

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 630*524.39+630*174.754

*В. А. Усольцев, Е. Л. Воробейчик,
Е. В. Хантемирова, И. Е. Бергман, А. Ф. Уразова*

ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ НАСАЖДЕНИЙ ПО ГРАДИЕНТАМ АЭРОЗАГРЯЗНЕНИЙ: МЕТОДИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Анализируются методы количественной оценки биологической продуктивности насаждений по градиентам аэрозагрязнений. Показаны примеры нарушения принципов планирования эксперимента, отмечена невозможность его идеальной реализации при разработке феноменологической модели, которая описывала бы изменения в экосистемах импактного района. Предложен метод оценки степени загрязнения по показателю продуктивности хвои дерева.

Ключевые слова: фитомасса, продуктивность лесов, загрязнение экосистем, сосна, пайп-модель, промышленные поллютанты.

Введение. В настоящее время выполнено много исследований по изменениям экосистем, испытывающих действие промышленных выбросов. Хотя перспективность анализа зависимостей «доза-эффект» на экосистемном уровне, дающих прямой выход на проблему устойчивости, была декларирована еще в середине 1970-х, на настоящий момент имеются лишь единичные попытки их построения. Причины этого вытекают из прикладного характера большинства подобных исследований и, как следствие, – недостаточного количества экспериментальных точек для адекватного представления траектории реакции экосистемы; включения в анализ неполного спектра компонентов; нарушения синтопности регистрации параметров биоты и содержания токсикантов.

Для разработки проблемы необходимы соответствующие экспериментальные полигоны. В идеале такой полигон должен представлять территорию, в пределах которой крупный длительно действующий (порядка 50–80 лет) точечный источник эмиссии поллютантов «погружен» в фоновую (т.е. мало затронутую хозяйственной деятельностью) среду. Обширные пространства фоновой среды Урала в сочетании с наличием крупных длительно действующих источников выбросов дают уникальную возможность заниматься экспериментальными работами с целыми экосистемами на уровне территориальных комплексов. На Урале одним из наиболее интенсивных источников токсичных выбросов в атмосферу является медеплавильное производство, в частности, Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ) в Свердловской области и ЗАО «Карабашмедь» в Челябинской области.

Исследование локального воздействия на биоту необходимо для определения его направленности и величины эффектов, исследования зависимостей «доза-эффект». В качестве стрессового фактора рассматривается многолетнее аэрогенное поступление токсичных микроэлементов от источника промышленных выбросов, формирующее крупную геохимическую аномалию. Степень проявления аномалии экспоненциально убывает с удалением от ее центра (источника эмиссии токсикантов) и, соответственно, на экосистемы накладывается градиент нагрузки.

Из 17 наиболее известных на планете полигонов по проблематике загрязнений экосистем нет ни одного, где бы в поле зрения исследователей попали все группы биоты (древостой, трав-

стой, почва, почвенная фауна и др., всего 15 групп). Более того, ни один полигон не соответствует понятию идеального эксперимента, требующего, как минимум, пространственной однородности фоновой среды, которая была бы обеспечена до начала действия источника выбросов на всей территории его потенциального влияния [1]. Применительно к растительному покрову – это априорная однородность экотопа и фитоценоза на всей исследуемой территории. В реальном эксперименте по оценке влияния загрязнений на растительный покров, в частности, на его биологическую продуктивность, мы имеем совмещенный эффект природных факторов и воздействия поллютантов, соотношение между которыми неизвестно. При оценке влияния аэрозагрязнений на лесную экосистему наиболее важна реакция ее 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 (что совсем невыполнимо!) обеспечить одинаковость траекторий их предшествующего развития. Поскольку в реальном эксперименте все это невозможно, единственное, что остается – провозгласить принцип «презумпции естественности» [2], и учет «естественного» варьирования структуры насаждений в импактном районе обеспечить путем 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 [1]. Рассмотрим несколько типичных экспериментов, в разной степени удовлетворяющих представлению об идеале.

Методический анализ изменения биопродуктивности насаждений по градиентам аэрозагрязнений. Простейшая ситуация имеет место при исследовании изменения характеристик довольно простых в структурном отношении элементов экосистемы - например, живого напочвенного покрова (ЖНП) и подстилки по градиенту загрязнений сосновых и березовых насаждений в окрестностях ЗАО «Карабашмедь» (табл. 1).

Таблица 1

Изменение характеристик ЖНП и подстилки в сосновых и березовых насаждениях по градиенту загрязнений от предприятия «Карабашмедь» [3]

Расстояние от источника загрязнения, км	Сосна			Береза			
	Фитомасса ЖНП, кг/га	Толщина подстилки, см	Запас подстилки, кг/м ²	Расстояние от источника загрязнения, км	Фитомасса ЖНП, кг/га	Толщина подстилки, см	Запас подстилки, кг/м ²
4,2	111	6,8±0,25	6,62	4,7	91	4,7±0,18	6,45
5,5	310	6,0±0,19	7,43	6,4	113	4,0±0,22	5,62
6,6	349	5,0±0,28	7,46	8,5	514	1,9±0,17	2,72
8,3	433	3,2±0,19	4,79	13,1	678	1,6±0,10	2,28
13,8	693	3,9±0,20	6,56	17,5	613	2,2±0,15	1,76
32,0	515	3,6±0,17	5,13	31,0	553	2,2±0,18	1,74

В данном случае закономерности снижения надземной фитомассы ЖНП и увеличения мощности и запаса подстилки по мере приближения к источнику загрязнений очевидны и обусловлены, скорее всего, одним лишь воздействием поллютантов. В несколько меньшей степени, но достаточно закономерно аналогичное изменение толщины и массы подстилки в сосновых молодняках по градиенту загрязнений от СУМЗ (табл. 2). Вполне закономерна и статистически безукоризненна также динамика содержания фтора в листе деревьев по градиенту фтористых загрязнений от Полевского криолитового завода в Свердловской области (табл. 3). Более сложна в методическом отношении оценка влияния промышленных аэрозагрязнений на биологическую продуктивность лесных экосистем. Рассмотрим случай, когда продуктивность серии древостоев формировалась под действием природных факторов до возраста спелости, и лишь в последние годы на их влияние наложился антропогенный фактор в некотором градиенте.

Таблица 2

Изменение характеристик подстилки по градиенту загрязнений основных молодняков, прилегающих к СУМЗ [4]

Показатель	Расстояние от источника загрязнения, км			
	2,2±0,4	7,0±1,6	11,0±2,0	25,0
Толщина подстилки, см	5,9±1,1	7,1±0,7	3,7±0,3	1,8
Масса подстилки, т/га	46,1±39,8	39,1±2,6	44,4±18,5	8,4

Мансийском автономном округе. В состав продуктов сгорания попутного газа в факельных установках входят [9] окись углерода (72%), углеводороды (17%), сернистый ангидрид (6%), сажа (4%) и окислы азота (1%). Таким образом, подобран ряд одновозрастных одновидовых древостоев, т.е. исключена возрастная и видовая изменчивость. Но репрезентативность начальной морфоструктуры древостоев, имеющей место перед запуском антропогенного фактора, неизвестна, и реализованная схема эксперимента не была вероятностной [2]. Факельные установки были запущены сравнительно недавно и в разное время: в 1981, 1986 и 1991 гг.

Таблица 3

Изменение содержания свободного фтора в листьях березы по градиенту загрязнений фтористыми соединениями от Полевского криолитового завода по сезонам года, мг/кг сухого вещества [5]

Расстояние от источника загрязнения, км	Время отбора проб листьев					
	1988 г.			1989 г.		
	Весна	Лето	Осень	Весна	Лето	Осень
2,5	63,3±4,4	47,0±1,0	473,3±37,8	55,0±1,0	111,6±3,3	151,7±1,7
4,0	26,3±1,8	21,3±0,8	396,7±3,3	41,0±1,5	70,7±1,9	72,7±1,3
9,0	9,0±0,5	9,0±0,7	29,9±0,9	29,3±0,7	18,8±0,6	27,0±0,6
30,0	1,1±0,5	2,0±0,2	3,4±0,7	12,0±0,0	10,0±0,0	17,7±0,9

Таким образом, период отрицательного воздействия на древостои охватывает лишь последние 7–17 лет жизни 100–124-летних сосняков, к тому же имелась существенная разница в длительности этого воздействия на прилегающие к факелам древостои. Хотя прослеживается некоторая закономерность в изменении продуктивности и фракционной структуры фитомассы древостоев по градиенту загрязнения (табл. 4), невозможно установить, в какой степени эти изменения обусловлены влиянием факелов и в какой – исходными (т.е. до запуска факелов) различиями морфоструктуры древостоев по названному градиенту. Биохимия влияния продуктов сгорания газа на древостои не исследовалась, а поскольку снежный покров и жидкие осадки испаряются в радиусе 200–250 м от трубы факела [9], снижение продуктивности сосняков в направлении к факельной установке с 240 до 100 м может быть обусловлено понижением их влагообеспеченности.

Таблица 4

Изменение таксационных показателей и структуры абсолютно сухой фитомассы по градиенту загрязнений лишайниковых сосняков Va класса бонитета, прилегающих к факельным установкам в районе нефтедобычи ХМАО [9]

Показатель	Расстояние от факельной установки, м					
	100	230	240	250	300	400
Возраст древостоя, лет	124	115	124	124	100	115
Средняя высота, м	14,6	10,6	11,2	14,0	11,9	10,4
Средний диаметр, см	24,8	12,4	14,9	20,6	13,6	14,5
Число стволов, экз/га	293	1571	1221	595	1556	1551
Запас, м ³ /га	143	111	167	144	160	185
Фитомасса стволов, т/га	50,4	49,5	79,6	68,5	76,1	75,3
Фитомасса ветвей, т/га	5,32	5,47	6,63	9,79	4,83	5,34
Фитомасса хвои, т/га	1,87	5,92	4,02	5,07	4,09	4,47
Надземная фитомасса, т/га	57,6	60,9	90,2	83,4	85,0	85,1

Вероятностная схема эксперимента отсутствовала и в работе В. Э. Власенко с соавторами [10] (табл. 5). Вопреки логике здесь проигнорирован даже принцип типичности выборки. Здесь на первых трех объектах по мере удаления от источника загрязнений соответствующего снижения величины балла повреждения ассимиляционного аппарата и процента дефолиации воз-

растают полнота и запас древостоя. Но при дальнейшем удалении и соответствующем снижении упомянутого индекса и процента дефолиации полнота и запас древостоя резко снижаются, соответственно на 46 и 40% по отношению к древостою с большей степенью дефолиации. Очевидно, что такое снижение продуктивности условно неповрежденного древостоя (индекс 1,86; дефолиация 19%) по сравнению со слабо поврежденным (индекс 2,59; дефолиация 28%) никак не связано с повреждающим действием поллютантов, а является результатом некорректного подбора объектов исследования.

Далее, пытаясь связать степень дефолиации кроны с массой хвои, авторы не пошли по пути установления названного количественного соотношения непосредственно на своих объектах путем взятия модельных деревьев, а позаимствовали опубликованное уравнение зависимости массы хвои дерева от его диаметра и нескольких таксационных показателей древостоя [11]. Это уравнение объясняло 94% изменчивости массы хвои дерева в сосняках, однако все эти сосняки находились в одной и той же зоне умеренного загрязнения, а В. Э. Власенко с соавторами экстраполировали уравнение на сосняки разной степени загрязнения, отличающиеся по степени дефолиации на 50%. Естественно, полученные ими таким способом значения массы хвои среднего дерева по градиенту загрязнения повторили упомянутую закономерность изменения продуктивности древостоев, никак не связанную с загрязнениями (последние строки табл. 5). Естественно также, что рассчитанные таким способом показатели массы хвои никак не коррелируют с процентом дефолиации.

Таблица 5

Результаты исследования морфоструктуры сосновых древостоев по градиенту загрязнений от Красноуральского промузла [10]

Показатель	Жизненное состояние древостоев			
	сильно поврежденный	средне поврежденный	слабо поврежденный	условно неповрежденный
Возраст древостоя, лет	110	85	100	80
Класс бонитета	III	II	II	II
Индекс повреждения, балл	3,45	2,63	2,59	1,86
Дефолиация, %	49,8	25,5	28,4	18,9
Средняя высота, м	22,5	22,0	25,0	28,5
Средний диаметр, см	25,0	32,2	38,1	28,1
Площадь сечений, м ² /га	17,2	28,3	41,5	27,0
Запас древостоя, м ³ /га	165	295	526	313
Масса хвои среднего дерева, кг	7,52	15,2	17,1	6,97

Аналогична ситуация при оценке влияния аэрозагрязнений от Рижского суперфосфатного завода, основанного в конце XIX столетия, на продуктивность 85-летних сосняков (табл. 6). Все насаждения произрастают на типичной среднеподзолистой

почве в типе леса *Pinetum hylacomiosum*. Однако вероятностная схема эксперимента, как и в предыдущих случаях, проигнорирована, и по градиенту загрязнений заложено, руководствуясь принципом «типичности», по одной пробной площади без повторностей.

Одно из наиболее полных исследований фитомассы и ее годичной продукции как в надземной, так и в подземной сферах, достаточно адекватное в методическом отношении, осуществлено в ельниках на Кольском Севере, в окрестностях комбината «Североникель» [8]. Принадлежность изучаемых ельников к кустарничково-зеленомошному типу подтверждена геоботаническими описаниями Мончетундры до начала деятельности комбината. Пробные площади представляют собой стадии техногенной трансформации ельников, обусловленные различным уровнем загрязнения выбросами комбината (табл. 7). В данном случае одного геоботанического

Таблица 6

Изменение таксационных показателей и текущего прироста древостоев по градиенту загрязнений сосновых насаждений, прилегающих к Рижскому суперфосфатному заводу [7]

Показатель	Расстояние от источника загрязнения, км				
	1,75	1,25	3,0	3,0	3,75
Возраст древостоя, лет	85	85	85	85	85
Средняя высота, м	10,9	15,6	23,2	16,0	20,6
Средний диаметр, см	29,0	25,0	33,9	25,0	31,3
Площадь сечений, м ² /га	18,3	10,5	17,9	18,4	31,3
Текущий прирост по запасу, м ³ /га	1,3	1,4	2,7	2,5	4,6

описания территорий, где впоследствии были заложены пробные площади, недостаточно для обеспечения чистоты опыта. Во-первых, маловероятно, что участки геоботанического описания и последующей закладки пробных площадей были одни и те же. Во-вторых (и это более существенно), вероятностная схема эксперимента, как и в предыдущих случаях, проигнорирована.

Таблица 7

Изменение таксационных показателей, абсолютно сухой фитомассы и ее годичной продукции по градиенту загрязнений ельников, прилегающих к комбинату «Североникель» [8]

Показатель	Расстояние от источника загрязнения, км			
	7	20	35	Около 100
Тип леса (современный)	вороничное редколесье	злаково-кустарничковый	зеленомошно-кустарничковый	кустарничково-зеленомошный
Средняя высота, м	6,2	11,7	9,2	8,1
Средний диаметр, см	10,2	19,1	16,4	13,7
Число стволов, экз/га	70	450	490	933
Площадь сечений, м ² /га	0,9	11,9	13,6	16,3
Фитомасса, т/га:				
- стволов	0,89	31,3	28,7	39,3
- ветвей	0,16	5,38	5,40	8,57
- хвои	0,07	2,38	3,65	4,47
- надземная	1,12	39,10	37,75	52,30
- подземная	0,26	9,34	9,01	12,48
- общая	1,38	48,44	46,76	64,78
Годичный прирост фитомассы, т/га:				
- стволов	0	0,10	0,14	0,27
- ветвей	0	0,26	0,28	0,33
- хвои	0,03	0,50	0,45	0,51
- надземной	0,03	0,86	0,87	1,11
- подземной	0,01	0,21	0,21	0,32
- общей	0,04	1,07	1,08	1,43

Таблица 8

Изменение таксационных показателей и абсолютно сухой фитомассы по градиенту загрязнений сосновых молодняков, прилегающих к СУМЗ [6]

Показатель	Расстояние от источника загрязнения, км			
	2,2±0,4	7,0±1,6	11,0±2,0	25,0
Возраст древостоя, лет	40	33	33	38
Средняя высота, м	8,3±3,8	13,2±0,9	12,7±2,3	16,5
Средний диаметр, см	9,1±3,4	11,7±2,2	11,4±2,0	16,4
Число стволов, тыс. экз/га	2250±212	3553±1236	3084±1205	1796
Площадь сечений, м ² /га	15,0±9,3	33,9±4,9	33,5±4,1	36,2
Запас, м ³ /га	85±76	230±37	225±38	300
Фитомасса стволов, т/га	44,6±38	77,9±29	104,4±20	118,5
Фитомасса ветвей, т/га	6,1±2,8	9,7±5,5	11,3±2,3	11,4
Фитомасса хвои, т/га	3,6±0,1	5,4±2,9	6,2±0,7	4,6
Надземная фитомасса, т/га	54,2±42	86,3±37	121,8±21	134,4

схемой закладки эксперимента в сосняках к востоку от СУМЗ, фактически повторилась при закладке в 1989 г. нашей серии пробных площадей в елово-пихтовых древостоях по градиенту загрязнений в западном направлении от СУМЗ. Но в данном случае оценка биопродуктивности насаждений по градиенту загрязнений была не одноразовой и конечной, как в приведенных выше примерах, а осуществлялась периодически на протяжении последних двух десятилетий.

Методы определения фитомассы и ее годичного прироста изложены ранее [12]. На каждом удалении от завода было заложено по пять пробных площадей размером 25×25 м. Приведенные в табл. 9 и 10 цифровые значения являются предварительными.

В наиболее полной мере вероятностная схема эксперимента реализована в градиенте загрязнений от СУМЗ в сосновых молодняках II класса возраста, которые произрастают в одних и тех же эдафических условиях (табл. 8). В этом случае обеспечена однородность экотопа и фитоценоза на всей исследуемой территории, элиминирована видовая и возрастная изменчивость насаждений. Более того, предпринята попытка учесть морфологическую изменчивость сосняков путем закладки нескольких пробных площадей на каждом из выбранных уровней загрязнения. К сожалению, каждая из них заложена не методом случайной выборки в пределах некоторого, однородного по лесорастительным условиям участка, а по тому же принципу «типичности».

Описанная ситуация, связанная со

Т а б л и ц а 9

Таксационная характеристика древостоев на пробных площадях

Расстояние от ист. загрязнения, км	Период наблюдений, годы	Доля хв. в составе, %	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
4	1989	88±6,0	67±8,5	III	16,4±0,6	18,4±1,2	1568±285	41,3±4,0	376±28
	1998	86±7,4	77±8,4	III	17,3±2,1	21,3±5,2	723±233	23,9±5,3	205±66
	2008	88±7,7	86±8,6	III	18,8±3,7	23,0±5,6	1181±585	42,1±4,5	405±50
7	1989	82±9,6	46±2,1	II	15,8±0,7	16,6±1,4	2250±320	48,9±10,6	474±160
	1998	79±6,2	56±2,2	II	16,6±0,2	18,1±0,4	1226±101	31,6±3,1	320±81
	2008	72±7,7	66±2,2	II	19,0±0,9	23,0±1,9	1155±153	47,5±4,8	523±47
30	1989	61±17,0	65±3,3	III	17,0±0,6	16,6±1,2	2019±831	42,5±11,4	283±73
	1998	88±11,0	75±3,2	III	18,5±0,8	19,0±1,8	874±190	27,1±6,5	243±62
	2008	93±10,2	85±3,2	III	20,3±0,8	23,0±1,5	1104±262	45,4±10,9	448±100

Таким образом, все реальные эксперименты по выявлению влияния поллютантов на продуктивность лесных экосистем, в большей или меньшей степени выполняются с отклонениями от идеальной схемы закладки. Полностью уйти от этого пока не представляется возможным.

Т а б л и ц а 10

Предварительные результаты исследований морфоструктуры и биопродуктивности древостоев по градиенту загрязнений СУМЗ*

Расстояние от ист.-ка загрязнения, км	Период наблюдений, годы	Фитомасса, т/га			
		стволов	ветвей	хвои	надземной
а) фитомасса фракций древостоя					
4	1989	127,71±10,2	24,30±3,0	19,77±2,3	171,78±15,1
	1998	70,65±21,0	14,98±1,3	11,93±1,4	97,56±22,9
	2008	136,09±15,9	23,09±3,5	19,27±2,5	178,45±18,7
7	1989	162,50±54,1	43,52±12,3	40,69±13,8	246,71±80,1
	1998	109,52±27,0	29,12±4,7	27,44±7,0	166,08±38,6
	2008	179,52±15,8	45,76±4,0	45,20±4,1	270,48±23,3
30	1989	118,00±29,5	31,01±9,0	18,51±5,0	167,52±42,4
	1998	92,78±22,8	19,36±4,4	12,41±2,9	124,54±30,0
	2008	4,55±1,2	1,11±0,3	2,55±0,6	8,21±2,1
б) годичный прирост фитомассы древостоя					
4	1989	3,98±0,4	0,78±0,1	4,27±0,4	9,02±0,9
	1998	2,32±0,4	0,49±0,04	2,50±0,5	5,31±0,9
	2008	4,03±0,4	0,73±0,1	4,31±0,5	9,06±1,0
7	1989	6,78±2,1	1,27±0,3	7,26±2,2	15,32±4,6
	1998	4,56±1,0	0,84±0,1	4,87±0,9	10,28±2,0
	2008	7,36±0,6	1,27±0,1	7,77±0,7	16,41±1,4
30	1989	4,92±1,6	1,13±0,3	2,34±0,7	8,39±2,5
	1998	2,86±0,6	0,69±0,2	1,54±0,4	5,09±1,1
	2008	4,55±1,2	1,11±0,3	2,55±0,6	8,21±2,1

*Представлены средние значения ± ошибка среднего, учетная единица – пробная площадь, n=5.

Возможные методы экстраполяции полученных на уровне особи закономерностей на уровень ценоза пока не рассматриваются.

Цель, задачи, объекты и методы исследования. При широко практикуемой оценке повреждающего воздействия загрязнений на деревья на основе визуальных признаков остается неизвестным соответствующее снижение показателей их продуктивности в количественном выражении. Одним из достаточно информативных количественных показателей является продуктивность ассимиляционного аппарата дерева, выраженная отношением годичного прироста фитомассы к массе хвои (листвы). 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 объемного прироста ствола к массе хвои, снижается на 30% [13].

Если придерживаться вероятностной схемы эксперимента, вклад загрязняющих факторов в изменение биопродуктивности по градиенту рассеяния поллютантов может быть в подобных случаях выявлен на уровне эмпирических обобщений при условии учета видовой, возрастной и морфологической изменчивости древесного ценоза.

Нами предпринята попытка начать исследования по влиянию аэрозагрязнений на биопродуктивность лесных насаждений с более низкого уровня организации сообщества – с уровня особи, т.е. дерева как основного структурного компонента насаждения.

В нашем исследовании подход, реализованный в работе [13], модифицирован. Вместо объемного прироста использованы две физиологически обусловленные и значительно легче получаемые характеристики площади сечения дерева. Одна из них представлена площадью сечения ствола у основания кроны дерева, состоящей полностью из водопроводящей заболони, которая характеризует влагообеспеченность и потенциальную продуктивность хвои [14]; величина площади водопроводящей заболони может быть проще измерена на высоте груди, но визуально на этом уровне она выражена не у всех пород. Вторая представляет текущий годичный прирост площади сечения ствола на высоте груди как характеристику фактической продуктивности хвои, т.е. степени реализации упомянутой потенциальной продукционной возможности.

Традиционные физиологические методы определения продуктивности хвои, во-первых, очень трудоемки и поэтому не позволяют получить количество наблюдений, достаточное для статистически достоверного вывода, и, во-вторых, не могут обеспечить статистической независимости выборок. Наше исследование осуществляется на количественной оценке продуктивности ассимиляционного аппарата по соотношению косвенных характеристик ксилемного и флоэмного транспорта дерева. Вследствие простоты и малой трудоемкости выполнения упомянутых измерений они могут быть получены в количестве, достаточном для статистически достоверного вывода, а многофакторный метод анализа позволяет исключить влияние биотических факторов и выявить степень воздействия лишь абиотических факторов (загрязнений) на продуктивность ассимиляционного аппарата дерева.

Ранее нами было установлено, что оценка продуктивности ассимиляционного аппарата деревьев под влиянием загрязнений на основе пайп-модели [14] приводит к существенному остаточному варьированию массы хвои [11]. Было высказано предположение, что причина этого кроется в неучтенном эффекте флоэмного транспорта: пайп-модель описывает лишь потенциальную продуктивность хвои, опосредованную площадью сечения водопроводящей заболони, а реализация этой потенции определяется при прочих равных условиях количеством отложенных в дереве ассимилятов. Таким образом, для корректной оценки продуктивности хвои необходимо включать в регрессионную зависимость оба определяющих фактора, т.е. диаметр или площадь сечения ствола у основания кроны (как характеристику ксилемного транспорта) и годичный прирост площади сечения ствола на высоте груди (как характеристику флоэмного транспорта).

Исследование названной зависимости выполнено на двух объектах, соответственно в сосняках и ельниках. В первом случае это сосняки Среднего Урала, входящие в зону умеренного загрязнения (классификация В.В.Фомина [15]) в окрестностях СУМЗ, а также сосняки Тургайского прогиба (фоновая зона); во втором случае – елово-пихтовые древостои Среднего Урала, входящие в три зоны загрязнений по их градиенту к западу от СУМЗ.

На пробных площадях по соответствующей методике [16] на модельных деревьях был проведен комплекс работ с определением массы хвои (P_f , кг), диаметра ствола у основания кроны (D_{bc} , см), годичного прироста площади сечения ствола на высоте груди (Z_g , см²) и годичного объемного прироста ствола (Z_v , дм³), средних за последние пять лет. Количество взятых модельных деревьев: сосны в Тургайском прогибе – 127 на 13 пробных площадях, сосны на Среднем Урале – 250 на 35 пробных площадях, ели – в каждой из названных трех зон по 7 деревьев, всего 21. Для района СУМЗа использованы данные по трем участкам, расположенным в 30 км к западу от завода (фоновая зона), в 7 км (буферная-2) и в 4 км (буферная-1).

Результаты и их анализ. Экспериментальные данные модельных деревьев обработаны по программе многофакторного регрессионного анализа, и получены модели:

$$\begin{aligned} - \text{ для сосны } \ln P_f = & -3,540 + 0,163X_1 + 1,307 \ln D_{bc} + 0,615 \ln D + 0,340 \ln Z_r + \\ & + 0,121 (\ln Z_r) (\ln D) - 0,205 (\ln Z_r) (\ln D_{bc}) + 0,020 (\ln Z_r) (D_{bc})^3; R^2 = 0,957 \end{aligned} \quad (1)$$

где D – диаметр ствола на высоте груди (см) и Z_r – годичный радиальный прирост ствола (мм) на высоте груди, средний за последние пять лет; оба в данном случае в совокупности характеризуют величину Z_g ;

$$- \text{ для ели } \ln P_f = -2,935 + 0,0401X_1 + 0,0665X_2 + 1,636 \ln D_{bc} + 0,471 \ln Z_g; R^2 = 0,954. \quad (2)$$

Для сравнения продуктивности хвои в разных зонах загрязнения в уравнения (1) и (2) были введены фиктивные переменные [17]. Приняты их обозначения для сосны: $X = 0$ – для Тургай-

ского прогиба, $X = 1$ – для Среднего Урала; для ели Среднего Урала: $X_1 = 0$, $X_2 = 0$ – контроль; $X_1 = 0$, $X_2 = 1$ – буферная зона 1; $X_1 = 1$, $X_2 = 0$ – буферная зона 2. Результаты табулирования (1) и (2) представлены в табл. 11 и 12.

Таблица 11

Изменение продуктивности хвой* сосны Тургайского прогиба и Среднего Урала в зависимости от диаметра ствола у основания кроны (Dbc), диаметра (D) и годовичного радиального прироста на высоте 1,3 м (Zr)

Dbc, см	Сосна Тургайского прогиба			Сосна Среднего Урала		
	Годичный радиальный прирост (мм), средний за последние 5 лет					
	0,2	1,8	3,4	0,2	1,8	3,4
D = 24 см						
8	1,4/1,08	4,1/3,31	-	1,7/0,89	4,8/2,82	-
12	2,3/0,65	7,2/1,88	10,0/2,56	2,7/0,56	8,4/1,61	11,7/2,19
20	3,6/0,42	15,0/0,90	22,6/1,13	4,3/0,35	17,6/0,77	26,6/0,96
D = 40 см						
8	1,8/1,40	5,8/3,90	-	2,1/1,20	6,9/3,28	-
12	2,8/0,90	10,2/2,22	14,7/2,90	3,3/0,76	12,0/1,88	17,3/2,47
20	4,5/0,56	21,3/1,06	33,3/1,28	5,3/0,47	25,1/0,90	39,3/1,09
D = 56 см						
8	2,1/1,67	7,4/4,63	-	2,4/1,46	8,6/3,98	-
12	3,3/1,07	12,8/2,68	-	3,8/0,93	15,1/2,27	-
20	-	26,8/1,28	-	-	31,6/1,08	-

* Первая цифра в табл. 11 и 12 – масса хвой, кг; вторая цифра – продуктивность хвой, см²/кг.

Таблица 12

Изменение продуктивности хвой ели Среднего Урала в зависимости от диаметра ствола у основания кроны (Dbc) и годовичного прироста поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м по градиенту загрязнений

Dbc, см	Годичный прирост поперечного сечения ствола на высоте 1,3 м, см ²				
	1	3	5	10	15
Буферная зона 1					
8	1,7 / 0,587	2,9 / 1,050	3,6 / 1,376	5,0 / 1,986	6,1 / 2,462
20	7,6 / 0,131	12,8 / 0,235	16,3 / 0,307	22,5 / 0,444	27,3 / 0,550
32	16,4 / 0,061	27,6 / 0,109	35,1 / 0,142	48,6 / 0,206	58,9 / 0,255
Буферная зона 2					
8	1,7 / 0,603	2,8 / 1,078	3,5 / 1,413	4,9 / 2,039	5,9 / 2,527
20	7,4 / 0,135	12,5 / 0,241	15,8 / 0,316	22,0 / 0,455	26,6 / 0,564
32	16,0 / 0,062	26,9 / 0,112	34,2 / 0,146	47,4 / 0,211	57,3 / 0,262
Фоновая зона (контроль)					
8	1,6 / 0,627	2,7 / 1,122	3,4 / 1,470	4,7 / 2,122	5,7 / 2,630
20	7,1 / 0,140	12,0 / 0,251	15,2 / 0,328	21,1 / 0,474	25,5 / 0,587
32	15,4 / 0,065	25,8 / 0,116	32,8 / 0,152	45,5 / 0,220	55,1 / 0,272

При сравнении массы хвой сосняков двух регионов очевидны существенные различия ($t=3,8 > 2,0$): при фиксированных значениях диаметров и приростов ствола масса хвой в сосняках Урала на 17–18% выше, чем в Тургае, а ее продуктивность (отношение прироста площади сечения ствола к массе хвой) напротив, соответственно ниже (см. табл. 11).

Известно, что в жестких условиях произрастания (годовые осадки со-

ставляют в Тургае 250–270, а на среднем Урале – 470–510 мм) продуктивность хвой ниже, чем в оптимальных, т.е. для отложения единицы прироста ствола требуется большая ассимилирующая масса. Мы получили противоположный результат, который может быть обусловлен относительной близостью источников промышленных загрязнений на среднеуральских объектах, хотя признаков деградации хвой и древостоев при предварительном визуальном обследовании не было выявлено. Можно считать, что в уральских сосняках, расположенных на расстоянии 10–15 км от источника выбросов, выявленное снижение продуктивности хвой по сравнению с сосняками Тургаи объясняется вредным воздействием выбросов на ассимиляционный аппарат. Так же отсутствовали визуальные различия в охвоенности деревьев ели по градиенту загрязнений. Тем не менее, судя по табл. 13, наблюдается некоторое повышение массы хвой и, напротив, снижение ее продуктивности по мере приближения к источнику загрязнений при условии одних и тех же значений как ксилемного (Dbc), так и флоэмного (Zg) транспорта у деревьев.

Количественную оценку изменения продуктивности ассимиляционного аппарата деревьев по градиенту загрязнений можно выполнить и без довольно трудоемкого определения массы

хвои, ограничившись измерением дендрометрических показателей, характеризующих ксилемный и флоэмный транспорт дерева. Покажем это на примере ели. Рассчитаны уравнения:

$$\ln Z_g = -0,278 - 0,0602X_1 - 0,278X_2 + 2,232 \ln D_{bc} - 0,829 \ln A; R^2 = 0,933; \quad (3)$$

$$\ln Z_v = -0,0278 - 0,0013X_1 - 0,240X_2 + 2,776 \ln D_{bc} - 1,259 \ln A; R^2 = 0,953. \quad (4)$$

Все константы при дендрометрических переменных в уравнениях (1)–(4) значимы на уровне t_{05} . Возраст дерева A (лет) включен в (3) и (4) с целью нейтрализовать его влияние на зависимость прироста от диаметра водопроводящей заболони D_{bc} .

Результаты табулирования уравнений (3) и (4) при заданном возрасте $A = 90$ лет (табл. 12) свидетельствуют о закономерном снижении прироста площади сечения и объемного прироста при одной и той же величине диаметра ствола у основания кроны равновеликих деревьев ели по мере приближения к источнику загрязнения, соответственно на 32 и 27%.

Таблица 13

Зависимость годичного прироста площади сечения на высоте груди (см^2) (первая цифра) и годичного объемного прироста стволовой древесины ели (дм^3) (вторая цифра) от диаметра ствола у основания кроны в возрасте 90 лет по градиенту загрязнения

Зоны	Диаметр ствола у основания кроны, см					
	8	12	16	20	24	28
Буферная 1	1,42 / 0,9	3,52 / 2,6	6,68 / 5,8	10,99 / 10,8	16,51 / 18,0	23,29 / 27,6
Буферная 2	1,77 / 1,1	4,37 / 3,3	8,31 / 7,4	13,67 / 13,8	20,54 / 22,8	28,98 / 35,1
Фоновая	1,88 / 1,1	4,64 / 3,3	8,83 / 7,4	14,52 / 13,8	21,82 / 22,9	30,78 / 35,1

Заключение. Исследования воздействий промышленных поллютантов на биопродуктивность лесных экосистем в настоящее время сопряжены с трудностями учета исходных (т.е. до начала действия поллютантов) характеристик их возрастной, видовой и морфологической структуры. Предложенный метод оценки названных воздействий на более низком уровне организации растительного мира, уровне особи с учетом ее опосредованных физиологических характеристик, с последующей экстраполяцией выявленных закономерностей на уровень ценозов может оказаться продуктивным, особенно на допороговых уровнях загрязнения.

Список литературы

1. Воробейчик, Е. Л. Экология импактных регионов: перспективы фундаментальных исследований / Е. Л. Воробейчик // Ученые записки Нижнетагильской государственной социально-педагогической академии. Матер. VI Всероссийского популяционного семинара «Фундаментальные и прикладные проблемы популяционной биологии». – Нижний Тагил, 2004. – С. 36-45.
2. Воробейчик, Е. Л. «Грязная» экология в ИЭРиЖ / Е. Л. Воробейчик // Уральская экологическая школа: вехи становления и развития. – Екатеринбург, 2005. – С. 175-217.
3. Бачурина, А. В. Влияние промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь» на состояние прилегающих лесных насаждений: Автореф. дис.... канд. с.-х. наук / А. В. Бачурина. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. – 21 с.
4. Юсупов, И. А. Состояние и устойчивость искусственных сосновых молодняков в условиях агропромвыбросов на Среднем Урале: Автореф. дис.... канд. с.-х. наук / И. А. Юсупов. – Екатеринбург: УГЛТА, 1996. – 25 с.
5. Левчук, Л. А. Состояние березовых насаждений и вегетативное возобновление березы в условиях фтористых загрязнений: Автореф. дис.... канд. с.-х. наук / Л. А. Левчук. – Свердловск: УЛТИ, 1991. – 25 с.
6. Юсупов, И. А. Надземная фитомасса искусственных молодняков сосны в условиях агропромвыбросов на Среднем Урале / И. А. Юсупов, С. В. Залесов, Н. А. Луганский // Биологическая рекультивация нарушенных земель. – Екатеринбург: Ин-т леса УрО РАН, 1997. – С. 266-278.
7. Лиена, И. Я. Временной ход реакции сосняков в условиях изменчивого загрязнения воздуха / И. Я. Лиена, О. Э. Никодемус, К. К. Раман, А. Я. Скудра // Темпоральные аспекты моделирования и прогнозирования в экологии. Сб. научн. тр. – Рига: ЛатГУ, 1986. – С. 114-127.
8. Лукина, Н. В. Изменение первичной продуктивности еловых древостоев под влиянием техногенных загрязнений на Кольском Севере / Н. В. Лукина, В. В. Никонов // Лесоведение. – 1991. – № 4. – С. 37-45.
9. Крючков, К. В. Влияние факелов по сжиганию попутного газа на лесные насаждения: Автореф. дис...канд. с.-х. наук / К. В. Крючков. – Екатеринбург: УГЛТА, 2000. – 20 с.
10. Власенко, В. Э. К вопросу об изучении продуктивности сосновых лесов в условиях регионального промышленного загрязнения / В. Э. Власенко, С. Л. Меншиков, Г. В. Андреев // Лесная таксация и лесоустройство. – 2001. – №1(30). – С. 145-147.
11. Усольцев, В. А. Биоэкологические аспекты таксации фитомассы деревьев / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1997. – 216 с.
12. Усольцев, В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 637 с.

13. Сидаравичюс, Й. М. Изменение биологической продуктивности деревьев при различном уровне атмосферного загрязнения / Й. М. Сидаравичюс // Закономерности роста и производительности древостоев. – Каунас: ЛитСХА, 1985. – С. 228-230.
14. Shinozaki, K. A Quantitative analysis of plant form – the pipe model theory / K. Shinozaki, K. Yoda, K. Hozumi, T. Kira // 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.
15. Фомин, В. В. Морфофизиологическая оценка состояния сосновых молодняков в зоне действия атмосферных загрязнений Первоуральско-Ревдинского промышленного узла: Автореф. дис... канд. с.-х. наук / В. В. Фомин. – Екатеринбург: УГЛТА, 1998. – 23 с.
16. Усольцев, В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 541 с.
17. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.

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

Статья поступила в редакцию 22.04.09.

V. A. Usoltsev, E. L. Vorobeichik,
E. V. Khantemirova, I. E. Bergman, A. F. Urazova

STUDYING FOREST BIOLOGICAL PRODUCTIVITY ALONG INDUSTRIAL POLLUTION GRADIENTS: METHODOLOGICAL ANALYSIS AND OUTLOOKS

Methods of quantitative estimating of forest biological productivity according to air pollution gradients have been analyzed. Some examples of breach of experiment design principle are shown, impossibility of its "ideal" realization when creating some phenomenological model capable to describe change of ecosystems on impact region has been marked. A method of the pollution degree estimating when using a tree foliage productivity index is proposed.

Key words: biomass, forests productivity, contamination of ecosystems, pine-tree, payp-model, industrial pollutants.

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры менеджмента Уральского государственного лесотехнического университета. Научные интересы – лесная экология. Автор более 400 публикаций. E-mail: usoltsev50@mail.ru.

ВОРОБЕЙЧИК Евгений Леонидович – доктор биологических наук, зам. директора по научной работе Института экологии растений и животных УрО РАН. Научные интересы – экологическая токсикология. Автор 75 публикаций. E-mail: ev@ipae.uran.ru.

ХАНТЕМИРОВА Елена Владленовна – канд. биол. наук, науч. сотрудник Института экологии растений и животных УрО РАН. Научные интересы – геоботаника, экология растений. Автор 45 публикаций. E-mail: ev@ipae.uran.ru.

БЕРГМАН Игорь Евгеньевич – аспирант кафедры менеджмента Уральского государственного лесотехнического университета. Научные интересы – лесная экология. Автор пяти публикаций. E-mail: mved@usfeu.ru.

УРАЗОВА Алина Флоритовна – аспирант кафедры менеджмента Уральского государственного лесотехнического университета. Научные интересы – лесная экология. Автор пяти публикаций. E-mail: mved@usfeu.ru.