

Изменение продуктивности ассимиляционного аппарата деревьев в градиенте промышленных загрязнений на Среднем Урале*

В.А. Усольцев, д.с.-х.н., профессор, И.Е. Бергман, А.Ф. Уразова, А.В. Борников, А.С. Жанабаева, Уральский ГЛТУ; Е.Л. Воробейчик, д.б.н., ИЭРИЖ; А.И. Колтунова, д.с.-х.н., профессор, Оренбургский ГАУ

В реальном эксперименте по оценке влияния загрязнений на растительный покров, в частности, на его биологическую продуктивность, проявляется совмещённый эффект природных факторов и воздействия поллютантов, соотношение между которыми неизвестно. При оценке влияния аэрозагрязнений на лесную экосистему в теоретическом и прикладном аспектах наиболее важна реакция её основного эдификатора — насаждения, выраженная показателем его биологической продуктивности. По условию идеального эксперимента необходимо не только подобрать насаждения, однородные по своей структуре, определяемой видовой, возрастной и морфологической изменчивостью на момент начала эксперимента, т.е. до начала действия источника выбросов, но и обеспечить одинаковость траекторий их предшествующего развития. Поскольку в реальном эксперименте всё это невозможно, остается провозгласить принцип «презумпции естественности» [1]. Имеется в виду учёт «естественного» варьирования структуры насаждений в импактном районе путём элиминации видовой и возрастной изменчивости и корректного набора достаточного количества повторностей, охватывающих полный спектр морфологической изменчивости. Чем репрезентативнее совокупность пробных площадей, тем проще вычленишь антропогенную обусловленность наблюдаемых изменений по градиенту загрязнений либо представить выявленную совокупную закономерность в виде некоторого эмпирического обобщения [2].

Объекты и методы исследования. Исследование выполнено в елово-пихтовых насаждениях Среднего Урала в градиенте промышленных загрязнений к западу от Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ), входящих в три зоны: импактную (расстояние от источника загрязнений 1 и 2 км), буферную (расстояние 4 и 7 км) и контрольную (расстояние 30 км). На перечисленных расстояниях заложены пробные площади, обозначенные соответственно цифрами 1, 2, 4, 7 и 30. Каждая представлена пятью площадками размером 25×25 м, на которых выполнена

таксация древостоев (табл. 1). Возраст деревьев на пробных площадях 1, 2, 4, 7 и 30 варьирует соответственно в следующих пределах: 44–30; 48–20; 53–164; 37–128 и 64–134 года.

Наряду с традиционной таксацией древостоев на каждой пробной площади выполнены определения фитомассы и её годичной продукции. Для этого взято по 6–7 модельных деревьев, отдельно ели и пихты, в пределах варьирования их диаметров на пробной площади по методике, изложенной ранее [3]. Общее количество модельных деревьев — 66, в том числе 34 ели и 32 пихты. Показатели биопродуктивности подроста и подлеска определены с использованием методики БИН [4]. По данным перечетов основного и нижних ярусов на каждой площадке определены показатели биопродуктивности в т на 1 га. Усреднённые по совокупности площадок значения показаны в таблице 2.

Кроме показателей фитомассы и её годичного прироста, определённых на пробных площадях с целью их оценки на единице площади, по соответствующей методике [5] у модельных деревьев были измерены в четырёх направлениях на выпилах, взятых на высоте 1,3 м, годовые радиальные приросты древесины за последние 5 лет, общие приросты заболони и диаметры без коры и на их основе рассчитаны годичный прирост площади сечения (Zg) и площадь заболони (Gz) ствола на высоте 1,3 м.

Результаты и их анализ. В лесоведении известна закономерность увеличения массы хвои разновеликих деревьев по мере ухудшения условий произрастания, что характеризует общую тенденцию снижения продуктивности хвои. Например, исследованиями фитомассы ельников травяно-зелёномошных в Вологодской области В.В. Смирновым [6] установлено, что в возрасте 65 лет при примерно одинаковой густоте деревья ели разных ступеней толщины в древостое III класса бонитета по сравнению с деревьями в древостое I класса бонитета имеют массу хвои, большую в 2 раза. Аналогичная закономерность была установлена в березняках Северного Казахстана [7]. Кроме того, у многочисленных хвойных и лиственных пород установлено увеличение плотности охвоения (облиствения) побегов с продвижением от фоновых районов к источнику загрязнений [8]. С другой стороны, известна закономерность снижения охвоенности

* Работа поддержана РФФИ, гранты №№ 09-05-00508, 08-04-91766-АФ, а также Программой Президиума РАН «Биологическое разнообразие».

1. Таксационная характеристика елово-пихтовых древостоев пробных площадей по градиенту загрязнений от СУМЗ

Расстояние от источника загрязнения, км	Возраст древостоя, лет	Класс бонитета	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Число стволов, экз/га	Площадь сечений, м ² /га	Запас древостоя, м ³ /га
1	74±12,1	IV	13,7±3,0	14,3±3,2	1365±352,8	21,2±5,7	149,10±36,6
2	86±3,0	IV	16,0±0,8	15,0±1,3	1997±297,1	34,7±4,0	261,60±39,8
4	114±10,2	III	22,6±2,8	23,0±5,6	1181±585,4	42,1±4,5	387,92±48,0
7	90±2,3	III	21,4±0,9	22,3±1,8	1102±153,6	43,1±7,4	386,50±73,0
30	100±1,8	III	22,3±1,0	22,7±1,7	1056±193,3	42,7±8,4	385,48±81,5

2. Показатели фитомассы и годичной продукции елово-пихтовых древостоев пробных площадей по градиенту загрязнений от СУМЗ

Расстояние от источника загрязнения, км	Фитомасса, т/га					Годичный прирост фитомассы, т/га				
	ствол	ветви	хвоя	надземная основного яруса	надземная нижнего яруса	ствол	ветви	хвоя	надземная основного яруса	надземная нижнего яруса
1	62,8±12,3	17,986±7,0	11,941±4,7	92,686±23,9	3,415±1,6	1,606±0,4	0,441±0,1	2,164±0,4	4,210±0,9	0,170±0,1
2	106,2±15,0	23,715±4,2	15,043±3,3	144,936±22,2	5,595±3,0	2,782±0,5	0,743±0,1	2,265±0,4	5,789±1,0	0,852±0,8
4	139,7±15,5	21,449±3,1	14,142±1,8	175,265±18,3	3,364±1,2	2,767±0,5	0,535±0,1	3,100±0,5	6,402±0,8	0,238±0,02
7	156,5±31,6	28,119±4,3	21,011±3,5	205,624±37,5	1,891±0,7	4,007±0,6	0,817±0,1	4,432±0,8	9,256±1,5	0,207±0,04
30	149,9±33,3	25,381±5,6	12,186±2,9	187,489±40,9	2,169±0,5	2,579±0,5	0,792±0,1	3,116±0,9	6,486±1,3	0,910±0,20

крон деревьев по мере приближения к источнику загрязнений [9]. На нашем объекте эти две противоположные тенденции накладываются одна на другую, и в результате по мере приближения к источнику загрязнений и соответствующего ухудшения условий произрастания, с одной стороны, охвоенность деревьев должна увеличиваться, а с другой стороны, должна снижаться.

Чтобы выяснить, какая из названных тенденций преобладает на наших объектах, мы проанализировали зависимость массы хвои дерева от его диаметра на разных расстояниях от источника загрязнений, которые закодировали числовыми значениями так называемой номинальной переменной X [10], равной соответственно 1, 2, 4, 7 и 30, и ввели её в названное уравнение связи в качестве второй независимой переменной. В результате расчета зависимостей по программе многофакторного регрессионного анализа получены уравнения:

для ели: $\ln(Pf) = -3,145 + 2,077 \ln(D) - 0,114 \ln(X); R^2 = 0,899;$ (1)

для пихты: $\ln(Pf) = -3,875 + 2,159 \ln(D) - 0,093 \ln(X); R^2 = 0,934,$ (2)

где Pf – масса хвои дерева в абсолютно сухом состоянии, кг;

D – диаметр ствола на высоте 1,3 м в коре, см;

X – номинальная переменная, выражающая степень удаления от источника загрязнений, км.

В уравнениях (1) и (2) знак «минус» констант при номинальной переменной означает, что у деревьев ели и пихты одного и того же диаметра по мере удаления от источника загрязнений масса хвои снижается. Однако значимость констант при номинальной переменной в обоих случаях оказалась на пределе статистической достоверности, соответственно $t_{факт} = 1,97 < t_{05} = 2,0$ и $t_{факт} = 1,98 < t_{05} = 2,0$, т.е. закономерность снижения массы хвои у равновеликих деревьев ели и пихты при удалении от источника загрязнения в пределах от 1 до 30 км статистически недостоверна, и фактически никакой закономерности нет.

Поскольку на наших пробных площадях возраст деревьев варьирует в диапазоне от 37 до 164 лет, а известна обратная связь облиствения равновеликих деревьев с возрастом, были рассчитаны уравнения, модифицированные по отношению к (1) и (2) путем включения дополнительной независимой переменной – возраста дерева (A , лет):

для ели: $\ln(Pf) = -1,499 + 2,258 \ln(D) - 0,505 \ln(A) - 0,103 \ln(X); R^2 = 0,915;$ (3)

для пихты: $\ln(Pf) = -2,241 + 2,274 \ln(D) - 0,458 \ln(A) - 0,048 \ln(X); R^2 = 0,943.$ (4)

Уравнения (3) и (4) на статистически достоверном уровне подтвердили отрицательную связь массы хвои равновеликих деревьев с их возрастом при более высоких значениях коэффициента

детерминации ($0,915 > 0,899$ и $0,943 > 0,934$). Но значимость регрессионного коэффициента при номинальной переменной стала ещё ниже (соответственно $t_{\text{факт}} = 1,88 < t_{05} = 2,0$ и $t_{\text{факт}} = 0,98 < t_{05} = 2,0$). Это означает, что зависимости (3) и (4) массы хвои равновеликих и разновозрастных деревьев от положения в градиенте загрязнения по сравнению с (1) и (2) стали ещё более неопределёнными. Густота исследуемых насаждений варьирует от 1056 до 1997 экз/га, однако включение густоты в уравнения (3) и (4) показало, что её влияние на массу хвои ели и пихты не достоверно (соответственно $t_{\text{факт}} = 0,14 < t_{05} = 2,0$ и $t_{\text{факт}} = 0,59 < t_{05} = 2,0$).

В этой связи представляют интерес результаты исследований Н.Ф. Низаметдинова [11], выполненных в том же западном градиенте загрязнений от СУМЗ: степень дефолиации, установленная по цифровым фотографиям крон деревьев, повышается по мере приближения к источнику эмиссий (коэффициент корреляции равен $-0,79$) в полном соответствии с повышением концентрации серы в хвое в том же направлении (коэффициент корреляции равен $0,68$).

Таким образом, мы сталкиваемся с некоторым несоответствием выявленных закономерностей: отрицательная связь рассчитанной по фотографиям охвоенности с расстоянием от источника загрязнений и фактическое отсутствие какой-либо закономерности по результатам взвешивания хвои деревьев. В пользу первой версии свидетельствует её корреляция с содержанием серы в хвое, однако она объясняет лишь 62% общей изменчивости охвоенности крон, а остальные 38% – ничем не объясняемый «шум». Вторая же версия свидетельствует, по крайней мере, о том, что использование показателя охвоенности деревьев, определённого непосредственным взвешиванием хвои, в целях оценки степени загрязнения применительно к ели и пихте в данных локальных условиях неприемлемо.

Одним из достаточно информативных количественных показателей при оценке повреждающего воздействия загрязнений на деревья является продуктивность ассимиляционного аппарата дерева, выраженная отношением годичного прироста фитомассы к массе хвои. Например, в условиях Литвы было установлено, что по мере приближения к заводу азотных удобрений в Йонаве с расстояния 15 км (контроль, отсутствие визуальных признаков деградации) до 8 км продуктивность хвои сосны, выраженная отношением объёмного прироста ствола к массе хвои (Zv/Pf), снижается на 30% [12].

Мы модифицировали упомянутый подход в двух вариантах. Согласно первому из них вместо объёмного прироста использован менее трудоёмкий показатель, получаемый непосредственным измерением, – годичный прирост площади сече-

ния, средний за последние 5 лет (Zg), и прослежено изменение по градиенту загрязнений относительного показателя Zg/Pf .

За основу второго варианта приняли пайп-модель [13], которая была нами модифицирована [5]. Было установлено, что оценка продуктивности ассимиляционного аппарата деревьев под влиянием загрязнений на основе пайп-модели [13] приводит к существенному остаточному варьированию массы хвои [16]. Было высказано предположение, что причина этого кроется в неучтённом эффекте флоэмного транспорта: пайп-модель описывает лишь потенциальную продуктивность хвои, опосредованную площадью сечения водопроводящей заболони, а реализация этой потенциальной определяется при прочих равных условиях количеством отложенных в дереве ассимилятов. Таким образом, для корректной оценки продуктивности хвои необходимо учитывать оба определяющих фактора, т.е. площадь сечения заболони (Gz) как характеристику ксилемного транспорта и годичный прирост площади сечения ствола на высоте груди (Zg) как характеристику флоэмного транспорта. Продуктивность хвои оценивается в этом случае косвенным путём по соотношению Zg/Gz : чем больше годичный прирост ствола при одной и той же площади сечения заболони, тем выше продуктивность хвои.

Поэтому в рамках настоящего исследования нами предпринята попытка использовать в качестве диагностического показателя не массу хвои дерева, а показатель продуктивности хвои, как прямой (Zg/Pf), так и косвенный (Zg/Gz).

По совокупности взятых модельных деревьев рассчитаны двухфакторные регрессии:

$$\ln(Zg/Pf) \text{ или } \ln(Zg/Gz) = a_0 + a_1 \ln A + a_2 \ln X, \quad (5)$$

где Zg – годичный прирост площади сечения ствола на высоте 1,3 м (см^2), средний за последние 5 лет;

Gz – площадь сечения заболони ствола (см^2) на высоте 1,3 м.

Уравнения (5) действительны в интервале возраста от 40 до 160 лет. Характеристика уравнений (5) дана в таблице 3. Значимость всех констант в (5) характеризуется значениями критерия Стьюдента в пределах от 2,4 до 9,7, что выше $t_{\text{табл}} = 2,0$. Результаты их табулирования (табл. 4) свидетельствуют о том, что показатели продуктивности хвои снижаются с возрастом дерева и по мере приближения к источнику загрязнений.

Таким образом, установлена статистически достоверная закономерность снижения продуктивности хвои по мере приближения к СУМЗ. Эта закономерность в градиенте загрязнения носит нелинейный характер: по показателю Zg/Pf в импактной зоне (удаление от 1 до 2 км) снижение продуктивности хвои у ели на 1 км

3. Характеристика уравнений (5)

Зависимая переменная	Ель				Пихта			
	a_0	$a_1 \ln A$	$a_2 \ln X$	R^2	a_0	$a_1 \ln A$	$a_2 \ln X$	R^2
$\ln (Zg/Pf)$	3,279	-0,979	0,214	0,704	2,151	-0,688	0,126	0,365
$\ln (Zg/Gz)$	0,815	-0,803	0,405	0,811	2,404	-1,157	0,279	0,572

4. Изменение продуктивности хвои деревьев ели и пихты разного возраста в связи с удалением от СУМЗ

X, км	Продуктивность хвои Zg/Pf (см ² /кг) при возрасте дерева, лет							Продуктивность хвои Zg/Gz (см ² /см ²) при возрасте дерева, лет						
	40	60	80	100	120	140	160	40	60	80	100	120	140	160
Ель														
1	0,716	0,482	0,363	0,292	0,244	0,210	0,184	0,117	0,084	0,067	0,056	0,048	0,043	0,038
2	0,831	0,558	0,421	0,339	0,283	0,244	0,214	0,154	0,112	0,089	0,074	0,064	0,056	0,051
4	0,963	0,648	0,489	0,393	0,328	0,282	0,248	0,205	0,148	0,117	0,098	0,085	0,075	0,067
7	1,086	0,730	0,551	0,443	0,370	0,318	0,279	0,257	0,185	0,147	0,123	0,106	0,094	0,084
30	1,481	0,996	0,751	0,604	0,505	0,434	0,381	0,463	0,334	0,265	0,222	0,191	0,169	0,152
Пихта														
1	0,678	0,513	0,421	0,361	0,318	0,286	0,261	0,155	0,097	0,069	0,054	0,043	0,036	0,031
2	0,740	0,559	0,459	0,394	0,347	0,312	0,285	0,188	0,118	0,084	0,065	0,053	0,044	0,038
4	0,807	0,610	0,501	0,429	0,379	0,341	0,311	0,228	0,143	0,102	0,079	0,064	0,053	0,046
7	0,866	0,655	0,537	0,461	0,406	0,366	0,333	0,266	0,167	0,119	0,092	0,075	0,063	0,054
30	1,040	0,787	0,645	0,553	0,488	0,439	0,400	0,400	0,250	0,179	0,138	0,112	0,094	0,080

расстояния составляет 14%, в буферной зоне (от 4 до 7 км) – соответственно 4% и в градиенте от буферной зоны до контроля (от 7 до 30 км) – соответственно 1%. У пихты названные изменения существенно ниже – соответственно 8, 2 и 0,7%. По показателю Zg/Gz соответствующие значения составляют у ели 24, 7 и 2% и у пихты – 18, 5 и 1,4%.

Литература

1. Воробейчик Е.Л. «Грязная» экология в ИЭРиЖ // Уральская экологическая школа: вехи становления и развития. Екатеринбург, 2005. С. 175–217.
2. Воробейчик Е.Л. Экология импактных регионов: перспективы фундаментальных исследований // Учёные записки Нижнетагильской государственной социально-педагогической академии: матер. VI Всероссийского популяционного семинара «Фундаментальные и прикладные проблемы популяционной биологии». Нижний Тагил, 2004. С. 36–45.
3. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 637 с.
4. Методы изучения лесных сообществ / под ред. В.Т. Ярмишко и И.В. Лянгузовой. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
5. Усольцев В.А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 541 с.
6. Смирнов В.В. Органическая масса в некоторых лесных фитоценозах европейской части СССР. М.: Наука, 1971. 362 с.
7. Усольцев В.А. Фитомасса крон спелых берёзово-осиновых насаждений в Северном Казахстане // Лесоведение. 1974. № 2. С. 86–88.
8. Ярмишко В.Т. Сосна обыкновенная и атмосферное загрязнение на Европейском Севере. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 1997. 210 с.
9. 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.
10. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Е.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
11. Низаметдинов Н.Ф. Оценка состояния сосновых древостоев в условиях агропромышленного загрязнения атмосферы по цифровым фотографиям крон деревьев и спутниковым фотоснимкам: автореф. дис.... канд. с.-х. наук. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. 19 с.
12. Сидаравичюс Й.М. Изменение биологической продуктивности деревьев при различном уровне атмосферного загрязнения // Закономерности роста и производительности древостоев. Каунас: ЛитСХА, 1985. С. 228–230.
13. Shinozaki K., Yoda K., Hozumi K., Kira T. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory // Jap. J. Ecol. 1964. Vol. 14, No. 3.-1: Basic analysis. P. 97-105; No. 4.-2: Further evidence of the theory and its application in forest ecology. P. 133–139.