

На правах рукописи

Бергман Игорь Евгеньевич

**Биологическая продуктивность ели и пихты в градиенте
атмосферных загрязнений на Урале: сравнительный анализ и
составление таксационных таблиц**

06.03.02 - Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научный руководитель: доктор сельскохозяйственных наук, профессор Усольцев Владимир Андреевич;

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор Махнев Африкан Кузьмич; кандидат сельскохозяйственных наук, доцент Голиков Дмитрий Юрьевич

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет»

Защита состоится 9 июня 2011 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 36, ауд. 320.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета.

Автореферат разослан 4 мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат сельскохозяйственных наук

А.В. Бачурина

ВВЕДЕНИЕ. Общая характеристика работы

Актуальность темы. Загрязнение окружающей среды достигло глобальных масштабов. Нынешние темпы изменения химического состава атмосферы и гидросфера многократно превышают скорость преобразования геохимии триасового периода, когда в течение миллиона лет атмосфера из углекислотной превратилась в кислородосодержащую (Цветков, 2002). Изменениям экосистем, испытывающих действие промышленных выбросов, посвящено много исследований, однако имеются лишь единичные попытки построения зависимостей «доза-эффект» на экосистемном уровне. Для разработки проблемы необходимы соответствующие экспериментальные полигоны. Такой полигон должен представлять территорию, в пределах которой крупный длительно действующий точечный источник эмиссии поллютантов "погружен" в фоновую среду (Воробейчик, 2005).

На Урале одним из наиболее интенсивных источников токсичных выбросов (главным образом, это соединения серы и тяжелые металлы) в атмосферу является медеплавильное производство, в частности, Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ) в Свердловской области.

Исследования автора проводились в 2007-2011 гг. в рамках проектов «Разработка системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами Уральского региона» и «Первичная биологическая продуктивность лесных экосистем в градиенте промышленного загрязнения», гранты РФФИ № 07-07-96010 и 09-05-00508.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является сравнительная оценка количественных и квадиметрических показателей фитомассы и чистой первичной продукции (ЧПП) ели и пихты сибирской в градиенте загрязнений от СУМЗ.

В связи с поставленной целью конкретные задачи исследования:

- заложить пробные площади в количестве, обеспечивающем их репрезентативность и достаточном для вычленения антропогенной обусловленности наблюдаемых изменений в градиенте загрязнений, и выполнить на них определения фитомассы и ЧПП насаждений;
- установить закономерности изменения продуктивности ассимиляционного аппарата ели и пихты в градиенте загрязнений, в том числе по схеме «доза-эффект»;
- составить таблицы для определения количественных и квадиметрических показателей фитомассы и ЧПП деревьев ели и пихты сибирской в градиенте загрязнений от СУМЗ.

На защиту выносятся следующие положения:

- сравнительная характеристика биологической продуктивности ели и пихты сибирской в градиенте загрязнений от СУМЗ, выраженная в абсолютных и относительных количественных показателях;

- закономерности изменения плотности и содержания сухого вещества (ССВ) в фитомассе ели и пихты в градиенте загрязнений;
- таблицы для таксации количественных показателей фитомассы и ЧПП деревьев ели и пихты сибирской, а также для определения квалиметрических характеристик в градиенте загрязнений от СУМЗ.

Научная новизна. Впервые дана сравнительная характеристика продуктивности хвои ели и пихты сибирской в градиенте загрязнений от СУМЗ и построены зависимости для биологической продуктивности насаждений типа «доза – эффект»; составлены таблицы для определения количественных и квалиметрических показателей фитомассы и ЧПП деревьев ели и пихты и дан их сравнительный анализ в градиенте загрязнений.

Практическая значимость работы. Результаты работы могут быть полезны для эколого-экономической оценки воздействий на окружающую среду, оказываемых медеплавильным производством на Урале, а также при установлении предельно допустимых нагрузок на лесные экосистемы и используются Институтом экологии растений и животных УрО РАН, Институтом глобального климата и экологии Росгидромета и РАН и Уральским экологическим союзом (имеются соответствующие справки).

Обоснованность выводов и предложений. Обширный экспериментальный материал и применение адекватных методов статистического анализа, системный подход при анализе фактических материалов и интерпретации полученных результатов, реализация поставленных задач на уровне регрессионных моделей, использование современных компьютерных программ определяют обоснованность приведенных в диссертации выводов.

Личное участие автора. Постановка проблемы, сбор исходного материала, его анализ и обработка, формулировка итоговых результатов осуществлены автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты исследований изложены на международных научно-технических конференциях «Международное сотрудничество в лесном секторе: баланс образования, науки и производства» (Йошкар-Ола, 2009); «Математическое моделирование в экологии» (Пущино, 2011); «Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири» (Томск, 2011); VII всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (Екатеринбург, 2011); VIII международной научно-технической конференции «Формирование регионального лесного кластера: социально-экономические и экологические проблемы и перспективы лесного комплекса» (Екатеринбург, 2011) и всероссийской научной молодежной школе-конференции «Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных промышленностью земель» (Екатеринбург, 2011).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 11 печатных работах, в том числе 3 - в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 159 страницах, состоит из введения, 7 глав и 5 приложений. Список использованной литературы включает 163 наименования, в том числе 36 иностранных. Текст иллюстрирован 44 таблицами и 28 рисунками.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Значительное загрязнение окружающей среды происходит за счет газообразных и пылевидных поллютантов, поступающих в природные комплексы воздушным путем. Обычно при оценке состояния пораженных лесов сравниваются один или несколько показателей, в той или иной мере отражающих состояние объектов. Наиболее распространены методики визуальной оценки степени поражения насаждений по внешним (балльным) признакам (Кулагин, 1974; Коженков, 1983; Аннука, Раук, 1984; Мартынюк, 1985; Аугустайтис и др., 1985; Менчиков, 1991). Количественные оценки осуществляются по таксационным или физиологическим признакам (Антипов, 1975; Гальперин, Фимушин, 1975; Фимушин, 1976, 1986; Мешковский, 1984; Шяпетене, Вянцкус, 1986; Ватковский, 1986; Армолайтис, Вайчис, 1986; Скуодене, 1988; Махнев и др., 1990; Цветков, 1991; Бабушкина и др., 1991; Калинин и др., 1991; Brassel et al., 1992; Shavnin et al., 1997; Фомин, 1998; Bussotti et al., 2005-2006; Завьялов, 2009).

500 лет назад Леонардо да Винчи (цит. по: *The notebooks of Leonardo da Vinci*, 1970), анализируя систему ветвления деревьев, отметил, что суммарное сечение ветвей и ствола одной градации толщины на любом уровне кроны равно сечению ствола у ее основания. После работ П. Жаккарда (Jaccard, 1913, 1915), Б. Хубера (Huber, 1925, 1927, 1928), И. Ямаоки (Yamaoka, 1952, 1958) группой японских исследователей (Shinozaki et al., 1964) была сформулирована теория «модели трубок» (пайп-модель), согласно которой растение рассматривается как совокупность элементарных трубок (сосудов ксилемы), каждая из которых завершается элементарной массой листьев и выполняет проводящие и поддерживающие функции.

С другой стороны, с конца прошлого века известна взаимосвязь массы хвои с количеством депонируемых ассимилятов в виде объемного прироста (Hartig, 1896). В дальнейшем эта закономерность была проверена, подтверждена и развита многочисленными исследованиями (Burger, 1929; Busse, 1930; Коссович, 1940; Георгиевский, 1948; Полякова, 1954; Satoo, 1970; Albrektson, 1980; White, 1993).

В.А. Усольцевым (1998) названные две концепции были совмещены в одной модели и установлено, что при фиксированных значениях диаметра под кроной и прироста ствола масса хвои в сосняках Урала на 17-18% выше, чем в Тургае, а ее продуктивность, выраженная отношением прироста площади сечения к сухой массе хвои, – соответственно ниже. Реали-

зация подобного подхода на серии пробных площадей в градиенте загрязнений (например, в районе СУМЗ) может стать количественной характеристикой степени поражения насаждений.

При оценке фитомассы и ЧПП деревьев и древостоев значительная доля затрат приходится на оценку квадиметрических характеристик (плотности и ССВ) фракций дерева, необходимых для перевода объемных единиц ствола в единицы сухой массы, и массы кроны в свежем состоянии – в абсолютно сухое. Методика таких определений достаточно разработана и выведены закономерности изменения квадиметрических показателей по определяющим факторам (Поздняков и др., 1969; Уткин, 1970; Поздняков, 1973; Полубояринов, 1973, 1976а; Технеряднов, Шоманов, 1976; Семечкина, 1978; Успенский, 1980; Усольцев, 1988). Закономерности их изменения в градиентах загрязнений не исследованы.

СУМЗ функционирует с 1940 года, и из его газообразных выбросов 98% по массе составляет сернистый ангидрид. Для запаса стволовой древесины пихтарников в градиенте загрязнений на прилегающих территориях исследована зависимость «доза – эффект», где в качестве дозы принят индекс токсической нагрузки как сумма превышений локальных концентраций Сu, Рb и Cd над фоновыми значениями (Воробейчик, Хантемирова, 1994). Изменение биопродуктивности лесов в градиентах аэрозагрязнений от СУМЗ исследовали в разные годы Б.С. Фимушин (1979), И.А. Юсупов (1996), Н.Ф. Низаметдинов (2009).

Анализ результатов исследований по проблематике загрязнений экосистем показал, что ни один полигон не соответствует понятию идеального эксперимента, требующего пространственной однородности фоновой среды, которая была бы обеспечена до начала действия источника выбросов (Воробейчик, 2004). На экосистемном уровне в методическом отношении наиболее сложна оценка влияния промышленных аэрозагрязнений на биологическую продуктивность лесных экосистем, где имеет место совмещенный эффект антропогенных и природных факторов, соотношение между которыми неизвестно. Учет последних можно обеспечить путем набора достаточного количества повторностей, охватывающих полный спектр морфологической изменчивости (Воробейчик, 2005). Однако этот принцип соблюдается редко.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И ЛЕСНОГО ФОНДА В РАЙОНАХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку исследования биопродуктивности ели и пихты выполнены как в фоновых, так и импактных зонах, в диссертации приведены показатели лесного фонда соответственно для Нижне-Сергинского и Билимбаевского лесничеств. По лесорастительному районированию Б.П. Колесни-

кова (Колесников и др., 1973) территория лесничества отнесена к подзоне южно-таёжных лесов и приурочена к Среднеуральской горной провинции. В диссертации описаны лесорастительные и климатические условия района, рельеф и почвы, гидрография и гидрологические условия.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА, ОБЪЕКТЫ И ОБЪЕМ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

В условиях фонового загрязнения исследования структуры фитомассы ельников и пихтарников выполнены в Нижне-Сергинском лесничестве Свердловской области. Изучены ельники (6 пробных площадей) и пихтарники (6 пробных площадей) мшистые одного возрастного ряда. Пробные площади закладывались с учетом теоретических положений лесной классификации согласно ОСТ 56-69-83 “Пробные площади лесоустроительные”. После рубки модельных деревьев, взятых по ступеням толщины, ствол делили на 10 секций, на середине каждой секции и на расстоянии 1,3 м от комля выпиливали диски и определяли диаметры ствола в коре и без коры. По этим замерам рассчитывали объем древесины и коры дерева. Диски взвешивали с точностью до 0,1 г и использовали далее для определения содержания коры и абсолютно сухого вещества в древесине и коре. По этим значениям рассчитывали абсолютно сухую фитомассу древесины и коры ствола. Возраст устанавливался по годичным кольцам на пне.

Фитомасса структурных частей кроны определялась после ее деления на три одинаковые по длине секции. После взвешивания каждой секции кроны с точностью до 50 г производилось деление их на охвоенные и неохвоенные ветви. Масса неохвоенных и охвоенных ветвей взвешивалась с точностью до 50 г. Затем из охвоенной части каждой секции отбиралась навеска (около 0,5 кг) для установления соотношения хвои и скелетных частей. С этой целью хвоя в навеске отделялась от ветвей и отдельно взвешивалась масса этих компонентов с точностью до 1 г. По установленным соотношениям определяли фитомассу хвои и древесных частей для каждого слоя, а затем – для всей кроны. Для определения влажности и абсолютно сухой массы хвои и ветвей из каждой части кроны взяты их образцы, которые взвешивались с точностью до 0,01 г. По полученным значениям рассчитывали абсолютно сухую массу хвои и ветвей дерева. Сушка всех образцов производилась до постоянного веса в термостатах.

Закономерности изменения биологической продуктивности ели и пихты в градиенте загрязнений от СУМЗ выполнено на территории Билимбаевского лесничества на полигоне заложенном в 1989 г. сотрудниками Института экологии растений и животных УрО РАН (Воробейчик, Хантемирова, 1994). Полигон был подразделен на три зоны: импактную (расстояние от источника загрязнений 1 и 2 км), буферную (расстояние 4 и 7

км) и контроль (расстояние 20 и 30 км). На перечисленных расстояниях были заложены 43 пробные площади размером 25×25 м (150-200 деревьев на каждой).

В 2008 году нами была выполнена инструментальная таксация древостоев в названном градиенте (табл. 1). Наряду с традиционной таксацией на каждой пробной площади определены фитомасса и ЧПП насаждений. Для этого взято по 6-7 модельных деревьев отдельно пихты и ели в пределах варьирования их диаметров на пробной площади.

В градиенте загрязнений на пробных площадях кроме фитомассы древостоев определяли их ЧПП, а также выполнены определения фитомассы и ЧПП подроста и подлеска. Прирост древесины ствола определен путем “расчехления” ствола по 10 отрезкам и определения объемного прироста, среднего за последние 5 лет, с последующим пересчетом на абсолютно сухое состояние по базисной плотности, определенной по навескам. Прирост коры рассчитан по приросту древесины и соотношению массы древесины и коры ствола. Прирост хвои определяли по тем же 0,5-килограммовым навескам охвощенных побегов, но отделяли не только всю хвою, но и хвою текущего года, и затем аналогичным образом рассчитывали массу хвои текущего года. ЧПП ветвей определена по методу, предложенному А. И. Русаленко и Е. Г. Петровым (1975). У модельных деревьев были измерены в четырех направлениях на выпилах, взятых на высоте 1,3 м, годичные радиальные приросты древесины за последние 5 лет, общие приросты заболони и диаметры без коры и на их основе рассчитаны годичный прирост площади сечения (Z_g) и площадь заболони (G_z) ствола на высоте 1,3 м.

Фитомасса и ЧПП определены не на всех 43 пробных площадях, а лишь на базовых, расположенных на расстояниях 1, 2, 4, 7 и 30 км от СУМЗ. Общее количество взятых модельных деревьев – 66, в том числе 32 пихты и 34 ели. Количество дисков, выпиленных из стволов для определения квалиметрических показателей древесины и коры – 172, в том числе 85 для ели и 87 для пихты; количество определений квалиметрических показателей кроны по пробным навескам хвои и ветвей (скелета кроны) – 163, в том числе 83 для ели и 80 для пихты. Фитомасса и ЧПП лиственных пород древесного яруса определены по базе данных В.А. Усольцева (2007).

Показатели биопродуктивности подроста и подлеска определены с использованием методики БИН РАН (Методы..., 2002). На каждой пробной площади методом случайной выборки заложены три мини-площадки размером 5×5 м. Диапазон варьирования высот разбивали на три градации по каждому виду и в пределах каждой градации вели перечет по диаметру у основания корневой шейки штангенциркулем с точностью до 0,5 мм.

Таблица 1

Таксационная характеристика пихтово-еловых насаждений

L^* , км	Породный состав	Возраст, лет	Класс бонитета	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Густота, экз/га	Площадь сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га
P^{**}	7И3Б	67	IV	11,9	12,9	176	2,29	14,5
	6Б4Ив	61	IV	10,5	11,0	240	2,29	20,1
	6Е4П+Б	76	IV	14,2	15,1	1456	26,2	175
1а	3Е1П2Б4С	82	IV	15,6	16,6	768	16,7	121
	5Е4П1Б +Ив;С	74	IV	13,6	13,9	1072	16,2	111
	5Е4П1Б+С	78	IV	14,8	15,4	1104	20,6	147
16	6Е4П+Б;Ос	76	IV	14,2	15,2	1456	26,4	177
	7Е3П+Б	85	IV	16,3	17,0	976	22,2	163
	4Е3Б2Ос1П	61	IV	10,5	10,7	1664	15,1	108
1,5	3Е4П1Б2С	75	III	18,5	18,8	1152	31,8	258
	3Е6П1Б+С	81	III	16,7	16,0	1312	26,2	201
	4Е2П3С1Б+Ив	81	III	18,1	15,5	1472	27,6	249
2	3Е4П2Б1Ос	82	IV	15,2	13,7	2080	30,6	220
	5Е3П2Ос	84	IV	17,3	16,9	1504	33,8	265
	5Е4П1Б+Ос	87	IV	16,3	15,4	2160	40,0	307
4	4Е5П1Б+Ос	85	IV	16,1	14,5	2272	37,5	294
	2Е7П1Ос+Б	90	IV	15,3	14,3	1968	31,6	223
	8Е1П1Б+Ос	115	III	23,0	23,4	1104	47,3	448
6	3Е5П2Б+Ос	100	III	18,8	15,6	2000	38,1	309
	9Е1П+Б	127	II	26,1	29,4	544	37,0	387
	3Е6П1Ос	109	III	21,2	19,6	1504	45,3	405
7	6Е2П2Б	119	III	23,9	26,9	752	42,8	401
	3Е6П1Б+С	86	III	20,1	20,7	1232	41,4	373
	3Е6П1Б+Ос;С	85	III	19,7	20,3	1312	42,3	381
10	4Е3П2Б1Лц+С	85	III	21,0	20,1	1504	47,8	471
	2Е6П2Б	89	III	21,3	21,6	1200	43,8	405
	2Е6П2Б+Ос	90	III	21,5	22,7	1088	44,0	405
20	4Е3П3Б+Ос	94	II	23,1	26,3	944	51,4	476
	1Е5П3Б1Ос	91	III	22,0	21,9	1184	44,5	398
	7П3Б+Е	90	III	21,5	22,5	1360	54,0	478
30	4Е3П3Б+С;Ос	89	III	21,4	21,1	1152	40,2	352
	5Е4П1Б+Ос	87	III	20,3	20,5	992	32,7	288
	4Е3П2Б1Ос	87	III	20,4	22,1	896	34,3	291
34	2Е5П2Ос1Б+С	99	II	23,6	24,0	912	41,3	401
	2Е4П2Ос1Б1С	100	II	22,8	23,7	1040	45,8	408
	2Е8П	102	II	22,8	22,7	1120	45,2	420
34	4Е6П	98	III	20,8	21,0	1024	35,4	305
	2Е6П2Б	101	III	22,4	22,3	1328	51,9	465
	4Е6П	102	III	22,5	24,9	704	34,3	319
34	7П2Б1Е	102	III	22,7	23,8	1344	59,9	530
	3Е5П2Б	99	III	21,6	23,4	880	37,8	334
	5Е3П2Б+С	102	II	23,7	23,7	1088	48,2	466
	4Е4П2Б+Ос	100	III	22,0	21,4	960	34,5	317

* L – здесь и далее расстояние от источника загрязнений.

** P – здесь и далее техногенная пустошь.

Модельные растения каждого вида взяты на пробных площадях по градиенту загрязнения, по одному растению в каждой ступени толщины. Растения высотой менее 0,5 м фракционировали, взвешивали и сушили при 105°C до постоянной массы. У корневой шейки по годичным кольцам определяли возраст, делением на который полученной массы скелетной части растения определена ее первичная продукция. Первичная продукция хвои определена путем деления ее массы на средний (по нескольким мутовкам) возраст хвои.

У растений высотой более 0,5 м секатором отделяли охвоенные побеги, из их общего количества брали навеску массой около 500 г, взвешивали; у нее отделяли хвою и повторно взвешивали. Затем хвою и остальную часть навески сушили раздельно до постоянной массы, снова взвешивали и рассчитывали ССВ в обеих фракциях. По их значениям определяли сухую массу фракций всего растения. Первичную продукцию скелетной части рассчитывали делением массы на возраст деревца, а хвои - делением ее массы на средний возраст хвои. Полученные значения фракционного состава модельных растений каждого вида отдельно соотносили с их суммой площадей сечений и затем по общей сумме площадей сечений, полученной перечетом на каждой из трех мини-площадок, находили значение фитомассы скелетной части и хвои и переводили ее на 1 га. Аналогично рассчитывали первичную продукцию скелетной части и хвои на 1 га.

Мы признательны сотрудникам Института экологии растений и животных УрО РАН Е.Л. Воробейчику и М.Р. Трубиной, любезно предоставившим нам данные о фитомассе и ЧПП живого напочвенного покрова и мхов (приложение 5), а также Е.Л. Воробейчику, С.Ю. Кайгородовой, П.Г. Пищулину, А.В. Щепеткину и И. Биктимирову, предоставившим данные по индексам токсичности в градиенте загрязнений.

ГЛАВА 4. СТРУКТУРА ФИТОМАССЫ И ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ СИБИРСКОЙ И ПИХТЫ СИБИРСКОЙ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И СОСТАВЛЕНИЕ ТАКСАЦИОННЫХ ТАБЛИЦ

При исследовании биопродуктивности деревьев ели и пихты в градиенте аэрозагрязнений мы использовали структуру аллометрического уравнения, в котором ценотическое положение включено в качестве независимой переменной и которое представляет степенную функцию, линеаризованную путем логарифмирования. Уравнение позволяет исключить варьирование биопродуктивности, обусловленное ценотическим положением дерева. Поскольку на наших пробных площадях возраст деревьев варьирует в диапазоне от 37 до 164 лет, в уравнение включен в качестве

второй независимой переменной возраст дерева. В качестве третьей независимой переменной в уравнение введено расстояние от СУМЗ.

Нам необходимо выявить различия в структуре фитомассы двух пород (если они существуют) и степень изменения этого различия в градиенте загрязнений. Но чтобы «гармонизировать», или согласовать между собой уравнения для двух разных древесных пород, необходимо их объединить в некую систему. Принадлежность уравнения к той или иной древесной породе может быть выражена с помощью специальной, так называемой бинарной переменной (Дрейпер, Смит, 1973), когда одно из сопоставляемых множеств кодируется нулем, а другое – единицей. Анализ исходных данных массы хвои показал, что тренды ее изменения в градиенте загрязнений у ели и пихты имеют разные углы наклона по отношению к оси абсцисс. Для учета этого различия в уравнение введен синергизм $X(\ln L)$.

В результате выполненного расчета получено для массы хвои следующее итоговое уравнение

$$\ln Pf = -2,738 + 2,309 \ln D - 0,371 \ln A - 0,0590 \ln L - 0,0537 X(\ln L) + 0,628 X; \quad (1)$$

$R^2 = 0,959$; стандартная ошибка уравнения $SE = 0,241$.

В уравнении (1) Pf - масса хвои, кг; D – диаметр ствола на высоте груди, см; A – возраст дерева, лет; X – бинарная переменная, равная 1 и 0 соответственно для ели и пихты. Значимость констант при переменных $\ln D$, $\ln A$, $\ln L$ и X составила, по Стьюденту, соответственно 33,0; 3,1; 3,2 и 6,2, что больше 2,0. Знаки при переменных уравнения (1) показывают, что масса хвои равновозрастных деревьев увеличивается пропорционально толщине ствола, но ее масса у равновеликих деревьев снижается с возрастом дерева (в диапазоне от 40 до 160 лет), а масса хвои у равновеликих и равновозрастных деревьев снижается по мере удаления от СУМЗ.

Установлено статистически достоверное снижение массы хвои у равновозрастных и равновеликих деревьев обеих древесных пород по мере удаления от СУМЗ в диапазоне от 1 до 30 км, причем различное у двух пород: у ели на 32, а у пихты – на 18%. Если в импактной зоне масса хвои у пихты на 47% ниже, чем у ели, то на контроле – лишь на 36%. Таким образом, при равном удалении от СУМЗ равновеликие и равновозрастные деревья ели обладают существенно большей фитомассой хвои по сравнению с пихтой. Поскольку визуально в названном градиенте какой-либо закономерности в изменении степени «прозрачности» кроны (crown transparency degree) не наблюдалось, единственно, чем можно объяснить статистически достоверное снижение массы хвои у равновозрастных и равновеликих деревьев по мере удаления от СУМЗ – это увеличение плотности охвоения побегов в кроне по мере повышения уровня загрязнения соединениями серы (Ярмишко, 1997). Для практического использования уравнения (1) путем подстановки соответствующих задаваемых значений независимых переменных получена таксационная таблица, предназначенная для количест-

венной оценки ассимиляционного аппарата ели и пихты в градиенте загрязнений от СУМЗ.

При расчете уравнения (1) оказалось, что степень удаления от СУМЗ не оказывает существенного влияния на массу ветвей, ствола и всей надземной. Влияние возраста дерева на массу названных фракций также оказалось не значимым, и вместо возраста введена высота дерева H , м. В результате структура уравнения (1) модифицирована и приведена к виду

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln H + a_3 X, \quad (2)$$

характеристика которого дана в табл. 2. Все константы в (2) значимы на 95-процентном уровне.

Таблица 2

Характеристика уравнения (2)

Зависимая переменная $\ln P_i$ для:	Константы и независимые переменные				R^2	Стандартная ошибка уравнения
	a_0	$a_1 \ln D$	$a_2 \ln H$	$a_3 X$		
стволов	-3,3612	1,8928	0,7626	0,0793	0,991	0,132
ветвей	-3,4900	2,9095	-0,8493	0,3767	0,944	0,293
хвои	-3,8426	2,3453	-0,2645	0,5402	0,941	0,273

На основе уравнения (2) составлена таксационная таблица, предназначенная для оценки всей надземной фитомассы деревьев ели и пихты и ее полной фракционной структуры и позволяющая проследить основные тенденции в изменении фракционного состава фитомассы ели и пихты по определяющим факторам и дать им количественную характеристику. Во-первых, фитомасса деревьев пихты по сравнению с равновеликими деревьями ели существенно меньше, а именно, по массе ствола, ветвей и хвои соответственно на 8, 31 и 42%. При увеличении диаметра ствола с 12 до 40 см фитомасса стволов, ветвей и хвои увеличивается соответственно в 10, 33 и 17 раз. С изменением высоты дерева фитомасса связана намного слабее: например, в диапазоне высот от 8 до 24 м фитомасса ствola возрастает в 2,0 раза, а ветвей и хвои снижается соответственно в 2,5 и 1,3 раза.

Структура уравнения для ЧПП принята по аналогии со структурой уравнения (1) и имеет общий вид

$$\ln Z_i = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln A + a_3 \ln L + a_4 X, \quad (3)$$

где Z_i - ЧПП (Z_{st} , Z_{br} , Z_f и Z_a) фракции дерева в абсолютно сухом состоянии (соответственно ЧПП стволов в коре, ветвей, хвои и надземной), кг. Оказалось, что степень удаления от СУМЗ не оказывает существенного влияния на фракционный состав ЧПП деревьев ели и пихты: значение $t_{\text{факт}}$ константы при переменной $\ln L$ составило для ЧПП стволов, ветвей, хвои и надземной ЧПП соответственно 1,2; 0,48; 1,1 и 0,15, что меньше $t_{05} = 2,0$, и эта переменная была также исключена из расчета. В итоге рассчитано уравнение

$$\ln Z_i = a_0 + a_1 \ln D + a_2 \ln A + a_3 X, \quad (4)$$

характеристика которого дана в табл. 3. Все константы уравнения (4) значимы на 95-процентном уровне и выше. Уравнение (4) явилось основой для составления таксационных таблиц, предназначенных для оценки ЧПП деревьев ели и пихты сибирской на Среднем Урале. Путем его табулирования по задаваемым значениям независимых переменных, которые в этом случае служат в качестве «входов», составлена таблица для оценки фракционного состава ЧПП деревьев ели и пихты.

Таблица 3

Характеристика уравнения (4)

Переменная $\ln Z_i$ для:	Константы и независимые переменные				R^2	SE
	a_0	$a_1 \ln D$	$a_2 \ln A$	$a_3 X$		
стволов	-2,1895	2,3226	-0,6858	0,4848	0,925	0,326
ветвей	-3,0175	2,1539	-0,8902	0,3792	0,928	0,285
хвои	-4,1287	2,2246	-0,4408	0,5350	0,915	0,357

Соотношения в фракционной структуре ЧПП и закономерности ее изменения по определяющим факторам существенно отличаются от таких, установленных для фитомассы деревьев. ЧПП деревьев пихты по сравнению с равновеликими и равновозрастными деревьями ели существенно меньше, а именно, по массе ствола, ветвей и хвои соответственно на 38, 32 и 41%. При увеличении диаметра ствола с 16 до 40 см и при условии одних и тех же значений высоты и возраста дерева ЧПП ствola, ветвей и хвои у обеих пород возрастает в 7-8 раз. При увеличении возраста равновеликих деревьев с 40 до 160 лет ЧПП ствola, ветвей и хвои сокращается соответственно в 2,6; 3,5 и 1,8 раза вследствие возрастного сдвига деревьев одного и того же диаметра из лидеров в кандидаты на отмирание.

ГЛАВА 5. ПРОДУКТИВНОСТЬ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА ЕЛИ И ПИХТЫ СИБИРСКОЙ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ СУМЗ

В результате модификации методики Й. Сидаравичюса (1985) по совокупности модельных деревьев нами рассчитаны уравнения

$$\ln (Z_g/P_f) = 14,010 - 5,995 \ln A + 0,592 (\ln A)^2 + 0,0597 \ln L + 0,165 X (\ln L) - 0,197 X, \quad (5)$$

$$R^2 = 0,584; SE = 0,279;$$

$$\ln (Z_g/G_z) = 0,428 - 0,635 \ln A + 0,134 \ln L + 0,270 X (\ln L) - 0,328 X, \quad (6)$$

$$R^2 = 0,523; SE = 0,365;$$

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

высоте 1,3 м; P_f – масса хвои дерева, кг; A – возраст дерева, лет. Константы достоверны на 95-процентном уровне.

Результаты их табулирования показали (табл. 4), что продуктивность хвои снижается с возрастом дерева в пределах одной зоны загрязнения, а у деревьев одного и того же возраста – по мере приближения к источнику загрязнений. В импактной зоне продуктивность хвои у пихты выше, чем у ели, а в буферной и на контроле – наоборот, причем эта закономерность является общей для всех возрастов в исследуемом диапазоне и не зависит от выбранного показателя продуктивности.

Количественные характеристики трендов различаются как по принятому показателю продуктивности, так по видовой принадлежности дерева. У ели при увеличении расстояния от СУМЗ с 1 до 30 км показатель Z_g/P_f возрастает в 2 раза, а показатель Z_g/G_z – в 4 раза, тогда как у пихты – соответственно на 22 и 57%. Таким образом, на продуктивность хвои ели один и тот же уровень загрязнений оказывает значительно более сильное воздействие по сравнению с хвоей пихты.

Таблица 4
Изменение продуктивности хвои деревьев пихты разного возраста
в связи с удалением от СУМЗ

L , км	Продуктивность хвои Z_g/P_f ($\text{см}^2/\text{кг}$) при возрасте дерева, лет					Продуктивность хвои Z_g/G_z ($\text{см}^2/\text{см}^2$) при возрасте дерева, лет				
	40	60	80	120	160	40	60	80	120	160
Ель										
1	0,783	0,446	0,337	0,268	0,256	0,106	0,082	0,068	0,053	0,044
2	0,915	0,521	0,394	0,313	0,300	0,140	0,109	0,090	0,070	0,058
4	1,069	0,609	0,460	0,366	0,350	0,186	0,144	0,120	0,092	0,077
7	1,212	0,691	0,522	0,415	0,397	0,233	0,180	0,150	0,116	0,097
30	1,680	0,958	0,723	0,575	0,550	0,419	0,324	0,270	0,208	0,174
Пихта										
1	0,953	0,543	0,410	0,326	0,312	0,147	0,114	0,095	0,073	0,061
2	0,993	0,566	0,428	0,340	0,325	0,162	0,125	0,104	0,080	0,067
4	1,035	0,590	0,446	0,354	0,339	0,177	0,137	0,114	0,088	0,074
7	1,071	0,610	0,461	0,367	0,351	0,191	0,148	0,123	0,095	0,079
30	1,168	0,666	0,503	0,400	0,382	0,232	0,180	0,150	0,116	0,096

ГЛАВА 6. ПЛОТНОСТЬ И СОДЕРЖАНИЕ СУХОГО ВЕЩЕСТВА В ФИТОМАССЕ ЕЛИ И ПИХТЫ СИБИРСКОЙ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ СУМЗ

Квалиметрические характеристики фракций фитомассы проанализированы методом многофакторного регрессионного моделирования согласно структуре уравнения:

$$\rho_\omega \text{ и } S = a_0 + a_1 D + a_2 h + a_3 L + a_4 X, \quad (7)$$

где ρ_ω – плотность каждой фракции в свежем состоянии, $\text{кг}/\text{м}^3$; S – ССВ, %; D – диаметр ствола на высоте груди, см; h – относительная высота сечения ствола, в долях от общей высоты дерева; X – бинарная переменная, равная 1 и 0 соответственно для ели и пихты.

В процессе расчета уравнения (7) установлено, что по показателю плотности древесины и коры ель и пихта не различаются (составила соответственно 0,86 и 1,83, что меньше $t_{05} = 2$), и расчетная структура уравнения редуцирована к виду:

$$\rho_\omega = a_0 + a_1 D + a_2 h + a_3 L, \quad (8)$$

тогда как для ССВ оставлена структура уравнения (7). Характеристика уравнений, полученных по фактическим данным модельных дисков, показывает, что все константы уравнений (7) и (8) значимы на 95-процентном уровне и выше. На их основе составлены соответствующие таблицы.

Таким образом, установлены статистически достоверные зависимости изменения содержания сухого вещества в древесине деревьев ели и пихты сибирской от степени удаления от источника загрязнений. Если по показателю плотности как древесины, так и коры стволов, ель и пихта достоверно не различаются, то по содержанию сухого вещества различия есть: по древесине названный показатель выше у ели, а по коре, наоборот, у пихты. ССВ в древесине повышается: у равновеликих деревьев по мере удаления от СУМЗ, а в пределах одной зоны загрязнения – по мере увеличения толщины ствола. ССВ в древесине в диапазоне от 0,2 до 0,8 высоты дерева снижается у ели на 13-15% и у пихты на 15-17%, а в коре соответственно на 10 и на 9%.

Для оценки ССВ ветвей и хвои принята структура регрессионной модели:

$$S = a_0 + a_1 D + a_2 A + a_3 L + a_4 X, \quad (9)$$

где A – возраст дерева, лет. Поскольку расстояние от СУМЗ не оказывает влияния на содержание сухого вещества в ветвях и хвое ($t_{\text{факт}} = 1,51$ и 0,60, что меньше $t_{05} = 2$), переменная L исключена, и получены уравнения:

- для ветвей $S = 43,28 + 0,0945D + 0,0427A + 9,484X; R^2 = 0,583; SE = 4,20$; (10)

- для хвои $S = 40,61 + 0,0650D + 0,0189A + 4,780X; R^2 = 0,638; SE = 1,90$; (11)

Все константы уравнений (10) и (11) значимы на 95-процентном уровне и выше. На их основе составлена соответствующая таблица. Установлено, что у обеих пород ССВ в ветвях существенно выше, чем в хвое, и величина этого превышения различается по породам. В ветвях названный показатель равновеликих деревьев выше у ели по сравнению с пихтой на 19-21%, а в хвое лишь на 11%.

Имеется некоторое повышение ССВ в ветвях и хвое равновозрастных деревьев ели и пихты по мере увеличения толщины ствола и равновеликих

деревьев – по мере увеличения возраста дерева. Поскольку уровень загрязнений в данном случае не оказывает на названный показатель существенного влияния, можно предполагать, что в основе выявленных закономерностей лежат физиологические процессы.

Для предварительных расчетов или в случаях, когда нет возможности для определения плотности и ССВ в фракциях фитомассы термовесовым методом при ее оценке на пробных площадях в древостоях ели и пихты, необходимы средние значения названных показателей. Они рассчитаны нами по фактическим исходным данным образцов-навесок: ССВ в древесине ствола, коре ствола, ветвях и хвое составляет у ели соответственно 46,2; 43,9; 58,0 и 48,0, а у пихты соответственно 42,7; 44,4; 49,0 и 44,0, и видовые различия по всем фракциям достоверны за исключением коры ствола. Плотность в свежем состоянии древесины и коры ствола составляет у ели соответственно 803 и 871 кг/м³, и у пихты соответственно 805 и 847 кг/м³ при отсутствии достоверности видовых различий по данному показателю.

Таким образом, показатели ССВ и плотности коры, а также плотности древесины ствола в свежем состоянии, можно использовать как значения, общие для ели и пихты, а по остальным квадратиметрическим показателям существуют достоверные видовые различия.

ГЛАВА 7. ФИТОМАССА И ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЕЛОВО-ПИХТОВЫХ НАСАЖДЕНИЙ В ГРАДИЕНТЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОТ СРЕДНЕУРАЛЬСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ЗАВОДА

Фракционная структура фитомассы естественных ельников и пихтарников средней тайги Урала в условиях фонового загрязнения. По результатам перечетов древостоев на пробных площадях, заложенных в фоновых условиях загрязнения на территории Нижне-Сергинского лесничества, и полученным данным о фитомассе модельных деревьев регрессионным методом рассчитаны таксационная характеристика и показатели фракционной структуры надземной фитомассы ельников (с долей участия ели от 60 до 90%) и пихтарников (с долей участия пихты тоже от 60 до 90%). Классы бонитета – III- IV, возраст от 20 до 130 лет.

Поскольку среднетаежные темнохвойные леса представлены смешанными елово-пихтовыми древостоями, представляло интерес выяснить, в какой степени для оценки их фитомассы необходимы раздельные нормативы и можно ли разрабатывать и использовать нормативы, пригодные как для чистых, так и для смешанных елово-пихтовых древостоев.

Регрессионный анализ показал, что при условии равенства возраста нет статистически достоверных различий между пихтарниками и ельни-

ми ни по таксационным показателям представленных возрастных рядов, ни по показателям фитомассы ($t_{факт} = 0,02 \div 0,99 < t_{05} = 2,0$). Составлена таблица, предназначенная для таксации надземной фитомассы как чистых, так и смешанных сомкнутых елово-пихтовых древостоев среднетаежной подзоны уральского региона в условиях фонового загрязнения.

Вывод об инвариантности биопродуктивности ельников и пихтарников входит в противоречие с полученным в главе 4 результатом о большей (на уровне значимости t_{05}) фитомассе равновеликих деревьев ели по сравнению с пихтой. В данном случае могла произойти частичная компенсация двух противоположных явлений, а именно более низкая фитомасса деревьев пихты оказалась частично скомпенсирована более высокой густотой пихтарников. Возможно, получает подтверждение принцип продуциционной инвариантности древостоев как способности растительных сообществ к достижению и поддержанию в течение длительного времени одинакового уровня биологической продуктивности (Уткин и др., 1988).

Структура фитомассы и первичной продукции елово-пихтовых насаждений и анализ ее связи с расстоянием от источника загрязнений. Поскольку выше было установлено, что степень удаления от СУМЗ не оказывает существенного влияния на массу и ЧПП основных фракций деревьев, предстоит выяснить, влияет ли использование унифицированных аллометрических уравнений (т.е. рассчитанных для всего градиента загрязнений) на закономерность изменения биопродуктивности насаждений по мере удаления от СУМЗ, или необходимо для каждой зоны применять локальные уравнения, рассчитанные по данным соответствующих зональных пробных площадей?

Для каждой из 5 зон удаления от СУМЗ раздельно для ели и пихты рассчитаны аллометрические уравнения зависимости фракционного состава фитомассы от диаметра ствола, а также - унифицированные уравнения, полученные расчетом по всей совокупности модельных деревьев. Уравнения приведены на рисунке 1а. Протабулированы по данным перечетов деревьев на 43 пробных площадях в градиенте загрязнений и получены запасы фитомассы на 1 га (рис.1а). Для аналитического описания зависимостей, полученных по локальным и обобщенным аллометрическим уравнениям фитомассы, принята структура регрессионной модели:

$$\ln(P_i) = a_0 + a_1(1/L) + a_2(T); \quad (12)$$

где P_i – фитомасса i -ой фракции (хвои, ветвей, стволов и всей надземной, соответственно Pf , Pbr , Pst и $Pabo$), т/га; T – тип уравнения, по которому рассчитан фракционный состав фитомассы на единице площади. Значение T принято равным 1 и 0 соответственно для локальных и обобщенных аллометрических уравнений. Регрессионный анализ показал, что различие между двумя названными линиями регрессии не достоверно ни для одной

фракции ($t_{\text{факт}} = 0,24 \div 0,42 < t_{05} = 2,0$). Аналогичный результат дало сопоставление двух трендов для ЧПП (рис. 16).

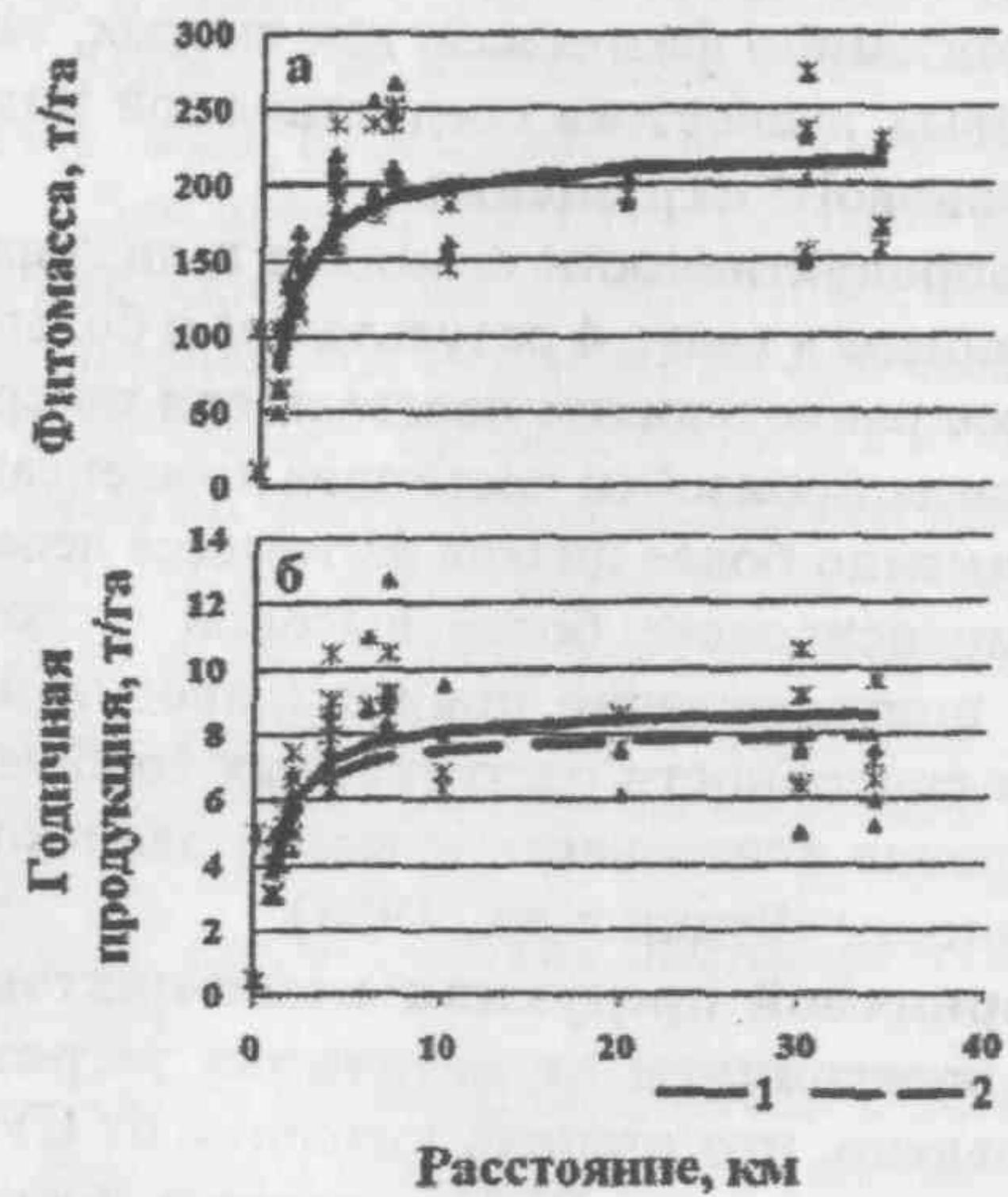


Рис. 1. Связь надземной фитомассы (а) и ЧПП (б) елово-пихтового древостоя с расстоянием от СУМЗ по уравнению (12) и ее соотношение с фактическими данными; 1- кривая, полученная на основе данных обобщенного уравнения; 2 – кривая, полученная на основе данных локальных уравнений.

Таким образом, в градиенте загрязнений фитомасса и ЧПП древостоев по мере удаления от СУМЗ резко увеличивается в диапазоне от 1 до 4 км, а при дальнейшем удалении стабилизируется.

Характер изменения продуктивности нижнего яруса (куда вошли подрост, подлесок и живой напочвенный покров) в градиенте загрязнений принципиально отличается от закономерности, установленной для основного яруса: после резкого увеличения продуктивности на первых километрах удаления происходит не стагнация, а постепенное ее снижение (рис. 2). Это обусловлено тем, что кроме изменения уровня загрязнений на продуктивность нижнего яруса влияет изменение морфоструктуры и продуктивности основного яруса в градиенте, который конкурентно подавляет нижний ярус в насаждении. Закономерность резкого возрастания показателя с последующим постепенным снижением удовлетворяет условию функции Г. Бакмана (Backman, 1938), которая была введена в биологию для обоснования понятия «органического времени».

Выявленные закономерности изменения биологической продуктивности елово-пихтовых древостоев в градиенте загрязнений от СУМЗ служат основой для корректного картографирования продуктивности лесов. Для экологов более важны оценки устойчивости экосистем, прогнозирования их реакции на поллютанты и нахождение предельно допустимых нагрузок на лесные экосистемы, а для этого продуктивность последних необходимо связывать не с расстоянием от загрязнителя, а с изменением уровня поллютантов в соответствующих градиентах с построением зависимостей «доза – эффект». Реакция экосистем на техногенную нагрузку имеет нелинейный характер – явление известно как гистерезисный, или триггер-

ный эффект (Алексеев, 1976; Ведюшкин, 1989; Воробейчик, Хантемирова, 1994).

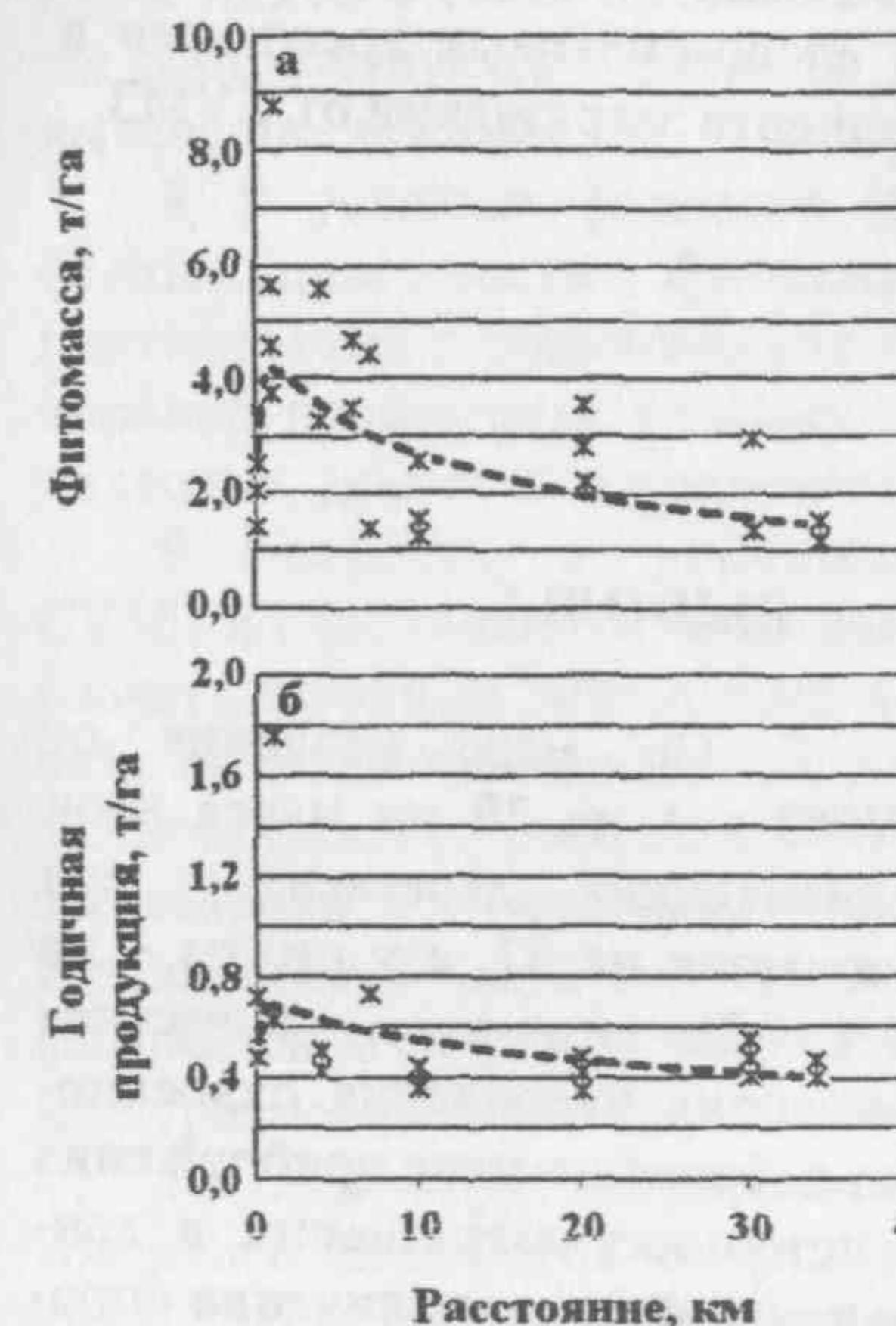


Рис. 2. Связь надземной фитомассы (а) и ЧПП (б) нижнего яруса елово-пихтового древостоя с расстоянием от СУМЗ, описываемая функцией Бакмана, и их соотношение с фактическими данными.

В простейшем случае такие зависимости описываются логистической кривой как нисходящей составляющей петли гистерезиса. Зависимость производственных показателей древостоев от индекса токсической нагрузки аппроксимирована логистическим уравнением, которое имеет вид:

$$P_i = \frac{(A - a_0)}{1 + \exp(b_0 + b_1 * \text{index2})} + a_0 \quad (13)$$

где, P_i – фитомасса i -ой фракции (эффект); A – максимальный уровень P_i ; a_0 – минимальный уровень P_i ; b_0 и b_1 – коэффициенты; index2 - индекс токсичности (доза) по трем наиболее "техногенным" металлам, т.е. тем металлам, у которых на 3-х самых "грязных" участках наибольшие превышения над минимальным уровнем, а на 3-х самых дальних от источника выбросов участках – наименьшие превышения; в данном случае index2 рассчитан по Cu, Pb и Fe . Индекс токсичности рассчитан по формуле:

$$\text{index2} = \frac{1}{k} * \sum \frac{X_{ij}}{X_{i \min}}, \quad (14)$$

где, k – количество элементов (в нашем случае три); X_{ij} – концентрация i -го элемента на j -ом участке; $X_{i \min}$ – минимальная концентрация i -го элемента по всем участкам. Графическая интерпретация логистических зависимостей на фоне поля распределения экспериментальных данных в исследуемом градиенте (рис.3) показывает, что переход экосистем из одного состояния в другое происходит в интервале индекса токсичности от 20 до 40.

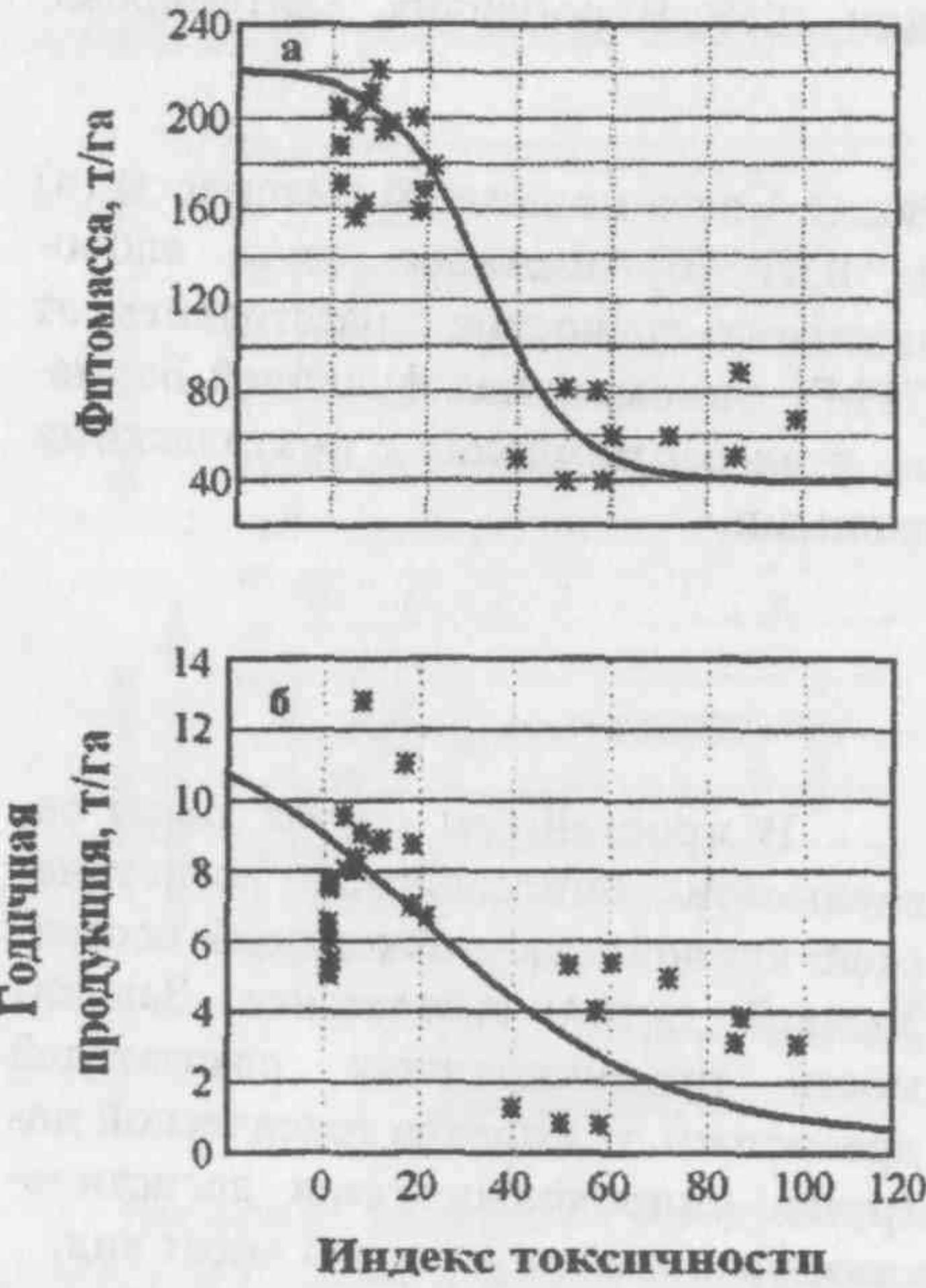


Рис. 3. Зависимость «доза – эффект» для надземной фитомассы (а) и годичной продукции (ЧПП) (б) елово-пихтовых древостоев в градиенте загрязнений от СУМЗ.

ВЫВОДЫ

1. По мере удаления от СУМЗ с 1 до 30 км масса хвои равновеликих деревьев у ели снижается на 32, а у пихты – на 18%. По-видимому, известная тенденция увеличения охвоенности побегов по мере приближения к источнику загрязнений в данном случае перекрывает другую известную тенденцию – увеличение «прозрачности» крон в том же направлении.

2. При равном удалении от СУМЗ равновеликие и равновозрастные деревья ели обладают существенно большей фитомассой хвои по сравнению с пихтой. Различия в охвоенности ели и пихты при прочих равных условиях могут служить в качестве их специфических видовых характеристик.

3. Если на массу хвои и ее продуктивность удаление от СУМЗ оказывает существенное влияние, то на всю надземную фитомассу равновеликих деревьев ели и пихты влияние загрязнений отсутствует.

4. Установлены видовые различия и по структуре фитомассы деревьев: у пихты по сравнению с равновеликими деревьями ели масса ствола, ветвей и хвои соответственно на 8, 31 и 42% меньше.

5. На годичный прирост (ЧПП) равновеликих и равновозрастных деревьев ели и пихты удаление от СУМЗ не оказывает достоверного влияния, но имеются существенные межвидовые различия.

6. Если масса хвои ели и пихты по мере приближения к источнику загрязнений возрастает, то по показателям относительной продуктивности хвои закономерность прямо противоположная, свидетельствующая о снижении продуктивности хвои в том же направлении. На продуктивность хвои ели один и тот же уровень загрязнений оказывает значительно более сильное воздействие по сравнению с хвоей пихты.

7. Установлены закономерности изменения плотности в свежем состоянии и содержания сухого вещества в различных фракциях фитомассы ели и пихты в связи с основными определяющими факторами и составлены соответствующие таблицы. Для практического использования выведены средние показатели.

8. В условиях фонового загрязнения нет достоверного различия по фракционному составу фитомассы между ельниками с примесью пихты и пихтарниками с примесью ели при условии равенства их основных таксационных показателей, поэтому для таксации фитомассы смешанных елово-пихтовых древостоев применим составленный для них общий норматив.

9. Поскольку не установлено существенного влияния удаления от СУМЗ на фитомассу и ЧПП равновеликих деревьев как ели, так и пихты, расчет названных показателей на 1 га елово-пихтовых древостоев в градиенте загрязнений выполнен в двух вариантах: на основе обобщенного аллометрического уравнения и локальных уравнений, полученных по зонам загрязнений. Установлено, что между продукционными показателями, рассчитанными по двум вариантам, нет достоверного различия, и при оценке фитомассы и ЧПП в градиенте загрязнений можно использовать обобщенные уравнения того и другого показателя.

10. Если на уровне деревьев в градиенте загрязнений не выявлено достоверного их влияния на продукционные показатели, то на уровне древостоев такое влияние существенно: фитомасса и ЧПП древостоев по мере удаления от СУМЗ резко увеличивается в диапазоне от 1 до 4 км, а при дальнейшем удалении стабилизируется. Это означает, что на изменение биологической продуктивности древостоев в градиенте загрязнений влияет не структура фитомассы и ЧПП составляющих их деревьев, а таксационная структура древостоев.

11. Характер изменения продуктивности нижнего яруса принципиально отличается от закономерности, установленной для основного яруса: после резкого увеличения продуктивности на первых километрах удаления происходит не стагнация, а постепенное ее снижение вследствие возрастающего подавления основным ярусом.

12. Полученные закономерности изменения биологической продуктивности елово-пихтовых древостоев в градиенте загрязнений по мере удаления от СУМЗ служат основой для корректного картографирования продуктивности лесов. Для экологов более важно знание предельно допустимых нагрузок на лесные экосистемы, а для этого продуктивность последних необходимо связывать не с расстоянием от загрязнителя, а с изменением уровня поллютантов в соответствующих градиентах.

13. Зависимость фитомассы и ЧПП древостоев в градиенте загрязнений от индекса токсичности описана логистической кривой как нисходящей ветвью петли гистерезиса. Установлено, что переход экосистем из од-

ного стабильного состояния (в фоновой зоне) в другое (в импактной зоне) происходит в интервале индекса токсичности от 20 до 40.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

По списку ВАК:

1. Усольцев В.А., Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В., **Бергман И.Е.**, Уразова А.Ф. Исследование биологической продуктивности насаждений по градиентам аэрозагрязнений: методический анализ и перспективы // Вестник МарГТУ (Йошкар-Ола). 2009. № 2(6). С.67-76.

2. Усольцев В.А., **Бергман И.Е.**, Уразова А.Ф., Борников А.В., Жанабаева А.С., Воробейчик Е.Л., Колтунова А.И.. Изменение продуктивности хвои деревьев в градиенте промышленных загрязнений на Среднем Урале // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2010. № 1(25). С. 40-43.

3. Накай Н.В., Уразова А.Ф., **Бергман И.Е.**, Сопига В.А. Фракционная структура фитомассы естественных пихтарников и ельников Среднего Урала // Естественные и технические науки. 2010. № 3 (47). С. 130-132.

Статьи в прочих журналах:

4. Усольцев В.А., Уразова А.Ф., **Бергман И.Е.**. Изменение калиметрических характеристик фитомассы деревьев ели и пихты вблизи Среднеуральского медеплавильного завода // Леса России и хоз-во в них. 2010. № 3 (37). С. 37-41.

Статьи в тематических сборниках:

5. Усольцев В.А., Воронов М.П., Часовских В.П., Накай Н.В., **Бергман И.Е.**, Уразова А.Ф., Борников А.В., Жанабаева А.С. Разработка системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами Уральского региона. Аннотационный отчет по гранту РФФИ «Урал» № 07-07-96010 // Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Результаты научных работ, полученные за 2008 г. Екатеринбург: Региональный научно-технический центр, 2009. С. 252-255.

6. Усольцев В.А., Накай Н.В., Уразова А.Ф., Борников А.В., Жанабаева А.С., **Бергман И.Е.**. Углерододепонирующая способность лесов: базы данных, методы оценки, география // Генетика, экология, и география дендропопуляций и ценозэкосистем. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 80-88.

7. Усольцев В.А., Воронов М.П., Часовских В.П., Накай Н.В., Семышев М.М., **Бергман И.Е.**, Уразова А.Ф., Борников А.В., Жанабаева А.С. Разработка системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами Уральского региона // Разработка системы пространственного анализа депонирования углерода лесными экосистемами Уральского региона // Аннотационный отчет по гранту РФФИ «Урал» №

07-07-96010. Региональный конкурс РФФИ «Урал», Свердловская область. Результаты научных работ, полученные за 2007-2009 гг. Екатеринбург: Региональный научно-технический центр, 2010. С. 233-237.

Статьи в материалах конференций:

8. Усольцев В.А., **Бергман И.Е.**, Уразова А.Ф., Воробейчик Е.Л. Изменение продуктивности листвы деревьев под действием загрязнений: новый метод оценки // Международное сотрудничество в лесном секторе: баланс образования, науки и производства. Матер. международной конфер. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. С. 64-68.

9. Усольцев В.А., Борников А.В., Жанабаева А.С., Уразова А.Ф., **Бергман И.Е.**. Фитомасса лесных экосистем Урала по градиентам промышленных загрязнений // Лесное хозяйство и зеленое строительство в Западной Сибири. Матер. V международной интернет-конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С. 185-188.

10. **Бергман И.Е.**, Уразова А.Ф., Усольцев В.А. Изменение плотности и содержания сухого вещества во фракциях надземной фитомассы ели и пихты в районе Среднеуральского медеплавильного завода // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Материалы VII всероссийской научно-технической конф. студентов и аспирантов. Екатеринбург: УГЛТУ, 2011. С. 12-13.

11. Уразова А.Ф., **Бергман И.Е.**, Усольцев В.А. Изменение фитомассы елово-пихтовых насаждений в градиенте промышленных загрязнений на Среднем Урале // Формирование регионального лесного кластера: социально-экономические и экологические проблемы и перспективы лесного комплекса: Материалы VIII международной конф. Екатеринбург: УГЛТУ, 2011. С. 239-241.

Отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах с заверенными печатью подписями по адресу: 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, ученому секретарю диссертационного совета Бачуриной А.В. Факс: (343) 254-62-25; e-mail: dissoviet.usfeu@mail.ru.

Подписано в печать 29.04.2011. Объем 1,0 п. л. Заказ № 196. Тираж 100. 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. Уральский государственный лесотехнический университет. Отдел оперативной полиграфии.