

УДК 504.5:669.2/.8:582.475

**ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА
НА ФОРМУ СТВОЛА ЕЛИ СИБИРСКОЙ (*PICEA OBOVATA* LEDEB.)
И ПИХТЫ СИБИРСКОЙ (*ABIES SIBIRICA* LEDEB.)
(PINÁCEAE, PINOPSIDA)**

И. Е. Бергман

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
Россия, 620144, Екатеринбург, 8 Марта, 202
E-mail: 5554505@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.12.14 г.

Влияние выбросов медеплавильного завода на форму ствола ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) (Pináceae, Pinopsida). – Бергман И. Е. – Исследовано влияние промышленного загрязнения на показатели формы ствола деревьев ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) в районе действия Среднеуральского медеплавильного завода (г. Ревда Свердловской обл., южная тайга). По мере приближения к источнику загрязнения сбег ствола увеличивается при уменьшении его полндревесности. Для ели сибирской показано статистически значимое увеличение сбega в комлевой (на 22.9%), нижней (на 35.7%), средней (на 18.0%) и верхней (на 9.0%) частях ствола. Для пихты сибирской, а также деревьев ели второго яруса значимого влияния зоны загрязнения на форму ствола не установлено. Возможными причинами увеличения сбega может быть усиление ветровой нагрузки на ствол вследствие изменений условий местообитания и перестройки фракционной структуры самого дерева, а также прямое действие поллутантов, снижающее камбиальную активность преимущественно в верхней части ствола.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, сбег, полндревесность, ель сибирская, *Picea obovata*, пихта сибирская, *Abies sibirica*, ствол дерева, ярус, ветровая нагрузка.

Effect of copper smelter emissions on the stem shape of Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) and Siberian fir (*Abies sibirica* Ledeb.) (Pináceae, Pinopsida). – Bergman I. E. – The influence of industrial pollution on the stem shape of Siberian spruce and fir trees was estimated in the Middle-Ural Copper Smelter vicinity (Revda, Sverdlovsk region, the southern taiga). As the pollution source is approached, the stem taper increases with a decreasing form factor. A statistically significant increase of the stem taper of Siberian spruce in the butt end (by 22.9%), the lower (35.7%), middle (18.0%) and upper (9.0%) parts of the stem is shown. No significant influence of pollution level was detected for the tree shape of Siberian fir and spruce from the second tree layer. The stem taper increase can be caused by the increased wind load upon the trunk due to changes in habitat conditions and restructuring of the tree's fractional structure, as well as the direct effect of pollutants to decrease the cambium activity (mainly in the upper part of the trunk).

Key words: industrial pollution, stem taper, form factor, Siberian spruce, *Picea obovata*, Siberian fir, *Abies sibirica*, tree stem, tree layer, wind load.

DOI: 10.18500/1684-7318-2016-1-17-28

ВВЕДЕНИЕ

Форму древесного ствола считают важной морфометрической характеристикой, что определяет ее широкое применение в дендрометрии и лесоведении (Лебков, Каплина, 2001). Несмотря на огромное количество публикаций, посвященных

ее изучению (Кулешис, 1972; Кофман, 1986; Дудина, Макаренко, 1997; Гурский А. А. н., Гурский А. Ак., 2004; Богачев, 2006; Дудина, 2007; Исаев, 2009; Gray, 1956; Larson, 1963; Schinozaki et al., 1964 *a, b*; Chiba, Shinozaki, 1994; Valentine, Gregoire, 2001; Tong, Zhang, 2008 и др.), совершенствование методов оценки формы ствола и моделей его образующей продолжает оставаться актуальной задачей (Петровский и др., 2012; Демаков, 2014; Li, Weiskittel, 2010 и др.). Следует подчеркнуть, что подавляющее большинство работ, связанных с изучением формы ствола, касается ненарушенных территорий и крайне мало публикаций посвящено изменению формы в условиях промышленного загрязнения (Захаренко, Рунова, 2000; Pretzsch et al., 2010).

В настоящей работе рассмотрены изменения формы ствола у ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) и пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) по мере приближения к точечному источнику атмосферного загрязнения – Среднеуральскому медеплавильному заводу. Из многих показателей формы ствола мы используем два наиболее информативных – сбег и полндревесность (Третьяков, 1952; Воропанов, 1963).

В качестве рабочей гипотезы выдвинуто предположение, что по мере приближения к источнику загрязнения величина сбega увеличивается, а полндревесность – уменьшается. Данная гипотеза базируется на результатах предыдущих исследований формы ствола ели европейской (*Picea abies* L. Karst.) (Pretzsch et al., 2010), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) (Захаренко, Рунова, 2000) в условиях загрязнения, в которых была продемонстрирована именно такая направленность изменений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в районе действия Среднеуральского медеплавильного завода, расположенного на окраине г. Ревда Свердловской области, в 50 км к западу от г. Екатеринбург. Предприятие действует с 1940 г. и считается одним из крупнейших источников атмосферного загрязнения в России. Основные ингредиенты выбросов – SO_2 и пылевые частицы с сорбированными токсичными элементами (Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, As, Hg и др.). Полигон исследования был подразделен на три зоны: импактную (расстояние до источника загрязнения 1–2 км), буферную (расстояние 4 – 7 км) и фоновую (расстояние 30 км). Подробное описание уровней загрязнения, таксационная характеристика древостоев и характер изменения экосистем под влиянием загрязнения приведены ранее (Воробейчик, Хантемирова, 1994; Воробейчик и др., 1994, 2014; Кайгородова, Воробейчик, 1996; Усольцев и др., 2012). Характеристика загрязнения участков представлена в табл. 1.

Для оценки сбega и полндревесности в градиенте загрязнения были использованы модельные деревья, которые отбирали (в 2008 – 2009 гг.) как средние по диаметру, высоте и размерам кроны для ступени толщины в пределах всего диапазона варьирования их диаметров на участке. Каждое модельное дерево было отнесено к соответствующему ярусу (первый или второй) и группе возраста (средневозрастные – 41 – 80 лет, приспевающие – 81 – 100 лет, спелые – 101 – 160 лет). Подробная характеристика модельных деревьев представлена в нашей работе

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА НА ФОРМУ СТВОЛА

(Бергман, 2011). При выборе модельных деревьев исключали загущенные или открытые участки леса. Общее количество модельных деревьев ели – 33 (из них в фоновой зоне – 7, буферной – 14, импактной – 12), пихты – 32 (в фоновой зоне – 7, буферной – 13, импактной – 12).

Таблица 1

Параметры загрязнения верхнего (0 – 5 см) слоя почвы
на разном удалении от медеплавильного завода

Зона загрязнения	Удаление, км	Концентрация подвижных форм, мкг/г		рН, водный
		Cu	Pb	
Фоновая	30	52.2±21.4	65.9±23.5	4.89±0.06
Буферная	7	424.1±21.9	215.0±14.4	5.03±0.06
	4	366.7±114.3	135.0±45.3	4.55±0.03
Импактная	2	1039.6±146.9	317.1±31.6	4.63±0.09
	1	1084.4±131.7	378.7±46.4	4.60±0.12

Примечание. Сост. по: Трубина и др., 2014. Приведено среднее ± ошибка, учетная единица – пробная площадь, $n = 5$.

Деревья спиливали на уровне корневой шейки, измеряли общую длину дерева от среза и длину кроны, а также возраст по годичным кольцам на пне. Затем ствол раскряжевывали по относительным длинам – 0; 0.1; 0.2; ... 0.9 H (где H – общая длина дерева) и определяли диаметры сортиментов в коре и без коры в двух взаимно перпендикулярных направлениях (с точностью 0.5 мм). Ствол условно делили на четыре части: 0 H – 0.1 H – комлевая; 0.1 H – 0.4 H – нижняя; 0.4 H – 0.7 H – средняя; 0.7 H – 1.0 H – верхняя. Вблизи отметок 0.2, 0.5, 0.8 H выпиловали диски, древесину и кору у которых взвешивали отдельно, помещали в пластиковые пакеты известной массы и далее сушили при 105°C в течение 2 – 4 суток. По результатам замеров рассчитывали объем древесины дисков и ствола в целом, а также его массу в абсолютно сухом состоянии. При раскряжке ствола часть коры дерева терялась (в виде опилок), поэтому значения сбega и полндревесности в расчетах представлены исключительно без коры.

Классические формулы определения сбega и полндревесности ствола предполагают использование в расчетах диаметра на высоте груди (1.3 м); вместо него мы использовали диаметр на относительной высоте ствола (0.1 H), что необходимо для сравнения показателей формы стволов деревьев, отличающихся по высоте. Сбег ствола ($S_{\text{ств}}$, см/м) определяли по формуле:

$$S_{\text{ств}} = D_{0.1H} / (H - 0.1H),$$

где H – высота дерева (м), $D_{0.1H}$ – диаметр ствола на высоте 0.1 H (см). Сбег комлевой ($S_{\text{комля}}$), нижней ($S_{\text{низ}}$), средней ($S_{\text{средн}}$), верхней ($S_{\text{верх}}$) частей ствола определяли следующим образом: $S_{\text{комля}} = (D_{0H} - D_{0.1H}) / 0.1H$; $S_{\text{низ}} = (D_{0.1H} - D_{0.4H}) / (0.4H - 0.1H)$; $S_{\text{средн}} = (D_{0.4H} - D_{0.7H}) / (0.7H - 0.4H)$; $S_{\text{верх}} = (D_{0.7H} - D_{1.0H}) / (1.0H - 0.7H)$.

Под полндревесностью понимали отношение объема ствола (за исключением объема его комлевой части) к объему цилиндра, имеющего высоту ($H - 0.1H$) и диаметр основания, равный диаметру дерева на высоте 0.1 H .

Фитомассу крон определяли после отделения ветвей от ствола и их последующего взвешивания на 50 килограммовых весах с ценой деления 50 г. Для определения абсолютно сухой массы хвои и ветвей из каждой части кроны были взяты их образцы, которые сразу же взвешивали с точностью 0.01 г и сушили при температуре 100 – 105°C. По полученным значениям рассчитывали абсолютно-сухую массу хвои и ветвей всего дерева. Исследуемые деревья были условно поделены на две категории: с низкой относительной массой кроны (отношение общей фитомассы кроны к общей надземной фитомассе дерева) равно 0.18 – 0.35 (ель) и 0.13 – 0.25 (пихта) и высокой относительной массой кроны – 0.36 – 0.51 (ель) и 0.26 – 0.51 (пихта).

Известно, что возраст, высота, масса кроны дерева играют важную роль в формировании образующей ствола (Кофман, 1986; Doerner, 1965; McMahon, 1975; King, Loucks, 1978), поэтому они выбраны в качестве основных предикторов. Статистический анализ проведен в пакетах Statistica 8.0 и R Portable 2.11.0. Значимость влияния отдельных факторов и их взаимодействия оценена с помощью многофакторного дисперсионного анализа с коррекцией (где это необходимо) на неоднородность дисперсий по методу Хьюбера – Уайта (алгоритм hc3).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние загрязнения на сбег ствола. Сбег ствола изменяется в широких пределах (для ели – 0.91 – 1.92 см/м, для пихты – 0.90 – 1.69 см/м) в зависимости от зоны загрязнения, яруса древостоя, относительной массы кроны и вида дерева (рис. 1, 2).

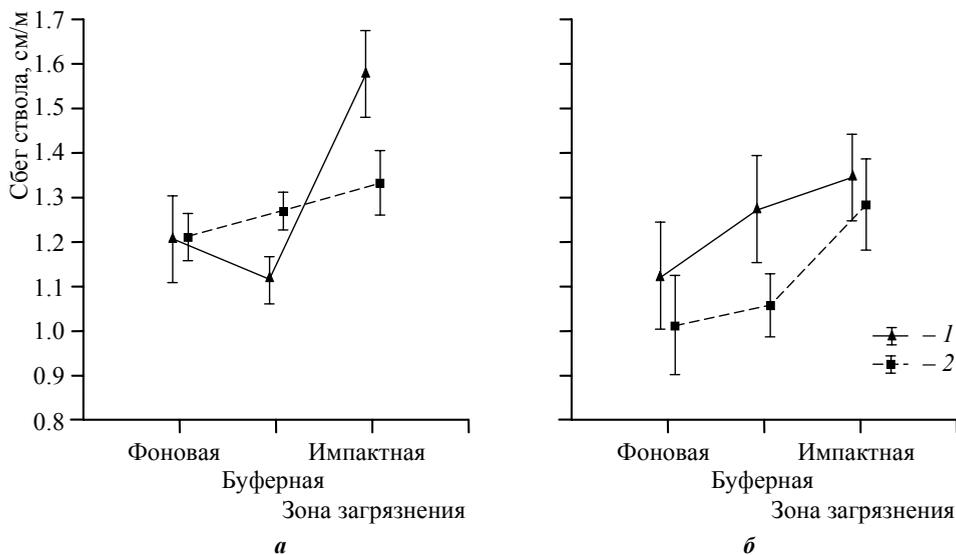


Рис. 1. Сбег ствола ели сибирской (1) и пихты сибирской (2) в зависимости от зоны нагрузки (фоновая, буферная, импактная) и яруса (а – первый ярус; б – второй ярус). Вертикальные линии – стандартная ошибка

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА НА ФОРМУ СТВОЛА

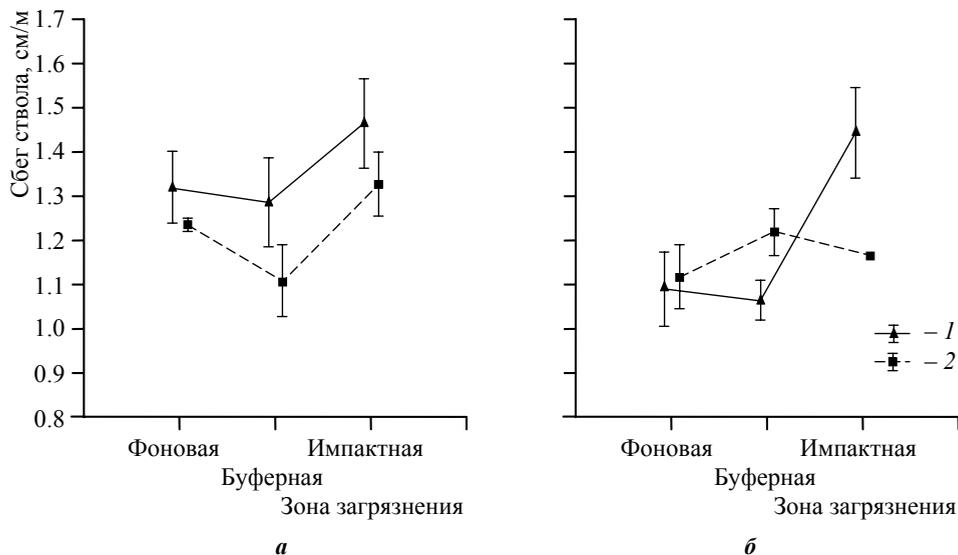


Рис. 2. Сбег ствола ели сибирской (1) и пихты сибирской (2) в зависимости от зоны нагрузки (фоновая, буферная, импактная) и относительной массы кроны (а – высокая относительная масса; б – низкая относительная масса). Вертикальные линии – стандартная ошибка

Из-за ограниченного объема выборки проведение многофакторного дисперсионного анализа с включением всех факторов (зона загрязнения, ярус древостоя, относительная масса кроны, группа возраста, вид дерева) оказалось невозможным, поэтому он был заменен на серию двухфакторных ANOVA (табл. 2). Поскольку влияния группы возраста на показатели формы установлено не было, этот фактор был исключен из последующего анализа.

Изменение значений сбega ствола по зонам загрязнения и ярусам представлено на рис. 1, по зонам загрязнения и относительным массам кроны – на рис. 2. Наиболее ярко влияние зоны загрязнения проявляется на сбегистости ствола ели. С увеличением высоты дерева (переход в первый ярус) и относительной массы кроны сбег ствола ели возрастает на 3.3 и 14.3%, пихты – на 9.1 и 5.5% соответственно.

Сбег не одинаков для разных участков ствола (ель: $F_{3;128} = 61.4$; $p < 0.001$; пихта: $F_{3;124} = 99.3$; $p < 0.001$). В комлевой части из-за корневых наплывов он наибольший: 3.49 ± 0.32 см/м для ели и 2.81 ± 0.17 см/м для пихты. В нижней части ствола сбег наименьший: 0.85 ± 0.05 см/м для ели и 0.82 ± 0.04 см/м для пихты.

В силу того, что не все варианты сочетаний были представлены одинаково по зонам загрязнения (например, практически полностью отсутствовали деревья первого яруса с высокой относительной массой кроны), мы не смогли реализовать полный план дисперсионного анализа (табл. 3).

Таблица 2

Результаты двухфакторных дисперсионных анализов по оценке влияния зоны загрязнения и яруса и относительной массы кроны на сбег стволов ели и пихты

Источник изменчивости	Ель [33]			Пихта [32]	
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Влияние зоны загрязнения и яруса					
Зона загрязнения (З)	2	5.33	0.01	3.15	0.06
Ярус (Я)	1	0.39	0.54	5.03	0.03
З×Я	2	2.24	0.13	0.72	0.50
Влияние зоны загрязнения и относительной массы кроны					
Зона загрязнения (З)	2	4.56	0.02	0.44	0.65
Относительная масса кроны (К)	1	2.98	0.10	0.50	0.48
З×К	2	0.63	0.54	1.48	0.25

Примечание. Учетная единица – модельное дерево. Условные обозначения: *df* – число степеней свободы, *F* – критерий Фишера, *p* – достигнутый уровень значимости. Полу жирным выделено значимое влияние фактора. В квадратных скобках – количество модельных деревьев в анализе.

Сбег стволов деревьев, принадлежащих к одному ярусу с одинаковой относительной массой кроны по каждой зоне загрязнения и участку ствола, представлен на рис. 3. В зоне максимального загрязнения величина сбega стволов ели первого яруса с низкой относительной массой кроны на 18.5% (собственно ствол); 22.9% (комлевая часть); 35.7% (нижняя часть); 18.0% (средняя часть) и 9% (верхняя часть) выше, чем у аналогов в фоновой зоне (различия статистически значимы (см. табл. 3). Различий в сбеге ствола пихты, а также ствола ели второго яруса между зонами не установлено (см. табл. 3).

Таблица 3

Результаты дисперсионных анализов по оценке влияния зоны загрязнения и участка ствола дерева на сбег

Источник изменчивости	Ель, первый ярус, низкая относительная масса кроны [11]			Пихта, первый ярус, низкая относительная масса кроны [11]			Ель, второй ярус, высокая относительная масса кроны [13]		
	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Влияние зоны загрязнения*									
Зона (З)	2	5.09	0.038	2	0.28	0.61	2	0.02	0.98
Влияние зоны загрязнения и участка ствола**									
Зона (З)	2	8.55	0.001	2	0.22	0.65	2	0.13	0.88
Участок ствола (У)	3	144.7	<0.001	3	95.5	<0.001	3	23.4	<0.001
З×У	6	0.28	0.94	6	0.74	0.54	6	1.21	0.32

Примечание. * – учетная единица – модельное дерево. ** – учетная единица – участок ствола модельного дерева. В квадратных скобках – количество деревьев в выборке. Условные обозначения см. табл. 2.

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА НА ФОРМУ СТВОЛА

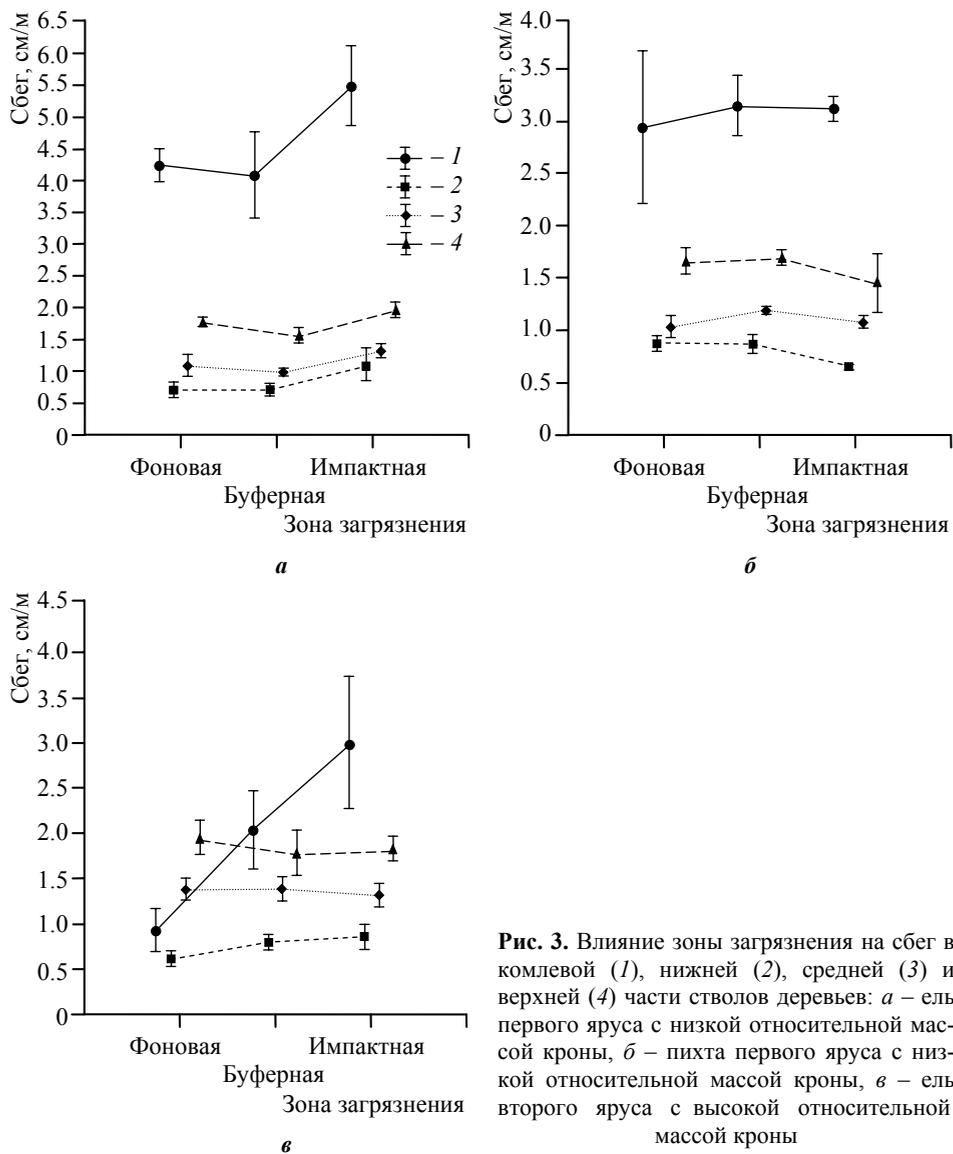


Рис. 3. Влияние зоны загрязнения на сбег в комлевой (1), нижней (2), средней (3) и верхней (4) части стволов деревьев: а – ель первого яруса с низкой относительной массой кроны, б – пихта первого яруса с низкой относительной массой кроны, в – ель второго яруса с высокой относительной массой кроны

Влияние загрязнения на полндревесность и вертикальную структуру фитомассы ствола. Значения полндревесности изменяются в интервале 0.33 – 0.50 (ель) и 0.37 – 0.53 (пихта). Полндревесность ствола ели первого яруса с низкой относительной массой кроны в импактной зоне на 11.4% ниже по сравнению с аналогами в фоновой зоне, а ствола ели второго яруса с высокой относительной

массой кроны – на 8.0%. Однако значимого влияния зоны загрязнения на полндревесность ствола не установлено ни для ели, ни для пихты ($F = 0.08 - 1.18$; $p = 0.33 - 0.79$). С увеличением уровня промышленного загрязнения происходит некоторое перераспределение фитомассы древесины. Так, доля нижней части (включая комлеву часть) стволов на импактной территории выше и составляет $73.3 \pm 0.9\%$ (ель) и $72.4 \pm 1.5\%$ (пихта). Тем не менее, данная тенденция, при одинаковых значениях яруса и относительной массы кроны, статистически не значима для обеих пород ($F = 0.43 - 1.90$; $p = 0.21 - 0.53$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Прямое сопоставление полученных нами абсолютных значений сбega и полндревесности с данными других авторов затруднено из-за различий в методических подходах. Тем не менее, наши оценки сбega стволов ели высоких ступеней толщины на фоновой территории сопоставимы с оценками, приводимыми В. К. Захаровым (Грошев и др., 1980), а оценке полндревесности – с приводимыми А. А. Смирновым (2007).

Форма стволов, сохраняя высокий консерватизм (Лебков, Каплина, 2003), всегда несколько различается в зависимости от влияния многочисленных факторов, часто действующих разнонаправлено. Большинство исследователей в качестве основных выделяют следующие: густота древостоя, полнота древостоя, климатические и микроклиматические условия произрастания, возраст дерева, эколого-биологические особенности вида дерева (Кофман, 1987; Gray, 1956; Larson, 1963 и др.). Наша методика позволяет исключить влияние первых двух, а климатические условия разных участков полигона исследования схожи. Следовательно, различия в форме ствола в градиенте загрязнения могут определять микроклиматические условия (ветровой и световой режимы), токсическое действие поллютантов в воздухе и почве, а также эколого-биологические особенности исследуемых видов (газоустойчивость, восприимчивость к болезням и вредителям и т.п.).

Увеличение сбega по мере увеличения высоты ствола и относительной массы кроны дерева логично связать с возрастанием ветровых нагрузок на дерево. Известно, что «деревья всегда тем более сбежисты, чем большему действию ветра они подвергаются; сильные утолщения нижних частей ствола – ответная реакция, увеличивающая прочность стволов верхнего полога и не наблюдающаяся у отставших в росте деревьев второго яруса» (Gray, 1956; цит. по: Кофман, 1986).

Мы не располагаем данными инструментальных измерений ветровых нагрузок на деревья в районе наших исследований. Но косвенные материалы свидетельствуют о том, что действие ветра вблизи завода на стволы деревьев выше, чем в других зонах, что может быть следствием изменений условий произрастания. Во-первых, с увеличением уровня загрязнения доля деревьев низких ступеней толщины увеличивается, а высоких – уменьшается (Фимушин, 1979; Цветков В., Цветков И., 2003; Бергман и др., 2013 и др.). Из-за низкой численности крупных деревьев верхнего полога вблизи завода и их неравномерного распределения ветровая нагрузка на каждое такое дерево возрастает. Увеличение скорости ветра вблизи источника загрязнения показано на основе прямых измерений в районе действия Мончегорского металлургического завода (Kozlov, 2002). Во-вторых, по мере

приближения к источнику выбросов изменяется фракционная структура дерева. Хорошо известна закономерность увеличения массы хвои равновеликих деревьев по мере ухудшения условий произрастания, что характеризует общую тенденцию снижения продуктивности хвои (Усольцев, 1974; Смирнов, 1997; Усольцев и др., 2010, 2012; Бергман, 2011). Увеличение массы ассимиляционного аппарата, в свою очередь, способствует увеличению общей парусности кроны, соответственно действию ветра на ствол возрастает.

Другой возможной причиной увеличения сбега и уменьшения полндревесности ствола ели по мере приближения к заводу может быть прямое токсическое действие выбросов. Так, было установлено увеличение сбега (при незначительном снижении полндревесности) ствола ели европейской при окулировании озоном (Pretzsch et al., 2010). На примере сосны обыкновенной и ели сибирской (Ярмишко, 1996; Чжан, 2009) показано, что снижение интенсивности накопления древесины под влиянием выбросов можно наблюдать на любом участке ствола, но в верхней части этот процесс выражен сильнее, чем в комлевой.

Увеличение сбега в условиях загрязнения, зарегистрированное нами для ели, может рассматриваться как компенсаторно-приспособительная реакция, позволяющая деревьям снижать темп роста в высоту (и, как следствие, перехват поллютантов кроной), которая реализуется за счет уменьшения камбиальной активности преимущественно в верхней части ствола.

Многие авторы (Захаренко, Рунова, 2000; Ярмишко, 2007; Zverev et al., 2013) отмечают существенные изменения формы ствола у деревьев, произрастающих в условиях промышленного загрязнения: карликовость, полустланниковую жизненную форму, скрученность ствола, закомелистость и т.п. Подобные изменения встречаются также у деревьев, растущих в неблагоприятных условиях Крайнего Севера, и подробно описаны в работе В. И. Ермакова (1986). Автор на примере берёзы пушистой (*Betula alba* L.) отмечает, что «...по мере ухудшения условий произрастания, ствол приобретает извилистую (скрученную) форму, что дает возможность ограничивать в большей или меньшей мере развитие кроны в высоту и тем самым располагать жизненно важные органы ближе к поверхности почвы, где экологические факторы менее суровы» (с. 44).

Для пихты статистически значимого влияния загрязнения на изменение формы ствола нами не установлено, что, по всей видимости, связано не столько с большей ее устойчивостью к загрязнению, сколько со стволовой гнилью, поразившей деревья этого вида на всей исследованной территории (Ставищенко, 2010). Значимого влияние поллютантов на форму ствола также не установлено для представителей второго яруса, вероятно всего, благодаря их лучшей защищенности от ветра и поллютантов представителями верхнего полога.

Следует также отметить влияние на форму ствола такого неучтенного нами фактора, как густота древостоя в начальный период формирования дерева, считающегося крайне важным (Лебков, Каплина, 2003). Форма ствола, которую приобрели деревья в молодом возрасте, определяет ее параметры и в более старших возрастах: так, стволы деревьев, формирующиеся в густых насаждениях, менее сбежисты по сравнению с разреженными древостоями (Лебков, Каплина, 2003). Исследуемая нами территория неоднократно подвергалась воздействию со сторо-

ны как природных (пожары, ветровалы, буреломы), так и антропогенных (рубки ухода) факторов, сила действия которых была не одинаковой во времени и пространстве. Учесть периодичность и интенсивность воздействия этих факторов на древостой и тем самым определить начальные условия формирования рассматриваемых модельных деревьев не представляется возможным, что, в свою очередь, несколько затрудняет интерпретацию полученных нами данных.

Следует отметить, что рассмотренные показатели формы ствола в меньшей степени реагируют на промышленное загрязнение по сравнению с другими параметрами, в частности, продуктивностью ассимиляционного аппарата, значение которой вблизи источника выбросов в 2.0 (ель) и 1.2 (пихта) раза ниже, чем на фоновой территории (Бергман, 2011). В то же время амплитуда увеличения сбега ствола сопоставима с увеличением фитомассы ассимиляционного аппарата равновеликих деревьев (ели – на 32.0%, пихты – на 18.0%) по мере приближения к Среднеуральскому медеплавильному заводу (Бергман, 2011).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением уровня промышленного загрязнения увеличивается сбег ствола ели, а его полнодревесность уменьшается, что подтверждает нашу исходную гипотезу. Эти изменения соответствуют перестройке вертикальной структуры фитомассы ствола в сторону увеличения доли нижних его частей. Для пихты, а также для представителей ели второго яруса значимого влияния зоны загрязнения на форму ствола не установлено.

Увеличение сбега ствола вблизи источника загрязнения может быть связано, как минимум, с двумя процессами: 1) увеличением ветровых нагрузок на ствол из-за изменений условий местообитания и перестройки фракционной структуры дерева; 2) токсическим действием поллютантов через угнетение камбиальной активности преимущественно в верхней части ствола.

Таким образом, произрастающие на импактной территории деревья ели первого яруса представляют собой организмы, сумевшие через перестройку формы ствола приспособиться к повышенным ветровым нагрузкам и токсическому действию поллютантов.

Автор выражает благодарность Е. Л. Воробейчику, А. В. Нестеркову за обсуждение и комментарии к тексту рукописи, В. А. Усольцеву, А. Ф. Уразовой, А. В. Борникову, А. С. Жанабаевой и А. С. Касаткину – за помощь в проведении полевых работ.

Работа завершена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-04-31488) и Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 15-12-4-26).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бергман И. Е. Биологическая продуктивность ели и пихты в градиенте атмосферных загрязнений на Урале : сравнительный анализ и составление таксационных таблиц : дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2011. 156 с.

Бергман И. Е., Воробейчик Е. Л., Жданова Т. Ю. Изменение строения древостоев под действием атмосферного загрязнения : модифицирующее влияние условий экотопа // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8. С. 25 – 27.

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА НА ФОРМУ СТВОЛА

- Богачев А. В.* Уравнение образующей ствола // Лесоведение. 2006. № 5. С. 50 – 57.
- Воробейчик Е. Л., Хантемирова Е. В.* Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение : зависимость доза-эффект // Экология. 1994. № 3. С. 31 – 43.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. 280 с.
- Воробейчик Е. Л., Трубина М. Р., Хантемирова Е. В., Бергман И. Е.* Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448 – 458.
- Воропанов П. В.* Лекции по лесной таксации : в 3 т. Брянск : Облполиграфиздата, 1963. Т. 1. 475 с.
- Грошев Б. И., Синицын С. Г., Мороз П. И., Сеперович И. П.* Лесотаксационный справочник. М. : Лесн. пром-сть, 1980. 288 с
- Гурский А. Ан., Гурский А. Ак.* Изучение формы и определение объемов древесных стволов на основе их математических моделей // Изв. Оренб. гос. аграрного ун-та. 2004. Т. 4, № 4 – 1. С. 68 – 69.
- Демаков Ю. П.* Ствол дерева как деформированный конус // Эко-потенциал. 2014. № 2 (6). С. 72 – 81.
- Дудина В. Н., Макаренко А. А.* Модель образующей ствола деревьев // Лесная наука на рубеже XXI века : сб. науч. работ. Гомель, 1997. Вып. 46. С. 266 – 268.
- Дудина В. Н.* Применение моделей образующей древесного ствола сосны для основных пород Казахстана // Изв. Оренб. гос. аграрного ун-та. 2007. Т. 3, № 15 – 1. С. 46 – 48.
- Ермаков В. И.* Механизмы адаптации березы к условиям Севера / под ред. Л. С. Козловой. Л. : Наука. Ленингр. отд-ние, 1986. 144 с.
- Захаренко Т. А., Рунова Е. М.* Оценка качества древесины на корню в техногенных лесах // Строение, свойства и качество древесины-2000 : материалы III междунар. симп. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2000. С. 229 – 231.
- Исаев С. П.* Биотический подход в построении математической модели образующей ствола дерева // Изв. С.-Петерб. лесотехн. академии. 2009. Вып. 188. С. 128 – 137.
- Кайгородова С. Ю., Воробейчик Е. Л.* Изменение некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // Экология. 1996. № 3. С. 187 – 193.
- Кофман Г. Б.* Рост и форма деревьев. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1986. 211 с.
- Кулешис А. А.* Влияние разных факторов на форму ствола сосны обыкновенной // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 1972. № 4. С. 10 – 14.
- Лебков В. Ф., Каплина Н. Ф.* Закономерности формы древесного ствола хвойных и лиственных пород // Вестн. Моск. гос. ун-та леса – Лесной вестник. 2001. № 5. С. 49 – 55.
- Лебков В. Ф., Каплина Н. Ф.* Возрастная динамика формы ствола деревьев сосны обыкновенной и кедра сибирского // Лесной вестн. 2003. № 1 (26). С. 18 – 24.
- Петровский В. С., Малышев В. В., Мурзинов Ю. В.* Моделирование параметров древесных стволов в насаждении // Лесотехнический журн. 2012. № 4 (8). С. 18 – 22.
- Смирнов А. А.* Особенности влияния регулярного ухода за лесом на продуктивность древостоев и качество древесины ели : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2007. 20 с.
- Ставищенко И.В.* Состояние лесных сообществ ксилотрофных грибов под воздействием промышленных аэрополлютантов // Экология. 2010. № 5. С. 397 – 400.
- Третьяков Н. В.* Некоторые положения советской лесной таксации // Справочник таксатора. М. : Гослесбумиздат, 1952. С. 18 – 62.
- Трубина М. Р., Воробейчик Е. Л., Хантемирова Е. В., Бергман И. Е., Кайгородова С. Ю.* Динамика лесной растительности после снижения промышленных выбросов : быстрое восстановление или продолжение деградации? // Докл. РАН. 2014. Т. 458, № 6. С. 721 – 725.
- Усольцев В. А.* Фитомасса крон спелых березово-осиновых насаждений в Северном Казахстане // Лесоведение. 1974. № 2. С. 86 – 88.

Усольцев В. А., Бергман И. Е., Уразова А. Ф., Борников А. В., Жанабаева А. С., Воробейчик Е. Л., Колтунова А. И. Изменение продуктивности ассимиляционного аппарата деревьев в градиенте промышленных загрязнений на Среднем Урале // Изв. Оренб. гос. аграрного ун-та. 2010. № 1. С. 40 – 43.

Усольцев В. А., Воробейчик Е. Л., Бергман И. Е. Биологическая продуктивность лесов Урала в условиях техногенного загрязнения : исследование системы связей и закономерностей. Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. лесотехн. ун-та, 2012. 365 с.

Фимушин Б. С. Закономерности роста сосновых древостоев и методика оценки ущерба, наносимого им промышленными выбросами в условиях пригородной зоны Свердловска : дис. ... канд. с.-х. наук. Свердловск, 1979. 169 с.

Цветков В. Ф., Цветков И. В. Лес в условиях аэротехногенного загрязнения. Архангельск, 2003. 354 с.

Чжан С. А. Особенности вторичных сукцессионных процессов в зонах антропогенного загрязнения // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 146.

Ярмишко В. Т. Влияние атмосферного загрязнения на состояние лесных экосистем // Влияние атмосферных загрязнений и других антропогенных и природных факторов на дестабилизацию состояния лесов Центральной и Восточной Европы : материалы междунар. науч. конф. : в 2 т. М. : Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 1996. Т. 1. С. 65.

Ярмишко В. Т. Некоторые подходы к оценке состояния лесных фитоценозов, подверженных воздействию аэротехногенного загрязнения // Актуальные проблемы геоботаники. III Всерос. шк.-конф. Лекции. Петрозаводск : Карельский НЦ РАН, 2007. С. 377 – 382.

Chiba Y., Shinozaki K. A simple mathematical model of growth pattern in tree stems // Annals of Botany. 1994. Vol. 73. P. 91 – 98.

Doerner K. Some dimensional relationships and form determinants of trees // Forest Science. 1965. Vol. 11, № 1. P. 50 – 54.

Gray H. The form and taper of forest tree stems / Imperial Forestry Institute University of Oxford. Oxford : Oxford University Press, 1956. № 32. 82 p.

King D., Loucks O. The theory of tree bole branch form // Radiation and Environmental Biophysics. 1978. Vol. 15, № 2. P. 141 – 165.

Kozlov M. V. Changes in wind regime around a nickel-copper smelter at Monchegorsk, northwestern Russia // Intern. J. of Biometeorology. 2002. Vol. 46, № 2. P. 76 – 80.

Larson P. R. Stem form development of forest trees // Forest Science. 1963. Suppl. № 4. 42 p.

Li R., Weiskittel A. R. Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region // Annals of Forest Science. 2010. Vol. 67, № 3. P. 302.

McMahon T. The mechanical design of trees // Scientific American. 1975. Vol. 233. P. 92 – 102.

Pretzsch H., Dieler J., Matyssek R., Wipfler P. Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation // Environmental Pollution. 2010. Vol. 158, № 4. P. 1061 – 1070.

Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analysis // Jap. J. Ecol. 1964 a. Vol. 14, № 3. P. 97 – 105.

Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology // Jap. J. Ecol. 1964 b. Vol. 14, № 4. P. 133 – 139.

Tong Q. J., Zhang S. Y. Stem form variations in the natural stands of major commercial softwoods in eastern Canada // Forest Ecology and Management. 2008. Vol. 256. P. 1303 – 1310.

Valentine H. T., Gregoire T. G. A switching model of bole taper // Canadian J. of Forest Research. 2001. Vol. 31, № 8. P. 1400 – 1409.

Zverev V., Kozlov M. V., Zvereva E. L. Changes in crown architecture as a strategy of mountain birch for survival in habitats disturbed by pollution // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 444. P. 212 – 223.