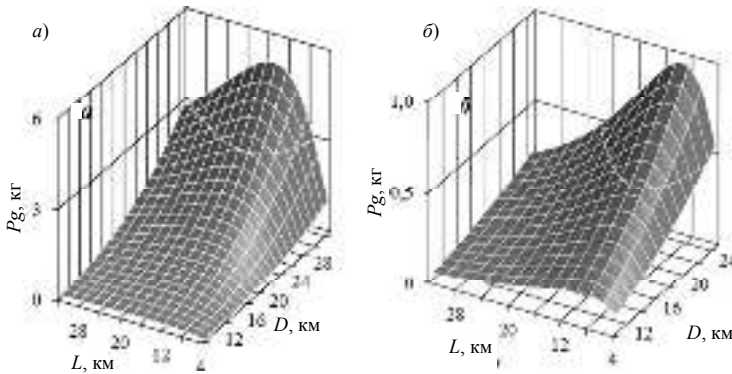


Рис. 2. Зависимость массы генеративных органов деревьев сосны (а) и берёзы (б) от диаметра ствола в градиенте загрязнений от КМК

Fig. 2. Dependence of mass of generative organs of pine (а) and birch (б) trees on trunk diameter in the pollution gradient from KCSP

Необходимо выяснить, в какой мере динамика массы генеративных органов сопрягается не только с расстоянием от КМК, но и с индексом токсичности в градиенте. Для этого рассчитаны уравнения:

– для сосны

$$\ln(P_g) = -8,0204 + 7,2118(\ln L) - 1,4864(\ln L)^2; \text{ adj}R^2 = 0,348; SE = 0,54; (4)$$

– для берёзы

$$\ln(P_g) = -6,3296 + 5,0731(\ln L) - 1,1713(\ln L)^2; \text{ adj}R^2 = 0,212; SE = 0,89. (5)$$

Данные индекса токсичности  $I$  (см. табл. 1) мы аппроксимировали уравнением

$$\ln(I) = 8,7627 - 3,9461(\ln L) + 0,4326(\ln L)^2; \text{ adj}R^2 = 0,932; SE = 0,37. (6)$$

Рис. 3, на котором совмещены линии регрессии (4)–(6), показывает, что пик массы генеративных органов деревьев обеих пород приходится на часть буферной зоны (8–14 км от КМК), граничащую с импактной зоной.

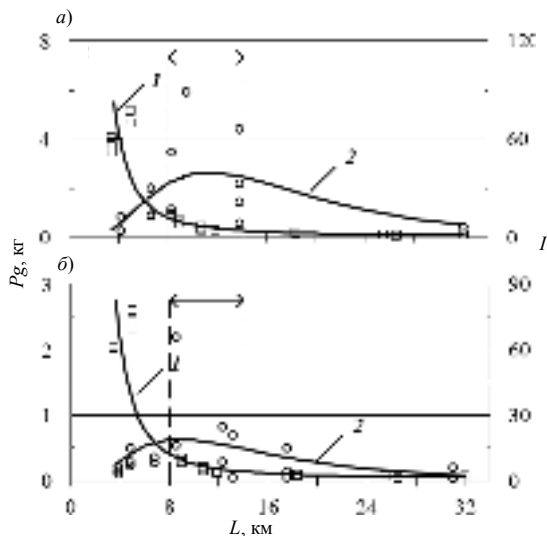


Рис. 3. Линии регрессии (2) для генеративных органов сосны (а) и берёзы (б) соответственно, согласно уравнениям (4) и (5), совмещенные с линиями регрессии (1) для индекса токсичности, согласно уравнению (6), на фоне фактических данных

Кружками обозначены данные массы генеративных органов, квадратами – данные индекса токсичности. Стрелками выделена зона максимальной массы генеративных органов и максимальной ее изменчивости, соответствующая буферной зоне загрязнений (см. табл. 1)

Fig. 3. Regression lines (2) for the generative organs of pine (a) and birch (b), respectively (according to equations (4) and (5)), combined with the regression lines (1) for the toxicity index (according to equation (6)), on the background of actual data

Hereinafter: circles indicate data on weight of generative organs and squares indicate data on toxicity index. Arrows mark the zone of maximum mass of generative organs and its maximum variability corresponding to the buffer zone of pollution (see Table 1)

Фактические значения массы генеративных органов в сосновых и березовых древостоях в градиенте загрязнений от КМК (см. табл. 3) аппроксимированы следующими уравнениями:

– для сосны

$$\ln Pg = 50,566 - 100,55 \ln L + 66,783 (\ln L)^2 - 18,154 (\ln L)^3 + 1,724 (\ln L)^4;$$

$$\text{adj}R^2 = 0,964; \text{SE} = 0,26, \quad (7)$$

– для березы

$$\ln Pg = -4,3567 + 3,3955 (\ln L)^2 - 1,6632 (\ln L)^3 + 0,214 (\ln L)^4;$$

$$\text{adj}R^2 = 0,687; \text{SE} = 0,39, \quad (8)$$

где  $Pg$  – масса генеративных органов древостоя в абсолютно сухом состоянии, т/га;  $L$  – расстояние от КМК, км.

Совмещение моделей (7) и (8) с (6) в графическом формате показывает (рис. 4), что закономерности, выведенные на уровне деревьев, практически повторяются на уровне древостоев: пик массы генеративных органов древостоев обеих пород приходится на часть буферной зоны (8–16 км от КМК), граничащую с импактной зоной.

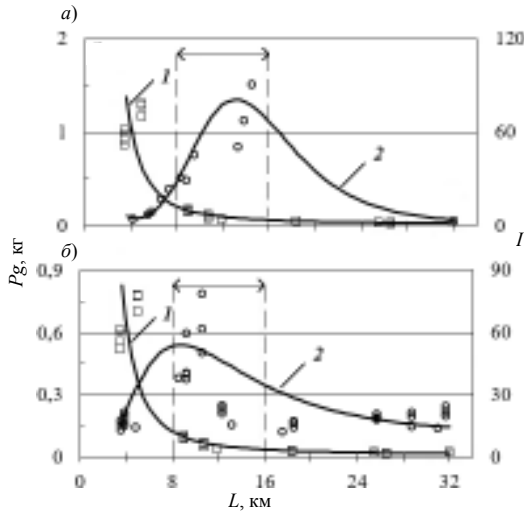


Рис. 4. Линии регрессии для генеративных органов (2) сосны (а) и березы (б) соответственно, согласно уравнениям (7) и (8), совмещенные с линией регрессии для индекса токсичности (1), согласно уравнению (6), на фоне фактических данных. Кружками обозначены данные массы генеративных органов, квадратами – данные индекса токсичности.

Fig. 4. Regression lines for generative organs (2) of pine (a) and birch (b), respectively (according to equations (7) and (8)) combined with the regression line for the toxicity index (1) (according to equation (6)) on the background of actual data.

Circles indicate data on weight of generative organs and squares indicate data on toxicity index

*Обсуждение результатов.* Итак, отмечена «контринтуитивная» положительная реакция генеративных параметров растений на техногенную нагрузку [Подзоров, 1965; Федорков, 1994; Аникеев, Бабушкина, 1997; Zhuikova et al., 2002; Коршиков, 2004; Тарханов, 2011; Вахнина, Замана, 2013; Коршиков и др., 2014; Кончина, Гусева, 2014]. В имеющихся публикациях аналогичные положительные тренды изменения по мере приближения к источнику загрязнений были отмечены для некоторых производственных показателей. Установлено, что по мере продвижения от фоновых районов к источнику загрязнений увеличивается плотность охвоения побегов [Аугустайтис, 1989, 1992; Ярмишко, 1997; Зарубина, 2011; Тарханов, 2011] и размеры хвои текущего года [Сидаравичюс, 1987], а также повышаются доля листвы в общей биомассе деревьев [Завьялов, 2009], фотосинтетическая способность листвы [Легошина, 2018] и интенсивность роста коротких побегов [Зверев, 2012]. Можно предположить, что перечисленные явления характеризуют увеличение адаптивных способностей растений по мере роста загрязнений до некоторого порогового значения.

Выявленные закономерности изменения массы генеративных органов сосны и березы на уровне дерева и древостоя (см. рис. 3 и 4), несмотря на малый объем экспериментальных данных, статистически значимы и, следовательно, на данном этапе воспроизводимы. Эти контринтуитивные закономерности можно с некоторыми допущениями объяснить явлением гормезиса, хотя в нашем случае мы не знаем физиологического механизма этого парадоксального явления. Мы видим, что на буферную зону, в которой древостой в соответствии с явлением гистерезиса переходят из одного стабильного состояния в другое [Арманд и др., 1991; Воробейчик, Хантемирова, 1994], приходится не только максимальная биомасса генеративных органов, но и ее максимальное варьирование по отношению к импактной и фоновой зонам (табл. 4).

*Таблица 4*

**Увеличение изменчивости (%) массы генеративных органов сосны и березы в буферной зоне по отношению к импактной и фоновой**

**Increase in variability (%) of mass of generative organs of pine and birch in the buffer zone in relation to the impact zone and the background**

Уровень	Сосна обыкновенная		Береза белая	
	Буферная зона	Импактная и фоновая зоны	Буферная зона	Импактная и фоновая зоны
Дерево	2,25	0,62	0,70	0,22
Древостой	0,39	0,13	0,19	0,03

Это явление согласуется с ранее выявленным возрастанием изменчивости важнейших параметров, определяющих жизнедеятельность популяции, в качестве адаптивного ответа на загрязнение среды. Необходимость адаптации требует сохранности как особей, приспособленных к условиям обычной среды, так и возросшей доли особей с повышенной устойчивостью к токсическому фактору, что и определяет повышение изменчивости искомым параметров [Жуйкова, Безель, 2018].

*Выводы.* Выявленные тренды (см. рис. 3 и 4) характеризуют реакцию сосны и березы на загрязнения по показателю биомассы генеративных органов на уровне как отдельных деревьев, так и древостоев. Примечательно, что несмотря на различную биологию исследованных хвойной и лиственной пород, динамика массы их генеративных органов в градиенте загрязнений характеризуется одной общей для них закономерностью.

Отмеченные во введении противоречивые закономерности изменения характеристик генеративных органов, возможно, объясняются тем, что они исследовались в разных диапазонах градиента загрязнений: положительные реакции на загрязнения наблюдались при переходе от фоновой зоны к буферной, а отрицательные – при переходе от буферной зоны к импактной. Отсутствие достоверного влияния загрязнений на интенсивность семенения, количество семян в шишке и количество генеративных органов, приходящееся на одно растение, обнаруженное в результате мета-анализа опубликованных данных по наземной биоте [Zvereva et al., 2010], может быть связано с тем, что при структурировании имеющихся материалов зона гормеизиса учеными не была выделена достаточно четко.

Наше исследование проведено на сравнительно небольшом объеме экспериментальных данных, и изложенные результаты следует рассматривать как предварительные. Необходимы углубленные исследования влияния загрязнений на генеративную сферу разных древесных видов с целью прогнозирования их толерантности и возобновительной способности в условиях антропогенно измененной среды.

**Благодарности.** Авторы признательны своим коллегам Е.Л. Воробейчику, И.Е. Бергману, М.Р. Трубиной, С.Ю. Кайгородовой, П.Г. Пишулину, А.В. Щепеткину, И. Биктимирову, принимавшим участие в получении исходных материалов.

### Библиографический список

*Аникеев Д.Р.* Дифференциация деревьев сосны обыкновенной по комплексу признаков женской репродуктивной системы в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение. 1997. № 5. С. 43–50.

Аникеев Д.Р. Сопряженная изменчивость и наследуемость признаков женской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение. 2000. № 4. С. 56–62.

Антипов В.Г. Устойчивость древесных растений к промышленным газам. Минск: Наука и техника, 1979. 216 с.

Арманд А.Д., Кайдакова В.В., Кушнарёва Г.В., Добродеев В.Г. Определение пределов устойчивости геосистем на примере окрестностей Мончегорского металлургического комбината // Изв. АН СССР. Сер. географич. 1991. № 1. С. 93–104.

Аугустайтис А.А. Закономерности роста сосновых древостоев при различном уровне загрязнения природной среды: автореф. дис. ... канд. биол. наук / 03.00.16. М.: Ин-т глобального климата и экологии, 1992. 22 с.

Аугустайтис А.А. Особенности формирования надземной фитомассы сосновых молодняков в условиях загрязнения природной среды // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 12. Л.: Гидрометеоздат, 1989. С. 32–51.

Белобородов В.М. Ефимов Ю.П., Стебакова В.Н. Урожай шишек сосны обыкновенной на удобренных семенных плантациях // Лесоведение. 1983. № 3. С. 18–26.

Бреусова А.И. Влияние условий минерального питания на обмен веществ и плодоношение сосны обыкновенной // Экология лесных сообществ Северного Казахстана. Л.: Наука, 1984. С. 24–29.

Валетова Е.А. Влияние техногенного загрязнения на репродуктивную способность сосны обыкновенной: автореф. дис. ... канд. биол. наук / 03.00.16. Барнаул: Алтайский госуниверситет, 2009. 19 с.

Вахнина И.Л. Изменчивость генеративных параметров *Pinus sylvestris* L. в условиях городского загрязнения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 9-1. С. 109–112.

Вахнина И.Л. Характеристика семян сосны обыкновенной в зеленой зоне г. Читы (Восточное Забайкалье) // Вестник КрасГАУ. 2009. № 8. С. 98–103.

Вахнина И.Л., Замана Л.В. Влияние загрязнения снегового и почвенного покровов в зеленой зоне г. Читы на всхожесть и прорастание семян сосны обыкновенной // Лесоведение. 2013. № 2. С. 38–44.

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

Воробьев В.Н. Биологические основы комплексного использования кедровых лесов. Новосибирск: Наука, 1983. 254 с.

Воробьев В.Н. Метод ретроспективного изучения динамики семенения *Pinus sibirica* Du Tour // Ботанический журнал. 1979. Т. 64, № 7. С. 971–974.

Габеев В.Н. Биологическая продуктивность лесов Приобья. Новосибирск: Наука, 1976. 171 с.



Дзугаев М.Д. Карабаш – город «экологического бедствия» // Вестник Челябинского университета. Сер. 9. Право. 2003. № 2. С. 92–97.

Жуйкова Т.В., Безель В.С. Экологическая токсикология. М.: Юрайт, 2018. 362 с.

Завьялов К.Е. Состояние искусственных насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях магнетитового загрязнения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / 06.03.03. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. 16 с.

Зарубина И.А. Оценка состояния культур сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения (Усть-Илимский район Иркутской области): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / 06.03.01. Красноярск: СибГТУ, 2011. 17 с.

Зверев В.Е. Влияние промышленного загрязнения на экологию березы Черепанова (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* (Orlova) Namet-Ahti) на Кольском полуострове: автореф. дис. ... канд. биол. наук / 03.02.08. Екатеринбург: ИЭРиЖ УрО РАН, 2012. 19 с.

Зенкова Е.Л., Казанцева М.Н. Влияние техногенного загрязнения города Тюмени на репродуктивную способность сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Урбозкосистемы и перспективы развития: матер. Междунар. науч.-практ. конф. Ишим, 2008. С. 59–62.

Ибрагимова Э.Э. Влияние техногенного загрязнения на жизнеспособность женских генеративных органов и качество семян *Pinus sylvestris* L. // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «Биология, химия». 2010. Т. 23, № 2. С. 89–95.

Карасева М.А. Рост, семеношение и качество семян лиственницы сибирской в Среднем Поволжье // Лесное хозяйство. 2001. № 3. С. 44–45.

Колесников Б.П. Лесорастительные условия и лесорастительное районирование Челябинской области // Вопросы восстановления и повышения продуктивности лесов Челябинской области: тр. Ин-та биологии УФАН СССР. Вып. 26. Свердловск, 1961. С. 3–44.

Кончина Т.А., Гусева М.В. Изучение влияния техногенного воздействия на семенную продуктивность растений // Молодой ученый. 2014. № 21.1 (80.1). С. 275–279.

Коротеева Е.В., Вейсберг Е.И., Куянцева Н.Б. Оценка состояния лесной ценофлоры в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Известия Самарского НЦ РАН. 2011. Т. 13, № 1 (4). С. 1005–1011.

Коршиков И.И. Устойчивость растений к техногенным загрязнителям окружающей среды // Промышленная ботаника. 2004. Вып. 4. С. 46–57.

Коршиков И.И., Лантева Е.В., Лутвиненко Ю.С. Морфологические изменения пыльцы сосны крымской (*Pinus Pallasiana* D. DON) в интродукционных насаждениях техногенно загрязненных территорий // Промышленная ботаника. 2014. № 14. С. 61–68.

Легощина О.М. Адаптивные реакции и фитоиндикационная способность древесных растений в условиях техногенного загрязнения: автореф. дис. ... канд. биол. наук / 03.02.08. Томск: Нац. исслед. Том. гос. ун-т, 2018. 24 с.

Ляхова Н.П., Мосин В.И. Стимуляция плодоношения сосны обыкновенной на лесосеменных участках // Экология лесных сообществ Северного Казахстана. Л.: Наука, 1984. С. 102–105.

Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Менициков С.Л., Завьялов К.Е., Кузьмина Н.А., Потапенко А.М. Посевные качества семян сосны обыкновенной в условиях аэротехногенных выбросов магнезитового производства // Леса России и хозяйство в них. 2016. № 4 (59). С. 42–48.

Носкова Н.Е., Третьякова И.Н. Влияние стресса на репродуктивные способности сосны обыкновенной // Хвойные бореальной зоны. 2006. № 3. С. 54–63.

Осколков В.А. Качество пыльцы сосны обыкновенной в древостоях Приангарья при разном уровне загрязнения // Лесоведение. 1999. № 2. С. 16–21.

Павлов И.Н. Динамика посевных качеств семян *Larix sibirica* Ledeb. в насаждениях юга Сибири с 1936 по 2000 гг. // Хвойные бореальной зоны. 2003. № 1. С. 14–21.

Паничева Д.М. Гаметофитная сохранность семязачатков сосны обыкновенной при хроническом воздействии щелочных промвыбросов // Проблемы лесоведения и лесоводства: сб. науч. тр. Гомель, 2005. Вып. 63. С. 228–230.

Подзоров Н.В. Влияние задымления воздуха на качество семян сосны обыкновенной // Лесное хозяйство. 1965. № 7. С. 47–49.

Поташева Ю.И. Состояние сосновых насаждений в условиях автотранспортного загрязнения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / 06.03.01; 06.03.03. Архангельск: АГТУ, 2008. 20 с.

Сидаравичюс Й.М. Анализ фитомассы и морфоструктуры крон сосновых древостоев при атмосферном загрязнении природной среды // Исследование и моделирование роста лесных насаждений, произрастающих в условиях загрязненной природной среды: сб. науч. тр. Каунас: ЛитСХА, 1987. С. 45–55.

Ставрова Н.И. Влияние атмосферного загрязнения на семеношение хвойных пород // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение: сб. науч. тр. / под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. С. 115–121.

Тарханов С.Н. Состояние лесных экосистем в условиях атмосферного загрязнения на европейском Севере: автореф. дис. ... д-ра биол. наук / 03.02.08. Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, 2011. 40 с.

Усольцев В.А., Бергман И.Е., Воробейчик Е.Л., Азарёнок В.А., Крюк В.И., Луганский Н.А. Биологическая продуктивность лесных земель Урала, нарушенных промышленными загрязнениями // Биологическая рекультивация нарушенных земель: матер. X Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Екатеринбург, 4–7 сентября 2017 г. Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. С. 313–319.

Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Бергман И.Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения: Исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 365 с.

Федорков А.Л. Влияние аэротехногенных загрязнений на сохранность семян почек и развитие зародыша сосны обыкновенной // Лесоведение. 1994. № 5. С. 36–40.

Федотов И.С., Карабань Р.Т., Тихомиров Ф.А., Сисюгина Т.И. Оценка действия двуокиси серы на сосновые насаждения // Лесоведение. 1983. № 6. С. 23–27.

Феклистов П.А., Тутыгин Г.С., Дрожжин Д.П. Состояние сосновых древостоев в условиях аэротехногенного загрязнения атмосферы. Архангельск: АГТУ, 2005. 132 с.

Храмова Н.Ф., Храмов А.А. Семенная продуктивность и фитомасса кедра сибирского // Биология семенного размножения хвойных Западной Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 95–105.

Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 1997. 210 с.

Agalakova N.I., Gusev G.P. Effect of inorganic fluoride on living organisms of different phylogenetic level. Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology, 2011, vol. 47, is. 5, pp. 393–406. (Original Russian Text published in Zhurnal Evolyutsionnoi Biokhimii i Fiziologii, 2011, vol. 47, is. 5, pp. 337–347).

Ahlström T. Life-history theory, past human populations and climatic perturbations // International Journal of Osteoarchaeology, 2011, vol. 21, is. 4, pp. 407–419.

Barker J.R., Tingey D.T. Air pollution effects on biodiversity. Springer: Science & Business Media, 2012. 322 p.

Calabrese E.J., Blain R.B. Hormesis and plant biology. Environmental pollution, 2009, vol. 157, pp. 42–48.

Calabrese E.J. Hormesis: why it is important to toxicology and toxicologists. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, vol. 27, pp. 1451–1474.

Cedergreen N., Streibig J.C., Kudsk P., Mathiassen S.K., Duke S.O. The occurrence of hormesis in plants and algae. Dose-Response, 2007, vol. 5, pp. 150–162.

Cox R.M. Air pollution effects on plant reproductive processes and possible consequences to their population biology. In: Barker J.R., Tingey D.T. (eds.). Air pollution effects on biodiversity. Springer: Boston, 1992, pp. 131–158.

Erofeeva E.A. Dependence of drooping birch (*Betula pendula*) and lime tree (*Tilia cordata*) relative seed production as a new seed production index on the intensity of motor traffic pollution. Advances in Environmental Biology. 2014, vol. 8, is. 13, pp. 282–286.

Grime J.P. Plant strategies and vegetation processes. New York: John Wiley, USA, 1979. 222 p.

Hemborg A.M., Karlsson P.S. Somatic costs of reproduction in eight subarctic plant species. Oikos, 1998, vol. 82, pp. 149–157.

Holmsgaard F., Olsen H.C. Vejrets intlydelse på bøgens frugtsætning. Det. forstl. Forsøgsvaesen i Danmark. 1960, vol. 26, pp. 347–370.

Houston D.B., Dochinger L.S. Effect of ambient air pollution on cone seed and pollen characteristics in Eastern white and red pines. *Environmental Pollution*, 1977, vol. 12, pp. 1–5.

Keller T., Beda H. Effect of SO<sub>2</sub> on the germination of conifer pollen. *Environmental Pollution*, 1984, vol. 33, no. 3, pp. 237–243.

Khamidullin A., Kotov S., Vorob'ev V. Integrated effect of atmosphere pollution and cutting on seed production of dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg.) urban populations. *International Journal of Pharmacy & Technology*, 2016, vol. 8, is. 2, pp. 14634–14642.

Korshikov I.I., Lapteva H.V., Belonozhko Yu.A. Quality of pollen and cytogenetic changes of Scotch pine as indicators of the impact of the technogenically polluted environment of Krivoy Rog. *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, vol. 8, is. 2, pp. 250–255.

Kozlov M.V., Zvereva E.L. Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia. *Environmental Pollution*, 2004, vol. 132, pp. 443–451.

Kozłowski T.T., Keller T. Food relations of woody plants. *The Botanical Review*, 1966, vol. 32, is. 4, pp. 293–382.

Kramer P.J., Kozłowski T.T. *Physiology of woody plants*. New York: Academic Press, Inc. 1979. 811 p.

Kumari N. Effects of pollutants on seed germinability, reproductive capacity and yield of mustard plant. *International Journal of Chemical Studies*, 2018, special is. 4, pp. 96–98.

Marthandan V., Bhavyasree R.K., Vinothini N., Tamilarasan C. Impact of polluting agents on seed quality. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2018, vol. 7, is. 6, pp. 2728–2732.

Ovington J.D., Murray G. Determination of acorn fall. *Quarterly Journal of Forestry*, 1964, vol. 58, pp. 152–159.

Palumets Ya.K. Modeling of the distribution of spruce phytomass. *Soviet Forest Sciences*, 1990, is. 3, pp. 36–40. Translated from *Lesovedenie*, 1990, is. 3, pp. 43–48.

Pollard A.S., Williamson B.J., Taylor M., Purvis W.O., Goossens M., Reis S., Aminov P., Udachin V., Osborne N.J. Integrating dispersion modelling and lichen sampling to assess harmful heavy metal pollution around the Karabash copper smelter, Russian Federation. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, vol. 6, is. 6, pp. 939–945.

Reznik D. Costs of reproduction: an evaluation of the empirical evidence. *Oikos*, 1985, vol. 44, pp. 257–267.

Rosati A., Paoletti A., Al Hariri R., Morelli A., Famiani F. Resource investments in reproductive growth proportionately limit investments in whole-tree vegetative growth in young olive trees with varying crop loads. *Tree Physiology*, 2018, vol. 38, pp. 1267–1277.

*Saleem B.A., Malik A.U., Pervez M.A., Khan A.S.* Growth regulators application affects vegetative and reproductive behaviour of 'blood red' sweet orange. *Pakistan Journal of Botany*, 2008, vol. 40, is. 5, pp. 2115–2125.

*Sidhu S.S., Staniforth R.J.* Effects of atmospheric fluorides on foliage, and cone and seed production in balsam fir, black spruce, and larch. *Canadian Journal of Botany*, 1986, vol. 64, is. 5, pp. 923–931.

*Solntseva M.P., Glazunova K.P.* Influence of industrial and traffic pollution on reproduction of spermatophytes. *Zhurnal Obsheĭ Biologii*, 2010, vol. 71, is. 2, pp. 163–175.

*Tote C., Delalieux S., Goossens M., Williamson B.J., Swinnen E.* Monitoring environmental health using spot-vegetation-derived and field-measured spectral indices in Karabash, Russia. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, is. 7, pp. 2516–2533.

*Tretyakova I.N., Noskova N.E.* Scotch pine pollen under conditions of environmental stress. *Russian Journal of Ecology*, 2004, vol. 35, is. 1, pp. 20–26. Translated from *Ekologiya*, 2004, is. 1, pp. 26–33.

*Tuomi J., Hakala T., Haukioja E.* Alternative concepts of reproductive effort, cost of reproduction and selection in lifehistory evolution. *American Zoologist*, 1983, vol. 23, pp. 25–34.

*Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bornikov A.V., Zhanabayeva A.S.* Biological productivity of forests near the Ural copper smelters. In: *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Actions*. Proceedings of 15th IBFRA International Science Conference. August 15–21 2011. Krasnoyarsk, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, 2011, pp. 193–197. URL: [http://ibfra.org/documents/IBFRA\\_proceedings\\_2011.pdf](http://ibfra.org/documents/IBFRA_proceedings_2011.pdf)

*Venne H., Scholz F., Vornweg A.* Effects of air pollutants on reproductive processes of poplar (*Populus* spp.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In: *Genetic effects of air pollutants in forest tree populations*. F. Scholz, H.-R. Gregorius and D. Rudin (eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989, pp. 89–103.

*Vitzthum V.* Evolutionary models of women's reproductive functioning. *Annual Review of Anthropology*, 2008, vol. 37, pp. 53–73.

*Wesołowski T., Rowinski P., Maziarz M.* Interannual variation in tree seed production in a primeval temperate forest: does masting prevail? *European Journal of Forest Research*, 2015, vol. 134, pp. 99–112.

*Williamson B.J., Purvis O.W., Mikhailova I.N., Spiro B., Udachin V.* The lichen transplant methodology in the source apportionment of metal deposition around a copper smelter in the former mining town of Karabash, Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, vol. 141, pp. 227–236.

*Wolters J.H.B., Martens M.J.M.* Effects of air pollutants on pollen. *The Botanical Review*, 1987, vol. 53, pp. 372–414.

*Zhuikova T.V., Bezel' V.S., Pozolotina V.N., Severyukhina O.A.* The reproductive capacity of plants in gradient of chemical environmental pollution. *Russian Journal of Ecology*, 2002, vol. 33, is. 6, pp. 407–412.

*Zvereva E.L., Roitto M., Kozlov M.V.* Growth and reproduction of vascular plants in polluted environments: a synthesis of existing knowledge. *Environmental review*, 2010, vol. 18, pp. 355–367.

## References

*Agalakova N.I., Gusev G.P.* Effect of inorganic fluoride on living organisms of different phylogenetic level. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2011, vol. 47, is. 5, pp. 393–406. Original Russian Text published in *Zhurnal Evolyutsionnoi Biokhimi i Fiziologii*, 2011, vol. 47, is. 5, pp. 337–347.

*Ahlström T.* Life-history theory, past human populations and climatic perturbations. *International Journal of Osteoarchaeology*, 2011, vol. 21, is. 4, pp. 407–419.

*Anikeev D.R., Babushkina L.G.* Differentiation of Scots pine trees on a set of attributes of the female reproductive system in terms of industrial pollution. *Lesovedenie*, 1997, is. 5, pp. 43–50. (In Russ.).

*Anikeev D.R.* Conjugate variability and heritability of signs of female generative sphere of common pine in conditions of industrial pollution. *Lesovedenie*, 2000, is. 4, pp. 56–62. (In Russ.).

*Antipov V.G.* Sustainability of woody plants for industrial gases. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1979. 216 p. (In Russ.).

*Armand A.D., Kaidakova V.V., Kushnareva G.V., Dobrodeev V.G.* Determination of the limits of geosystems' stability on the example of the vicinity of the Monchegorsk metallurgical works. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geografich.*, 1991, vol. 1, pp. 93–104. (In Russ.).

*Augustaitis A.A.* Features of formation of aboveground phytomass of pine young trees in the conditions of environmental pollution. In: *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989, vol. 12, pp. 32–51. (In Russ.).

*Augustaitis A.A.* Regularities of growth of Scots pine stands at different levels of environmental pollution: PhD Thesis. Moscow: Institute of global climate and ecology, 1992. 22 p. (In Russ.).

*Barker J.R., Tingey D.T.* Air pollution effects on biodiversity. Springer: Science & Business Media, 2012. 322 p.

*Beloborodov V.M., Efimov Yu.P., Stebakova V.N.* Yield of Scots pine cones on fertilized seed plantations. *Lesovedenie*, 1983, is. 3, pp. 18–26. (In Russ.).

*Breusova A.I.* Influence of mineral nutrition conditions on metabolism and fruiting of common pine. In: *Ecology of forest communities in Northern Kazakhstan*. Norin B.N. (ed.). Moscow: Nauka, 1984, pp. 24–29. (In Russ.).

Calabrese E.J. Hormesis: why it is important to toxicology and toxicologists. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, vol. 27, pp. 1451–1474.

Calabrese E.J., Blain R.B. Hormesis and plant biology. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, pp. 42–48.

Cedergreen N., Streibig J.C., Kudsk P., Mathiassen S.K., Duke S.O. The occurrence of hormesis in plants and algae. *Dose-Response*, 2007, vol. 5, pp. 150–162.

Cox R.M. Air pollution effects on plant reproductive processes and possible consequences to their population biology. In: Barker J.R., Tingey D.T. (eds.). *Air pollution effects on biodiversity*. Springer: Boston, 1992, pp. 131–158.

Dzugaev M.D. Karabash – the municipality of «ecological disaster». *Bulletin of the Chelyabinsk University. Ser. 9 – Jurisprudence*, 2003, is. 2, pp. 92–97. (In Russ.).

Erofeeva E.A. Dependence of drooping birch (*Betula pendula*) and lime tree (*Tilia cordata*) relative seed production as a new seed production index on the intensity of motor traffic pollution. *Advances in Environmental Biology*. 2014, vol. 8, is. 13, pp. 282–286.

Fedorkov A.L. Influence of aerotechnogenic pollution on the safety of seeds and the development of a Scots pine embryo. *Lesovedenie*, 1994, is. 5, pp. 36–40. (In Russ.).

Fedotov I.S., Karaban' R.T., Tikhomirov F.A., Sisigina T.I. Assessment of the effect of sulfur dioxide on pine forests. *Lesovedenie*, 1983, is. 6, pp. 23–27.

Feklistov P.A., Tutygin G.S., Drozhzhin D.P. The state of pine stands in the conditions of air pollution of the atmosphere. Arkhangelsk: ASTU, 2005. 132 p.

Gabeyev V.N. Biological productivity of Priobie forests. Novosibirsk: Nauka, 1976. 171 p. (In Russ.).

Grime J.P. Plant strategies and vegetation processes. New York: John Wiley, USA, 1979. 222 p.

Hemborg A.M., Karlsson P.S. Somatic costs of reproduction in eight subarctic plant species. *Oikos*, 1998, vol. 82, pp. 149–157.

Holmsgaard F., Olsen H.C. Vejrets intlydelse på bøgens frugtsætning. *Det. forstl. Forsøgsvaesen i Danmark*. 1960, vol. 26, pp. 347–370.

Houston D.B., Dochinger L.S. Effect of ambient air pollution on cone seed and pollen characteristics in Eastern white and red pines. *Environmental Pollution*, 1977, vol. 12, pp. 1–5.

Ibragimova E.E. Influence of technogenic pollution on the viability of female generative organs and the seed quality of *Pinus sylvestris* L. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Tauride National University. Series «Biology, Chemistry»*, 2010, vol. 23, is. 2, pp. 89–95. (In Russ.).

Karaseva M.A. Growth, seed production and quality of Siberian larch in the middle Volga-river region. *Lesnoe Khozyaistvo*, 2001, is. 3, pp. 44–45. (In Russ.).

Keller T., Beda H. Effect of SO<sub>2</sub> on the germination of conifer pollen. *Environmental Pollution*, 1984, vol. 33, is. 3, pp. 237–243.

Khamidullin A., Kotov S., Vorob'ev V. Integrated effect of atmosphere pollution and cutting on seed production of dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg.) urban populations. *International Journal of Pharmacy & Technology*, 2016, vol. 8, is. 2, pp. 14634–14642.

Khramova N.F., Khramov A.A. Seed productivity and phytomass of *Pinus sibirica* Du Tour. In: *Biology of seed propagation of coniferous trees of Western Siberia*. Novosibirsk: Nauka, 1974, pp. 95–105. (In Russ.).

Kolesnikov B.P. Forest-growing conditions and forest-growing areas of the Chelyabinsk region. In: *Issues of Restoration and Increase of Forest Productivity in the Chelyabinsk region*. Proceedings of the Institute of Biology of the UFAN of the USSR, Sverdlovsk, 1961, vol. 26, pp. 3–44. (In Russ.).

Konchina T.A., Guseva M.V. Studying the influence of technogenic influence on the seed productivity of plants. *Molodoy Uchenyi*, 2014, vol. 21.1, pp. 275–279. (In Russ.).

Koroteeva E.V., Weisberg E. I., Kuyantseva N.B. Assessment of the status of forest coenoflora in the impact zone of Karabash copper smelting plant (Southern Urals). *Proceedings of the Samara scientific center of RAS*, 2011, vol. 13, is. 1, pp. 1005–1011. (In Russ.).

Korshikov I.I. Plants resistance to technogenous environmental pollutants. *Promyshlennaya Botanika*, 2004, is. 4, pp. 46–57. (In Russ.).

Korshikov I.I., Lapteva H.V., Belonozhko Yu.A. Quality of pollen and cytogenetic changes of Scotch pine as indicators of the impact of the technogenically polluted environment of Krivoy Rog. *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, vol. 8, is. 2, pp. 250–255.

Korshikov I.I., Lapteva Ye.V., Litvinenko Yu.S. Pollen morphology changes in *Pinus Pallasiana* D. DON introduced stands from technogenic polluted areas. *Promyshlennaya Botanika*, 2014, is. 14, pp. 61–68. (In Russ.).

Kozlov M.V., Zvereva E.L. Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia. *Environmental Pollution*, 2004, vol. 132, pp. 443–451.

Kozłowski T.T., Keller T. Food relations of woody plants. *The Botanical Review*, 1966, vol. 32, is. 4, pp. 293–382.

Kramer P.J., Kozłowski T.T. Physiology of woody plants. NY: Academic Press, Inc. 1979. 811 p.

Kumari N. Effects of pollutants on seed germinability, reproductive capacity and yield of mustard plant. *International Journal of Chemical Studies*, 2018, special is. 4, pp. 96–98.

Legoshina O.M. Adaptive reactions and phytoindication ability of woody plants in conditions of technogenic pollution: Abstract of Dr. Sci. dissertation. 03.02.08. Tomsk: National Research Tomsk State University, 2018. 24 p. (In Russ.).

Lyakhova N.P., Mosin V.I. Stimulation of seeding of Scots pine in forest-seeded areas. In: *Ecology of forest communities in Northern Kazakhstan*. Norin B.N. (ed.). Moscow: Nauka, 1984, pp. 102–105. (In Russ.).



Marthandan V., Bhavyasree R.K., Vinothini N., Tamilarasan C. Impact of polluting agents on seed quality. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2018, vol. 7, is. 6, pp. 2728–2732.

Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L., Zavyalov K.E., Kuzmina N.A., Potapenko A.M. Sowing qualities of Scots pine seeds in the conditions of aerotechnogenic emissions of magnesite production. *Lesa Rossii i Khozyaistvo v Nikh*, 2016, vol. 59, is. 4, pp. 42–48. (In Russ.).

Noskova N.E., Tretyakova I.N. Influence of stress on the reproductive abilities of Scots pine. *Coniferous of the Boreal Area*, 2006, is. 3, pp. 54–63. (In Russ.).

Oskolkov V.A. The quality of Scotch pine pollen under different levels of pollution. *Lesovedenie*, 1999, is. 2, pp. 16–21. (In Russ.).

Ovington J.D., Murray G. Determination of acorn fall. *Quarterly Journal of Forestry*, 1964, vol. 58, pp. 152–159.

Palumets Ya.K. Modeling of the distribution of spruce phytomass. *Soviet Forest Sciences*, 1990, is. 3, pp. 36–40. Translated from *Lesovedenie*, 1990, is. 3, pp. 43–48.

Panicheva D.M. Gametophytic safety of Scots pine seeds in chronic exposure to alkaline industrial discharges. *Problems of forest science and forestry*. Gomel, 2005, vol. 63, pp. 228–230. (In Russ.).

Pavlov I.N. Dynamics of sowing qualities of *Larix sibirica* Ledeb. seeds in forests of southern Siberia from 1936 to 2000. *Coniferous of the Boreal Area*, 2003, is. 1, pp. 14–21. (In Russ.).

Podzorov N.V. The effect of smoke in the air on the quality of Scotch pine seeds. *Lesnoe Khozyaistvo*, 1965, is. 7, pp. 47–49. (In Russ.).

Pollard A.S., Williamson B.J., Taylor M., Purvis W.O., Goossens M., Reis S., Aminov P., Udachin V., Osborne N.J. Integrating dispersion modelling and lichen sampling to assess harmful heavy metal pollution around the Karabash copper smelter, Russian Federation. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, vol. 6, is. 6, pp. 939–945.

Potashova Yu.I. The state of Scots pine stands in the conditions of motor traffic pollution: Abstract of Dr. Sci. dissertation. 06.03.01; 06.03.03. Arkhangelsk: AGTU, 2008. 20 p. (In Russ.).

Reznik D. Costs of reproduction: an evaluation of the empirical evidence. *Oikos*, 1985, vol. 44, pp. 257–267.

Rosati A., Paoletti A., Al Hariri R., Morelli A., Famiani F. Resource investments in reproductive growth proportionately limit investments in whole-tree vegetative growth in young olive trees with varying crop loads. *Tree Physiology*, 2018, vol. 38, pp. 1267–1277.

Saleem B.A., Malik A.U., Pervaz M.A., Khan A.S. Growth regulators application affects vegetative and reproductive behaviour of 'blood red' sweet orange. *Pakistan Journal of Botany*, 2008, vol. 40, is. 5, pp. 2115–2125.

Sidaravicius I.M. Analysis of phytomass and morphological structure of the crowns of a pine forest under atmospheric pollution of the environment. In: *Study and modeling of forest stand growth in a polluted environment*. Kaunas: Lithuanian Agricultural Academy, 1987, pp. 45–55. (In Russ.).

*Sidhu S.S., Staniforth R.J.* Effects of atmospheric fluorides on foliage, and cone and seed production in balsam fir, black spruce, and larch. *Canadian Journal of Botany*, 1986, vol. 64, is. 5, pp. 923–931.

*Solntseva M.P., Glazunova K.P.* Influence of industrial and traffic pollution on reproduction of spermatophytes. *Zhurnal Obshchei Biologii*, 2010, vol. 71, is. 2, pp. 163–175. (In Russ.).

*Stavrova N.I.* Influence of atmospheric pollution on coniferous seed production. In: *Forest ecosystems and atmospheric pollution*. V.A. Alekseev (ed.). Leningrad: Nauka, 1990, pp. 113–121. (In Russ.).

*Tarkhanov S.N.* State of forest ecosystems in the conditions of atmospheric pollution in the European North: Abstract of Dr. Sci. dissertation. 03.02.08. Syktyvkar: Institute of biology of the Komi Scientific Center of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, 2011. 40 p. (In Russ.).

*Tote C., Delalieux S., Goossens M., Williamson B.J., Swinnen E.* Monitoring environmental health using spot-vegetation-derived and field-measured spectral indices in Karabash, Russia. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, is. 7, pp. 2516–2533.

*Tretyakova I.N., Noskova N.E.* Scotch pine pollen under conditions of environmental stress. *Russian Journal of Ecology*, 2004, vol. 35, is. 1, pp. 20–26. Translated from *Ekologiya*, 2004, is. 1, pp. 26–33.

*Tuomi J., Hakala T., Haukioja E.* Alternative concepts of reproductive effort, cost of reproduction and selection in lifehistory evolution. *American Zoologist*, 1983, vol. 23, pp. 25–34.

*Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bergman I.E.* Biological productivity of Ural forests under conditions of air pollutions: studying a system of regularities. Yekaterinburg, Ural State Forest Engineering University, 2012. 366 p. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/458> (In Russ.).

*Usoltsev V.A., Vorobeichik E.L., Bornikov A.V., Zhanabayeva A.S.* Biological productivity of forests near the Ural copper smelters. In: *Boreal Forests in a Changing World: Challenges and Needs for Actions*. Proceedings of 15th IBFRA International Science Conference. August 15–21 2011. Krasnoyarsk, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, 2011, pp. 193–197. URL: [http://ibfra.org/documents/IBFRA\\_proceedings\\_2011.pdf](http://ibfra.org/documents/IBFRA_proceedings_2011.pdf).

*Usoltsev V.A., Bergman I.E., Vorobeychik E.L., Azarenok V.A., Kryuk V.I., Lugansky N.A.* Biological productivity of forest lands of the Urals disturbed by industrial pollution. In: *Biological recultivation of disturbed lands / Materials of the Xth All-Russian Scientific Conference with international participation*; Yekaterinburg, September 4–7, 2017. Yekaterinburg: USFEU, 2017, pp. 313–319. (In Russ.).

*Vakhnina I.L.* Variation of generative parameters of *Pinus sylvestris* L. in the urban pollution. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2014, is. 9, pp. 109–112.

Vakhnina I.L. Characteristics of common pine seeds in the green zone of Chita city (Eastern Transbaikalia). *Vestnik Krasnoyarskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 2009, is. 8, pp. 98–103. (In Russ.).

Vakhnina I.L., Zamana L.V. Influence of snow and soil cover pollution in the green zone of Chita city on the germination of Scots pine seeds. *Lesovedenie*, 2013, is. 2, pp. 38–44. (In Russ.).

Valetova E.A. Influence of technogenic pollution on the reproductive ability of Scots pine: Abstract of Dr. Sci. dissertation. 03.00.16. Barnaul: Altay State University, 2009. 19 p. (In Russ.).

Venne H., Scholz F., Vornweg A. Effects of air pollutants on reproductive processes of poplar (*Populus* spp.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In: *Genetic effects of air pollutants in forest tree populations*. F. Scholz, H.-R. Gregorius and D. Rudin (eds.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1989, pp. 89–103.

Vitzthum V. Evolutionary models of women's reproductive functioning. *Annual Review of Anthropology*, 2008, vol. 37, pp. 53–73.

Vorobeichik E.L., Khantemirova E.V. Reaction of forest phytocenoses to technogenic pollution: dose-effect dependences. *Russian Journal of Ecology*, 1994, vol. 25, is. 3, pp. 171–180.

Vorobyov V.N. Method of retrospective study of seed yield dynamics of *Pinus sibirica* Du Tour. *Botanicheskiy Zhurnal*, 1979, vol. 64, is. 7, pp. 971–974. (In Russ.).

Vorobyov V.N. Biological bases of comprehensive utilization of *Pinus sibirica* Du Tour forests. Novosibirsk: Nauka, 1983. 254 p. (In Russ.).

Wesolowski T., Rowinski P., Maziarz M. Interannual variation in tree seed production in a primeval temperate forest: does masting prevail? *European Journal of Forest Research*, 2015, vol. 134, pp. 99–112.

Williamson B.J., Purvis O.W., Mikhailova I.N., Spiro B., Udachin V. The lichen transplant methodology in the source apportionment of metal deposition around a copper smelter in the former mining town of Karabash, Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, vol. 141, pp. 227–236.

Wolters J.H.B., Martens M.J.M. Effects of air pollutants on pollen. *The Botanical Review*, 1987, vol. 53, pp. 372–414.

Yarmishko V.T. Scots pine and atmospheric pollution in the European North. SPb.: NII Chemie of SPbSU, 1997. 210 p. (In Russ.).

Zarubina I.A. Assessment of the state of common pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations under conditions of aerotechnogenic pollution (Ust'-Ilimsky district of the Irkutsk region): Abstract of Dr. Sci. dissertation. Krasnoyarsk: Siberian State Technical University, 2011. 17 p. (In Russ.).

Zavyalov K.E. The state of artificial stands of *Betula pendula* Roth. in the conditions of magnesian contamination: Abstract of Dr. Sci. dissertation. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2009. 16 p. (In Russ.).

Zenkova E.L., Kazantseva M.N. Influence of technogenic pollution of the Tyumen city on the reproductive ability of the common pine (*Pinus sylvestris* L.). In: *Materials*

*of scientific-practical conf. «Urban ecosystem and development prospects»*, Ishim, 2008, pp. 59–62. (In Russ.).

Zhuikova T.V., Bezel' V.S., Pozolotina V.N., Severyukhina O.A. The reproductive capacity of plants in gradient of chemical environmental pollution. *Russian Journal of Ecology*, 2002, vol. 33, is. 6, pp. 407–412.

Zhuikova T.V., Bezel' V.S. Ecological toxicology. Moscow: Yurayt Publishing House, 2018. 362 p. (In Russ.).

Zverev V.E. Influence of industrial pollution on the ecology of *Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hamet-Ahti on the Kola Peninsula: Abstract of Dr. Sci. dissertation. 03.02.08. Yekaterinburg: Institute of Plant and Animal Ecology, 2012. 19 p. (In Russ.).

Zvereva E.L., Roitto M., Kozlov M.V. Growth and reproduction of vascular plants in polluted environments: a synthesis of existing knowledge. *Environmental Review*, 2010, vol. 18, pp. 355–367.

*Материал поступил в редакцию 16.01.2021*

---

**Усольцев В.А., Цепордей И.С., Ковязин В.Ф., Уразова А.Ф., Борников А.В.** Биомасса генеративных органов сосны обыкновенной и березы повислой в градиенте загрязнений от Карабашского медеплавильного завода на Урале // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 234. С. 23–52. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.23-52

Загрязнение лесов сильно влияет на их биологическую продуктивность, но вклад генеративной сферы в нее изучается редко. Наше исследование биомассы генеративных органов деревьев и древостоев сосны обыкновенной и березы повислой проводилось в течение одного вегетационного периода в градиенте загрязнения от Карабашского медеплавильного завода на Южном Урале. Установлено, что максимальная биомасса генеративных органов сосны и березы на уровне как дерева, так и древостоя, приходится на буферную часть градиента загрязнения, в которой древостой, согласно явлению гистерезиса, переходит из одного устойчивого состояния в другое, и на эту же буферную зону приходится максимальная изменчивость биомассы генеративных органов. Полученная закономерность, общая для двух древесных видов, указывает на повышенную адаптивную реакцию массы генеративной сферы деревьев и древостоев на загрязнение в буферной зоне, и можно предположить, что это отражает хорошо известное явление гистерезиса в биологии. Высказанное предположение требует углубленного изучения влияния загрязнения на генеративную сферу лесных сообществ.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, береза повислая, выбросы медеплавильного завода, биомасса генеративной сферы, изменчивость биомассы, градиент загрязнения, буферная зона, гистерезис, гистерезис.

**Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Kovyazin V.F., Urazova A.F., Bornikov A.V.** Biomass of generative sphere of Scots pine and drooping birch in the pollution gradient from the Karabash copper smelter on the Ural. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2021, is. 234, pp. 23–52 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.234.23-52

Forest pollution strongly affects their biological productivity, but the contribution of the generative sphere to it is rarely studied. Our study of the biomass of generative organs of trees and stands of Scots pine and drooping birch was performed during one growing season in the pollution gradient from the Karabash copper smelting plant in the southern Urals. It is stated the maximum biomass of generative organs of pine and birch at the level of both a tree and a stand, falls on the buffer part of the pollution gradient, in which the tree stand, according to the phenomenon of hysteresis, passes from one stable state to another one, and the same buffer zone accounts for the maximum variability of the biomass of generative organs. The resulting pattern, common to the two species, indicates an increased adaptive response of trees and stands to pollution in the buffer zone in terms of the mass of the generative sphere and one can suppose it reflects the well known phenomenon of hormesis in biology. This assumption requires in-depth studies of the impact of pollution on the generative sphere of forest communities.

**Key words:** Scots pine, drooping birch, copper smelter emissions, generative sphere biomass, biomass variability, pollution gradient, buffer zone, hysteresis, hormesis.

---

**УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич** – заслуженный лесовод России, профессор кафедры лесоводства Института леса и природопользования Уральского государственного лесотехнического университета, профессор, главный научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, доктор сельскохозяйственных наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: Usoltsev50@mail.ru

**USOLTSEV Vladimir A.** – DSc (Agricultural), professor of the Department of Forestry, Ural State Forest Engineering University, chief researcher at the Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

620100. Sibirskiy Trakt 37. Yekaterinburg. Russia E-mail: Usoltsev50@mail.ru

**ЦЕПОРДЕЙ Иван Степанович** – научный сотрудник Ботанического сада УрО РАН, кандидат сельскохозяйственных наук.

620144, ул. 8 Марта, д. 202а, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru.

**TSEPORDEY Ivan S.** – PhD (Agricultural), scientist at Botanical Garden of Ural Branch of RAS.

620144. 8 Marta str. 202a. Yekaterinburg. Russia. E-mail: ivan.tsepordey@yandex.ru.

**КОВЯЗИН Василий Федорович** – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vfkedr@mail.ru

**KOVYAZIN Vasiliy F.** – DSc (Biology), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: vfkedr@mail.ru

**УРАЗОВА Алина Флоритовна** – доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», кандидат сельскохозяйственных наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ura-alina@mail.ru

**URAZOVA Alina F.** – PhD (Agricultural), Ural State Forest Engineering University.

620100. Sibirskiy Trakt 37. Yekaterinburg. Russia E-mail: ura-alina@mail.ru

**БОРНИКОВ Александр Вячеславович** – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет», кандидат сельскохозяйственных наук.

460014, ул. Челюскинцев, д. 18, Оренбург, Россия. E-mail: bornikov87@mail.ru

**BORNIKOV Aleksandr V.** – PhD (Agricultural), Orenburg State Agrarian University.

460014. Chelyuskintsev str. 18. Orenburg. Russia. E-mail: bornikov87@mail.ru