

Библиографический список

Колесников Б.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск, 1973. 175 с.

Рысин Л.П. и др. Мониторинг рекреационных лесов / Л.П. Рысин, Л.И. Савельева, Г.А. Полякова [и др.]; ОНТИ ПНЦ РАН. М., 2003. 167 с.

ОСТ 56-100-95. Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы. М., 1995. 8 с.

Побединский А.В. Изучение лесовосстановительных процессов. М.: Наука, 1966. 64 с.

Скрипальщикова Л.Н. и др. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска / Л.Н. Скрипальщикова, А.И. Таринцев, О.Н. Зубарева [и др.]. Новосибирск: Гео, 2009. 179 с.

Толкач О.В., Черноусова Н.Ф., Добротворская О.Е. Лесопарки как составляющая городских экосистем // Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития. Ишим, 2008. С. 151-152.



УДК 630*524.39+630*174.754

^{*}В.А. Усольцев, ^{**}Е.Л. Воробейчик,
^{*}А.В. Борников, ^{*}А.С. Жанабаева,
^{*}А.В. Бачурина, ^{*}Е.В. Кох, ^{*}А.Т. Мезенцев,
^{*}В.В. Крудышев, ^{*}И.С. Лазарев
(V.A. Usoltsev, E.L. Vorobeichik,
A.V. Bornikov, A.S. Zhanabayeva,
A.V. Bachurina, E.V. Koch, A.T. Mezentsev,
V.V. Krudyshev, I.S. Lazarev)

(^{*}Уральский государственный лесотехнический университет;
^{**}Институт экологии растений и животных УрО РАН)



Усольцев Владимир Андреевич родился в 1940 г., окончил в 1963 г. Уральский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор Уральского государственного лесотехнического университета, Заслуженный лесовод России. Имеет около 460 печатных работ по проблемам оценки и моделирования биологической продуктивности лесов.



Воробейчик Евгений Леонидович родился в 1965 г., окончил Днепропетровский государственный университет в 1987 г., доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе Института экологии растений и животных УрО РАН, заведующий лабораторией экотоксикологии популяций и сообществ. Имеет 85 печатных работ по проблемам влияния промышленного загрязнения на наземные экосистемы



Борников Александр Вячеславович родился в 1987 г., окончил лесохозяйственный факультет Оренбургского государственного агроуниверситета в 2009 г. Имеет 16 печатных работ по проблемам оценки и моделирования биологической продуктивности лесов.



Жанабаева Асия Сиркбаевна родилась в 1987 г., окончила лесохозяйственный факультет Оренбургского государственного агроуниверситета в 2009 г. Имеет 15 печатных работ по проблемам оценки и моделирования биологической продуктивности лесов.



Бачурина Анна Владимировна родилась в 1983 г., окончила лесохозяйственный факультет Уральского государственного лесотехнического университета в 2005 г. Имеет 14 печатных работ по проблемам оценки продуктивности лесов.



Кох Елена Викторовна родилась в 1974 г., окончила Уральский государственный лесотехнический университет в 1996 г., аспирант УГЛТУ. Имеет 8 публикаций, в том числе одну монографию.



Мезенцев Александр Трофимович родился в 1954 г., окончил в 1981 г. электротехнический факультет Уральского электромеханического института инженеров транспорта. Аспирант УГЛТУ, имеет 6 печатных работ по проблемам оценки продуктивности лесов.



Крудышев Владимир Валерьевич родился в 1982 г., в 2004 г. окончил Уральскую государственную сельскохозяйственную академию, а в 2009 г. – Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России. Аспирант УГЛТУ, имеет 5 печатных работ по проблемам оценки продуктивности лесов.



Лазарев Иван Сергеевич родился в 1987 г., окончил Уральский институт государственной пожарной службы МЧС России в 2009 г. Аспирант УГЛТУ, имеет 2 печатные работы по проблемам оценки продуктивности лесов.

РЕАКЦИЯ БИОПРОДУКТИВНОСТИ НАСАЖДЕНИЙ НА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОТ КАРАБАШСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА (REACTION OF BIOLOGICAL PRODUCTIVITY OF FORESTS ON THE KARABASH COPPER PLANT POLLUTIONS)

Проанализировано изменение фитомассы и чистой первичной продукции (ЧПП) естественных древостоев березы в зависимости от индекса токсичности в градиенте загрязнений от Карабашиского медеплавильного комбината.

Change of biomass and net primary production of natural birch forest stands in relation to toxic index in pollution gradient near Karabash copper plant is studied.

В настоящее время выполнено много исследований изменения лесных экосистем, испытывающих действие выбросов промышленных предприятий. Однако в большинстве случаев подобные работы носят сугубо прикладной характер и направлены на достижение чисто утилитарных целей (например, экспертная оценка состояния экосистем возле конкретного предприятия, картирование «экологической ситуации» в конкретном районе, поиск хороших» биоиндикаторов и т.д.). При этом фундаментальные проблемы, в частности анализ механизмов устойчивости экосистем, либо остаются вообще вне рамок рассмотрения, либо затрагиваются попутно, без организации специальных исследований. И хотя перспективность анализа зависимостей «доза-эффект» на экосистемном уровне, дающих прямой выход на проблему устойчивости, была декларирована еще в середине 1970-х, попытки их построения немногочисленны (Алексеев, Тарасов, 1990; Арманд и др., 1991; Салиев, 1988; Воробейчик и др., 1994; Воробей-

чик, Хантемирова, 1994; Воробейчик, 1995, 2004; Михайлова, Воробейчик, 1995).

Причины этого вытекают из прикладного характера большинства подобных исследований, что обусловлено недостаточным количеством экспериментальных точек для адекватного представления траектории реакции экосистемы, нарушением принципа синтопности регистрации параметров биоты и содержания токсикантов. В идеале экспериментальный полигон должен представлять территорию, в пределах которой крупный длительно действующий (порядка 50-80 лет) точечный источник эмиссии поллютантов «погружен» в фоновую (т.е. подверженную действию только региональных выпадений поллютантов) среду.

Обширные пространства фоновой среды Урала в сочетании с наличием крупных длительно действующих источников выбросов позволяют приблизиться к идеалу и предоставляют возможность заниматься экспериментальными работами с целыми экосистемами на уровне территориальных комплексов. Площадь лесов России, подверженных аэротехногенному воздействию, составляет около 1,5 млн га, из них значительная доля приходится на Урал, где одним из наиболее интенсивных источников токсичных выбросов в атмосферу является медеплавильное производство, в частности Карабашский медеплавильный завод (КМК) в Челябинской области.

Наше намерение сконцентрироваться на анализе данных, собранных вблизи точечных источников загрязнения, вызвано отнюдь не переоценкой значимости локальных эффектов. Нет сомнений в том, что относительно небольшое увеличение выпадений поллютантов на региональном и глобальном уровнях может привести к гораздо более серьезным последствиям, чем локальное воздействие даже очень крупных источников выбросов. Тем не менее локальное воздействие на биоту лучше подходит для исследования зависимостей «доза-эффект» и анализа устойчивости экосистем. В дальнейшем выявленные на локальном уровне закономерности могут быть использованы при прогнозе эффектов на региональном и глобальном уровнях.

В качестве стрессового фактора рассматривается многолетнее аэрогенное поступление токсичных веществ (в данном случае только микроэлементов) от точечного источника промышленных выбросов, формирующее крупную геохимическую аномалию (ее действие на биоту особенно контрастно выражено в условиях сильного естественного или искусственного подкисления среды). Степень проявления аномалии экспоненциально убывает с удалением от ее центра (источника эмиссии поллютантов), и соответственно на экосистемы накладывается градиент нагрузки. Величину нагрузки в конкретной точке пространства можно достаточно точно измерить по степени выраженности аномалии (например, по превышению фоновых концентраций элементов-маркеров аномалии в природных депонирующих средах).

Устойчивость экосистемы оценивается на основе анализа траектории ее реакции на действие стрессового фактора. Базируясь на принципе пространственно-временных аналогий, пространственный градиент нагрузки от центра аномалии до ее периферии в первом приближении можно интерпретировать как увеличение нагрузки во времени в конкретной точке пространства. «Остается лишь» зарегистрировать параметры состояния экосистем в пространственном градиенте так, чтобы полученная зависимость «доза-эффект» («нагрузка-параметр») была пригодна для корректной аппроксимации уравнениями регрессии и количественного анализа. Это может быть достигнуто при наличии большого количества экспериментальных точек, достаточно репрезентативно представляющих весь градиент нагрузки.

Анализ дозовых зависимостей заключается в нахождении координат критических точек. Под ними понимаются точки перегиба функции, описывающей траекторию реакции экосистемы. Особый интерес представляет верхняя критическая точка, соответствующая началу наиболее стремительного изменения параметра. Устойчивость выражается в единицах фактора (например, количество раз превышения фоновых концентраций поллютантов) и представляет собой отрезок от его фоновых значений до значений в верхней критической точке. В качестве показателей «эффекта» регистрируются параметры состояния экосистемы. Такой методологический подход был, в частности, реализован для оценки изменения запаса стволовой древесины в градиенте загрязнения вблизи Среднеуральского медеплавильного завода (рис. 1).

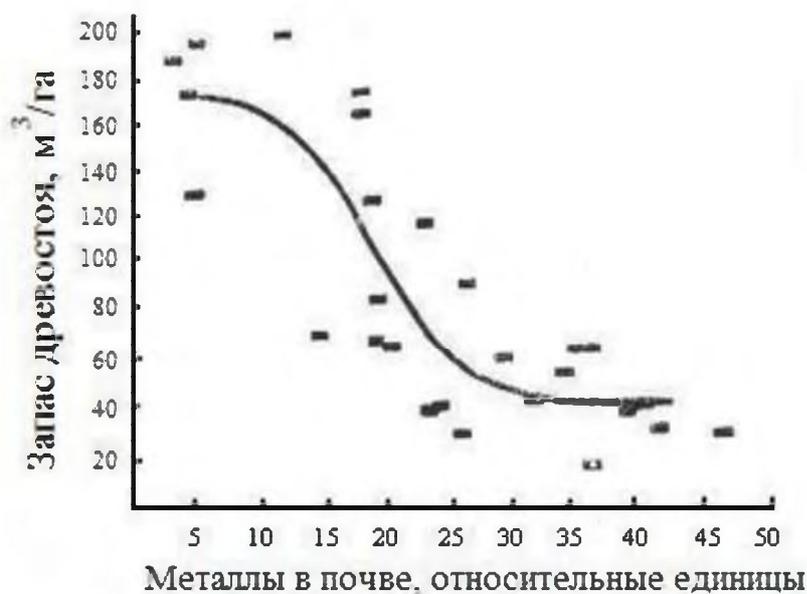


Рис. 1. Зависимости «доза – эффект» для запаса стволовой древесины пихтарников вблизи Среднеуральского медеплавильного завода (Воробейчик, Хантемирова, 1994)

Для большого количества параметров наземных экосистем было установлено, что реакция биоты на токсическую нагрузку имеет нелинейный характер (Воробейчик и др., 1994; Воробейчик, Хантемирова, 1994; Воробейчик, 2004): на постепенное повышение дозы загрязнений экосистемы реагируют не соответствующим постепенным изменением, а резким срывом в иное состояние. Это явление известно как гистерезисный (Ведюшкин, 1989), или триггерный эффект (Алексеев, 1976), в терминах теории катастроф представляемый как «складка» (Чиллингуорт, 1979).

Наше исследование выполнено в зоне токсичных выбросов КМК с целью определения пределов устойчивости естественных березовых насаждений на основе анализа зависимостей «доза-эффект». В качестве показателей «эффекта» регистрируются показатели биологической продуктивности насаждений – фитомасса и ее годичный прирост – в градиенте загрязнений от КМК. Методика полевых работ изложена ранее (Усольцев и др., 2011). Таксационная характеристика объектов и полученные на них значения фитомассы и ее годичного прироста, или чистой первичной продукции (ЧПП), приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Таксационная характеристика березовых древостоев пробных площадей в градиенте загрязнений от Карабашского медеплавильного комбината

Удаление от КМК, км	Породный состав	Возраст, лет	Класс бонитета	Число деревьев на 1 га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Площадь сечений, м ² /га	Запас, м ³ /га
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,5	10Б	69	II	832	15,1	19,0	14,9	102
3,5	10Б+Ол	69	II	1168	14,0	18,2	17,9	120
3,5	10Б+С	70	I	768	18,5	21,2	20,7	152
3,8	10Б+С	50	IV	1072	15,3	14,2	19,4	151
3,8	10Б+С	69	II	960	14,3	18,4	24,9	104
3,8	10Б	70	II	752	17,3	20,4	17,7	128
3,8	10Б	70	II	736	19,7	21,9	22,5	170
4,8	9Б1С	45	III	1178	14,1	13,7	17,6	134
8,5	10Б	40	III	1239	14,9	15	21,76	168
9,1	10Б+С	45	III	1217	15,1	15,1	21,55	166
9,2	6Б4Ос	71	I	832	18,7	21,9	22,9	153
9,1	10Б	63	I	1152	16,0	20,2	23,2	142
9,2	10Б+Ос	69	I	960	18,0	21,4	34,1	223
10,6	9Б1Ос	66	I	1536	16,8	21,6	34,0	214
10,6	7Б2Ос1С	78	I	768	21,5	25,3	27,8	201
10,6	8Б2С	62	I	1802	15,7	20,7	43,2	211
12,3	9Б1Ос	72	I	960	21,0	23,3	33,5	359
12,3	9Б1Ос	57	I	1408	15,0	19,5	24,8	233
12,3	10Б	63	I	1264	17,1	21,1	29,2	290

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13,1	10Б+С	50	II	740	21,5	19,5	26,6	233
17,5	7Б2С1Ос	50	III	796	21	17,8	25,57	225
18,5	10Б+С	69	I	912	22,0	24,9	34,8	389
18,5	10Б	71	I	720	23,2	25,6	30,5	350
18,5	10Б+Ос	72	I	848	23,5	25,8	36,7	424
25,8	10Б+Ос	72	I	800	21,6	26,2	29,3	402
25,7	10Б+Ос	68	I	1168	19,0	23,6	33,1	407
25,8	10Б	74	I	752	22,8	27,3	30,7	440
28,7	9Б1С	71	I	912	20,9	25,5	31,3	418
28,7	9Б1Лц+С	72	I	960	21,5	26,1	34,8	475
28,7	8Б2Ос+С	68	I	832	21,2	23,8	24,0	395
31,0	10Б+Лп	40	III	856	17,9	16	22,18	187
31,7	10Б+С	72	I	912	21,1	25,6	31,9	428
31,7	10Б+С	72	I	992	21,3	25,8	35,2	476
31,7	10Б+С	72	I	1136	21,0	25,6	39,4	529

Таблица 2

Показатели фитомассы и ЧПП березовых древостоев пробных площадей в градиенте загрязнений от КМК

Удаление, км	Фитомасса фракции, т/га				ЧПП фитомассы, т/га			
	Ствол	Ветви	Листья	Всего	Ствол	Ветви	Листья	Всего
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,5	71,8	6,65	1,32	79,7	0,81	0,224	1,32	2,34
3,5	91,2	9,21	1,73	102,1	1,05	0,310	1,73	3,09
3,5	108,1	11,5	2,10	121,7	1,27	0,387	2,10	3,76
3,8	91,7	8,41	1,72	101,9	1,02	0,280	1,66	2,96
3,8	114,8	11,0	2,14	128,0	1,17	0,332	1,92	3,43
3,8	86,4	8,06	1,59	96,0	0,97	0,271	1,59	2,83
3,8	99,9	9,77	1,87	111,5	1,14	0,329	1,87	3,34
4,8	78,9	6,68	2,13	87,7	0,934	0,314	1,85	3,09
8,5	103,0	9,50	2,22	114,8	1,60	0,685	2,18	4,46
9,1	112,0	11,9	2,23	126,1	1,52	0,582	2,21	4,31
9,2	119,7	13,0	2,34	135,1	1,45	0,641	2,34	4,43
9,1	135,5	13,7	2,57	151,8	1,85	0,657	2,57	5,08
9,2	144,7	13,9	2,69	161,3	2,10	0,652	2,69	5,45
10,6	188,7	21,9	3,73	214,3	2,13	0,969	3,73	6,82
10,6	172,7	21,1	3,37	197,2	1,74	0,871	3,37	5,99
10,6	191,4	21,8	3,80	216,9	2,28	0,991	3,80	7,07
12,3	168,2	17,4	3,23	188,8	2,15	0,841	3,23	6,22
12,3	111,3	10,3	2,03	123,6	1,78	0,475	2,03	4,29
12,3	144,4	14,0	2,70	161,1	2,09	0,659	2,70	5,45
13,1	147,0	14,3	1,88	163,2	2,31	0,566	1,85	4,72
17,5	145,4	18,9	3,7	168,0	1,53	0,484	2,91	4,91

1	2	3	4	5	6	7	8	9
18,5	212,9	30,0	4,28	247,2	2,83	1,16	4,28	8,27
18,5	188,5	26,8	3,79	219,1	2,49	1,01	3,79	7,29
18,5	224,7	32,1	4,53	261,3	2,93	1,20	4,53	8,65
25,8	193,0	17,4	4,01	214,4	2,90	0,698	4,01	7,61
25,7	209,8	18,0	4,16	232,0	3,21	0,719	4,16	8,09
25,8	207,0	18,3	4,22	229,6	3,07	0,720	4,22	8,01
28,7	210,2	17,5	4,05	231,7	2,97	0,652	4,05	7,68
28,7	227,4	19,0	4,41	250,9	3,23	0,713	4,41	8,36
28,7	135,9	11,7	2,70	150,3	1,97	0,453	2,70	5,13
31,0	133,1	13,1	2,88	149,1	2,05	0,537	2,88	5,45
31,7	215,9	18,5	4,28	238,6	3,40	0,764	4,28	8,44
31,7	236,2	20,5	4,74	261,4	3,45	0,799	4,74	8,99
31,7	259,9	23,3	5,37	288,6	3,89	0,928	5,37	10,19

Аппроксимация зависимостей «доза – эффект» (аналогично тому, как это реализуется в классической токсикологии) выполняется с помощью логистической кривой как нисходящей составляющей петли гистерезиса. Зависимость продукционных показателей древостоев от индекса токсической нагрузки аппроксимировали логистическим уравнением, которое имеет вид

$$P_i = \frac{(A - a_0)}{1 + \exp(b_0 + b_1 \cdot index)} + a_0, \quad (1)$$

где P_i – фитомасса или ЧПП i -й фракции (эффект);

A – максимальный уровень P_i ;

a_0 – минимальный уровень P_i ;

b_0 и b_1 – коэффициенты;

$index$ – индекс токсичности (косвенная оценка «дозы») по трем наиболее «техногенным» металлам (т.е. таким, у которых на трех самых «грязных» участках наибольшие превышения над минимальным уровнем; в данном случае $index$ рассчитан для концентраций подвижных форм Cu, Pb и Fe в лесной подстилке). Индекс токсичности определяется по формуле

$$index = \frac{1}{k} \sum \frac{X_{ij}}{X_{i \min}}, \quad (2)$$

где k – количество элементов (в нашем случае три);

X_{ij} – концентрация i -го элемента на j -м участке;

$X_{i \min}$ – минимальная концентрация i -го элемента по всем участкам.

Константы уравнения кривой найдены нелинейным оцениванием (метод Гаусса-Ньютона) в программе Statistica 6.

Характеристика уравнения (1) представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика уравнения (1)

Зависимая переменная	Независимые переменные		A	a_0	R^2
	b_0	$b_1 \cdot index$			
Масса листвы, т/га	-1,411	0,323	4,74	1,32	0,891
Надземная фитомасса, т/га	-1,620	0,0334	261,4	79,7	0,895
Годичная продукция (ЧПП), т/га	-1,8086	0,368	8,99	2,34	0,943

Графическая интерпретация логистических зависимостей в исследуемом градиенте представлена на рис. 2 и 3.

В дозовых зависимостях выделяются два состояния – фоновое (высокие значения продуктивности) и импактное (низкие значения). К сожалению, градиент нагрузки в нашем случае оказался «разорванным», так как отсутствуют точки в диапазоне значений индекса от 20 до 80 усл. единиц. Это накладывает существенные ограничения на возможность более подробного анализа дозовых зависимостей. Кроме того, можно отметить значительный разброс экспериментальных точек, который объясняется высокой естественной изменчивостью морфоструктуры древостоев. Тем не менее можно говорить о том, что переход березовых насаждений из одного состояния в другое начинается при значениях индекса токсичности около 20 единиц при его максимальных значениях около 140, т.е. уже при умеренных уровнях загрязнения.

Следует отметить, что прекращение выбросов КМК не означает, что березняки импактной зоны в ближайшее время восстановятся до фонового уровня. На основе модельных имитаций установлено, что вследствие накопленного потенциала токсичности почвы до полного восстановления потребуется значительный период времени, исчисляемый сотнями лет (Арманд и др., 1987). При этом восстановление пойдет по восходящей линии петли гистерезиса как проявления нелинейности в среде с памятью, которая пройдет не по первоначальной, а по более низкой траектории (Ведюшкин, 1989). Аналогичное явление в экотоне «лес – степь», представленном сопряженными эдафическими фонами, было отмечено А.А. Завалишиным (1936). Критикуя «циклическую» гипотезу о взаимоотношении леса и степи, А.А. Завалишин (1935) подчеркивал, что при наступлении леса на степь идет процесс деградации (оподзоливания) черноземов, но при обратном переходе – наступании степи на лес – процесс реградации почв идет по иной траектории, и чем сильнее оподзолена почва, тем меньше шансов

на ее полное восстановление или, иными словами, процесс реградации не может полностью стереть следы деградации.

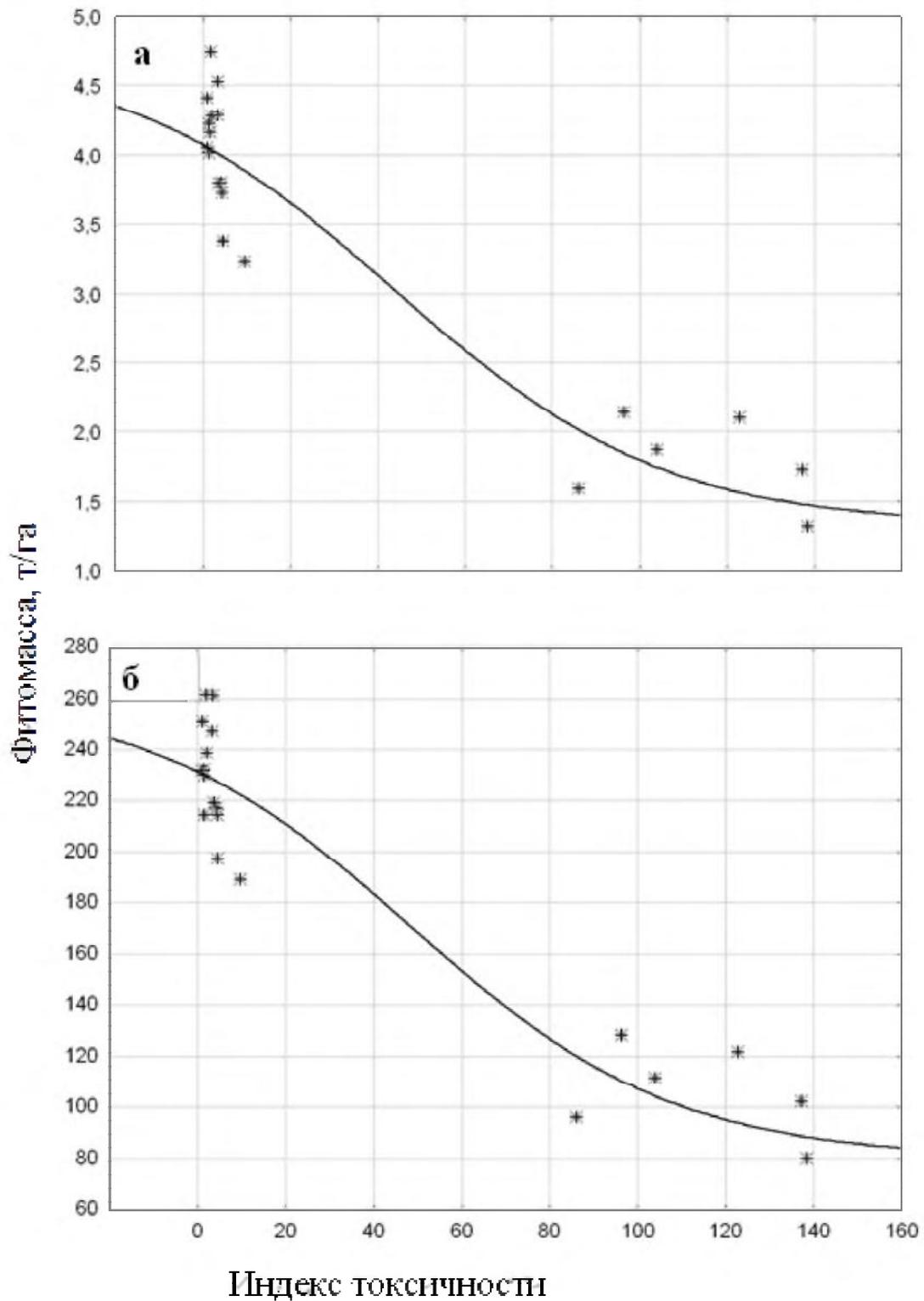


Рис. 2. Зависимости «доза – эффект» для фитомассы березовых древостоев в градиенте загрязнений от КМК: а – листва; б – надземная фитомасса

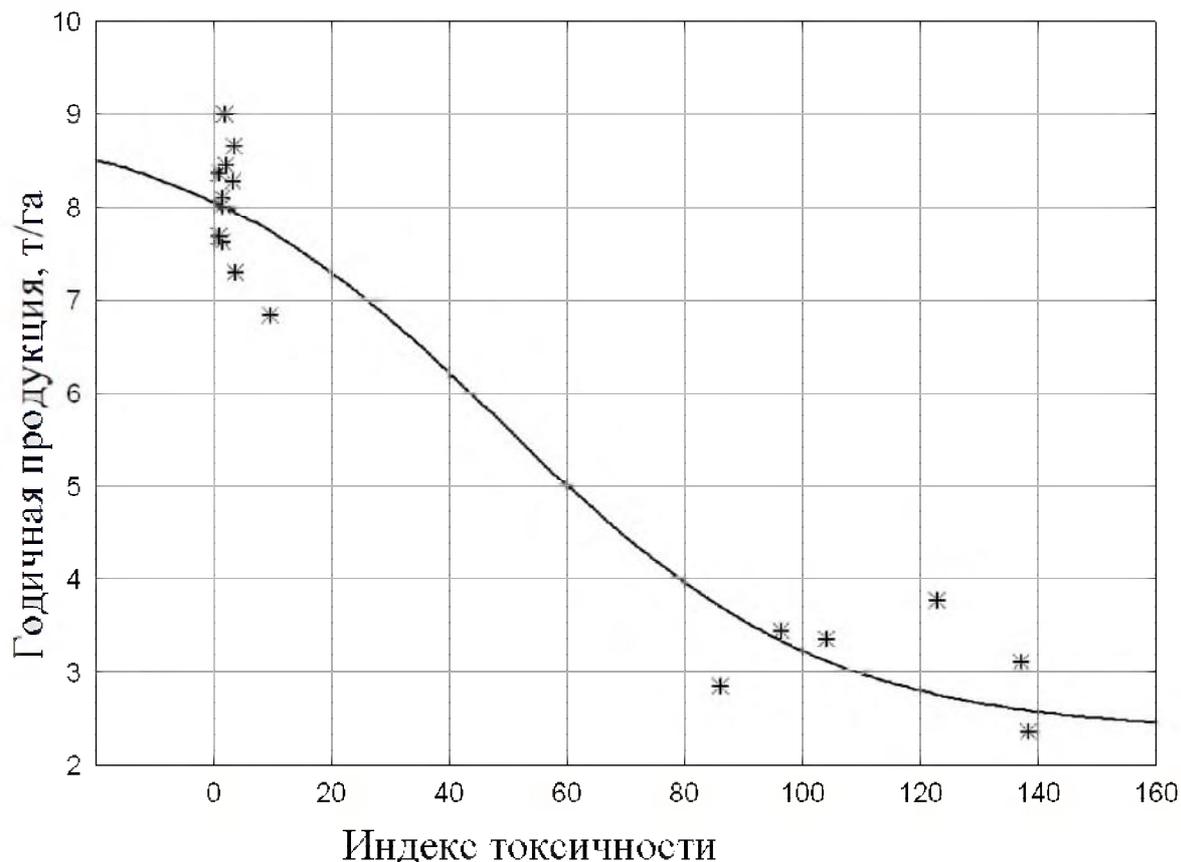


Рис. 3. Зависимость «доза – эффект» для надземной ЧПП березовых древостоев в градиенте загрязнений от КМК

Библиографический список

Алексеев В.В. Биогеноценозы – автогенераторы и триггеры // Журн. общей биологии. 1976. Т. XXXVII. № 5. С. 738-744.

Алексеев А.С., Тарасов Е.В. Количественный анализ связи состояния древостоев ели и загрязнения снегового покрова // Экология и защита леса. Л., 1990. С. 3-7.

Арманд А.Д., Ведюшкин М.А., Тарко А.М. Модель воздействия промышленных загрязнений на лесной биогеноценоз // Воздействие промышленных предприятий на окружающую среду. М., 1987. С. 291-296.

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

Ведюшкин М.А. Гистерезис в конкурентных системах // Факторы и механизмы устойчивости геосистем. М.: Ин-т геогр. АН СССР, 1989. С. 215-225.

Воробейчик Е.Л. Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения // Экология. 1995. № 4. С. 278-284.

Воробейчик Е.Л. Экологическое нормирование токсических нагрузок на наземные экосистемы: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2004. 48 с.

Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.

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

Завалишин А.А. Почвы Кузнецкой лесостепи // Тр. СОПС Академии наук. Сер. сибир., 1936. Т. 20. С. 165.

Михайлова И.Н., Воробейчик Е.Л. Эпифитные лишеносинузии в условиях химического загрязнения: зависимости доза-эффект // Экология. 1995. № 6. С.455-460.

Салиев А.В. Моделирование воздействия атмосферных фитотоксикантов на растения – пространственный аспект // Основы биологического контроля загрязнения окружающей среды. М., 1988. С. 137-160.

Усольцев В.А. и др. Продуктивность ассимиляционного аппарата деревьев вблизи медеплавильных заводов Урала / В.А. Усольцев, А.В. Борников, А.С. Жанабаева [и др.] // Изв. Оренбург. гос. аграрн. ун-т а. 2011. № 3(31). С. 67-70.

Чиллингуорт Д. Структурная устойчивость математических моделей. Значение методов теории катастроф // Математическое моделирование / под ред. Дж. Эндрюса и Р. Мак-Лоуна. М.: Мир, 1979. С. 249-276.

