

Сибирский экологический журнал, 1 (2007) 37–46

УДК 574.4: 504.054

Пространственно-временная динамика разнообразия травяно-кустарничкового яруса лесных фитоценозов в окрестностях Рефтинской гидроэлектростанции

М. Р. ТРУБИНА

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202*

АНОТАЦИЯ

Приведены данные по динамике параметров разнообразия травяно-кустарничкового яруса сосняков черничных в окрестностях Рефтинской гидроэлектростанции. Исследования показали, что даже при слабо выраженных негативных изменениях параметров зависимости "доза-эффект" имеют, как правило, нелинейный вид. При аппроксимации дозовых зависимостей выделяются два пороговых уровня воздействия и три области нагрузок, в которых наблюдается (или потенциально возможна) временная стабилизация параметров (каскадный эффект воздействия). Показано, что нелинейность зависимостей "доза-эффект" возникает в результате разной скорости изменения параметров в градиенте нагрузки и именно уровень загрязнения определяет продолжительность времени стабилизации параметров в том или ином состоянии. Самая меньшая продолжительность времени стабилизации характерна для области высоких нагрузок, поэтому зависимости "доза-эффект" в пространстве имеют нелинейный вид. Полученные данные свидетельствуют, что разногодичные флюктуации параметров разнообразия, возникающие при взаимодействии экзо- и эндогенных факторов, выступают в роли переключателя из одного количественного состояния в другое, в результате степень выраженности различий между зонами нагрузки и форма зависимостей «доза-эффект» могут меняться.

Влияние промышленных выбросов на параметры разнообразия травяно-кустарничкового яруса лесных фитоценозов рассмотрено в ряде работ [1–16]. В то же время неизученными остались вопросы, связанные с особенностями временной динамики параметров разнообразия сообществ в градиенте токсической нагрузки при относительно непродолжительном поступлении загрязняющих веществ в окружающую среду, когда признаки нарушения функционирования экосистем еще четко не выражены.

В ходе изучения изменений в градиенте токсической нагрузки параметров разных компонентов лесных экосистем, в том числе и отдельных параметров разнообразия травяно-кустарничкового яруса, показан нелинейный характер зависимостей "доза-эффект"

"при длительном загрязнении среды соединениями серы и полиметаллической пылью [3, 8, 17–19], а также соединениями фтора и серы [7, 9]. Зависимости "доза-эффект" имеют, как правило, два четко выраженных плато в области низких и высоких нагрузок и очень узкую область перехода между ними. Так как все исследования в цитируемых работах проведены в окрестностях длительно (более 50 лет) функционирующих предприятий с использованием принципа пространственно-временных аналогий и в окрестностях таких предприятий в области низких и высоких нагрузок значения параметров мало меняются по годам [7, 9], остается неясным, прослеживается ли нелинейный характер зависимостей "доза-эффект" при менее продолжительном поступлении в сре-

ду загрязняющих веществ и каким образом возникает выявленный в пространстве нелинейный эффект.

Известно, что при малых значениях возмущающего фактора система способна гасить внутренние флюктуации и внешние воздействия и находится в состоянии динамического равновесия вблизи стационарного состояния. Можно предположить, что нелинейность зависимостей "доза-эффект", наблюдавшаяся в окрестностях длительно функционирующих предприятий, возникает в результате очень низкой скорости изменения параметров в области невысоких нагрузок и более высокой скорости изменения в области высоких нагрузок. Для проверки высказанного предположения и для определения характера зависимостей "доза-эффект" при относительно непродолжительном поступлении в среду загрязняющих веществ на постоянных пробных площадях в окрестностях тепловой электростанции в течение ряда лет проводились оценка состояния травяно-кустарничкового яруса лесных фитоценозов и регистрация поступлений загрязняющих веществ.

Основные задачи данной работы – показать особенности временной динамики параметров видового разнообразия травяно-кустарничкового яруса лесных фитоценозов при разных уровнях загрязнения среды выбросами тепловой электростанции и выявить характер зависимостей "доза-эффект" для данных параметров.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились с 1995 по 2001 г. в окрестностях Рефтинской гидроэлектростанции, расположенной в подзоне южной тайги Зауральской провинции. Предприятие функционирует с 1970 г. Основные компоненты выбросов – сернистый ангидрид (до 40 %), твердые вещества (до 50 %) и оксид азота. Объем выбросов – около 500 тыс. т /год. Изучение динамики показателей видового разнообразия травяно-кустарничкового яруса лесных экосистем проводили в сосняках черничных (возраст 100–120 лет), приуроченных к расположенным участкам водораздела на высоте 180–205 м над ур. м. Почвы горно-лес-

ные серые, разной степени оподзоленности. В 1991 г. заложено 15 постоянных пробных площадей (ППП) размером 50 × 100 м на разном (от 1 до 20 км) удалении от источника выбросов в восточном, юго-восточном, северном и западном направлениях и в пределах каждой ППП проведена оценка состояния всех компонентов лесных фитоценозов. В качестве основного объекта долговременных наблюдений выбрали травяно-кустарничковый ярус. Каждые два года на каждой ППП в пределах площади 20 × 20 м выявляли видовой состав и оценивали встречаемость видов на 35–50 площадках размером 50 × 50 см. Для характеристики разнообразия сообществ использовали такие показатели, как индекс Шеннона–Уивера и видовую насыщенность на 0,25 и 400 м². Токсическая нагрузка на сообщество оценивалась по содержанию взвешенных веществ в суглинистом покрове. Для определения взвешенных веществ на каждой пробной площади в течение четырех лет в конце марта с помощью цилиндра отбирали по 5 образцов снега на всю глубину снежного покрова, точки отбора располагали случайно. При определении взвешенных веществ в суглинистой воде использована общепринятая методика [20]. Выбор в качестве токсической нагрузки на лесные экосистемы содержания взвешенных веществ обусловлен тем, что твердые примеси составляют почти 50 % всего объема выбросов. Кроме того, основными компонентами выбросов станции являются макроэлементы минерального питания растений, тяжелые металлы составляют очень незначительную часть выбросов [21], что в сочетании с непродолжительным функционированием данного предприятия не позволяет дать адекватную оценку уровней загрязнения по содержанию каких-либо элементов в депонирующих средах. Зависимости "доза-эффект" аппроксимировали линейным или логистическим уравнением, в последнем случае по формуле:

$$y = ((A - a_0)/(1 + \exp(\alpha + \beta \cdot x))) + a_0,$$

где y – значение параметра; x – доза нагрузки; A и a_0 – максимальный и минимальный уровни y ; α и β – коэффициенты уравнения. Координаты критических точек находили через коэффициенты уравнения [22]. Так

как поступление загрязняющих веществ очень сильно варьирует по годам [21], в качестве дозы нагрузки приняты средние за ряд лет значения относительного показателя – индекса нагрузки. Индекс нагрузки для каждой ППП в каждый отдельный год рассчитывался как превышение минимальной из отмеченных в течение всего периода наблюдений концентрации взвешенных веществ. Перед проведением статистического анализа весь интервал нагрузки разделили на три равные части – на области низких, средних и высоких значений индексов нагрузки. В области низких индексов нагрузки на 1 м² ППП ежегодно поступает в среднем до 12,9 г взвешенных веществ, в области средних и высоких – до 25,1 и 33,8 г соответственно. Для оценки влияния загрязнения на рассматриваемые показатели сообществ использовали одно- и двухфакторный дисперсионный анализ с повторяющимися измерениями (модель со смешанными эффектами: фактор загрязнения – случайный фактор, фактор времени – фиксированный), для оценки значимости различий между группами сообществ, находящихся в области низких, средних и высоких нагрузок, – различные непараметрические критерии. Перед проведением статистической обработки из анализа исключили данные по трем ППП, в пределах которых в процессе наблюдений выявили влияние других видов антропогенного воздействия (рекреационной нагрузки, рубок ухода).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Динамика средних значений показателей разнообразия сообществ в разных зонах нагрузки с 1995 по 2001 г. приведена в табл. 1. После 25-летнего функционирования станции (данные 1995 г.) все показатели разнообразия сообществ в зоне средних и высоких нагрузок имели несколько меньшие значения, чем в зоне низких нагрузок, значимые отличия выявлены только для зоны высоких нагрузок и только по одному показателю – индексу Шенна – Уивера. Проведение однофакторного дисперсионного анализа показало, что доля дисперсии, объясняемой влиянием загрязнения, по этому показателю са-

мая высокая и влияние фактора загрязнения близко к значимому (табл. 2).

С увеличением продолжительности воздействия видовая насыщенность на 400 м² в сообществах зоны низких нагрузок остается практически неизменной, хотя и несколько меняется по годам. В зоне средних нагрузок данный показатель снижается в 1997 г. и в дальнейшем остается неизменным. Самое существенное снижение данного показателя наблюдается в зоне высоких нагрузок. Значимого влияния фактора загрязнения на рассматриваемый показатель не выявлено даже после 31 года функционирования станции, но с течением времени четко прослеживаются тенденции увеличения коэффициентов корреляции показателя с индексом нагрузки и снижения вероятности того, что различия случайные (см. табл. 2). Видовая насыщенность на 0,25 м² в 1997 г. в зоне средних и высоких нагрузок снижается, в зоне низких нагрузок – остается на том же уровне. В дальнейшем во всех зонах наблюдается увеличение значений данного показателя и различия, которые наиболее четко проявились в 1997 и 1999 гг. (см. табл. 1 и 2), в некоторой степени нивелируются. Тем не менее во все годы наблюдений самые низкие значения показателя зафиксированы в зоне высоких нагрузок, самые высокие – в зоне низких нагрузок. Индекс Шенна – Уивера на рассматриваемом временном интервале во всех зонах нагрузки, особенно в средних и высоких, увеличивается. В результате значения индекса в отдельных сообществах зоны средних нагрузок становятся даже более высокими, чем в зоне низких. Отличия между зонами, выявленные на момент начала наблюдений, сохраняются (см. табл. 1), хотя доля дисперсии, объясняемой влиянием фактора загрязнения, несколько снижается (см. табл. 2).

Данные двухфакторного дисперсионного анализа подтвердили значимое влияние временного фактора на показатели видовой насыщенности на 0,25 м² и индекса Шенна – Уивера, а влияние времени на показатель видовой насыщенности на 400 м² довольно близко к значимому (табл. 3). Близкое к значимому влияние фактора загрязнения при существенном модифицирующем влиянии

Таблица 1

Временная динамика показателей разнообразия травяно-кустарникового яруса лесных фитоценозов в трех зонах нагрузки

Год наблюдений	Параметр	Зоны нагрузки		
		слабой $N = 4$ (3)	средней $N = 5$	высокой $N = 4$
<i>Видовая насыщенность на 400 м²</i>				
1995	$X \pm s$	49,8 ± 4,1	47,8 ± 2,9	46,8 ± 2,2
	Min-max	41–60	37–55	41–51
1997	$X \pm s$	47,3 ± 3,1	44,2 ± 3,3	42,5 ± 4,6
	Min-max	41–55	37–55	29–49
1999	$X \pm s$	49,7 ± 4,7	44,2 ± 4,0	45,0 ± 2,3
	Min-max	44–59	39–60	39–50
2001	$X \pm s$	48,0 ± 1,5	44,0 ± 2,0	40,3 ± 4,2
	Min-max	46–51	40–51	35–47
<i>Видовая насыщенность на 0,25 м²</i>				
1995	$X \pm s$	11,6 ± 0,9	10,1 ± 0,4	9,5 ± 0,9
	Min-max	9,5–13,7	9,6–11,5	7,7–11,5
1997	$X \pm s$	11,0 ± 0,7	8,4 ± 0,6*	7,9 ± 1,2
	Min-max	9,7–12,9	7,0–10,1	5,3–10,1
1999	$X \pm s$	12,6 ± 0,6	11,4 ± 0,9	10,3 ± 0,6*
	Min-max	11,9–13,7	8,8–14,3	9,2–11,8
2001	$X \pm s$	12,4 ± 0,6	11,2 ± 0,9	10,8 ± 0,9
	Min-max	11,6–13,6	8,1–12,8	8,2–12,4
<i>Индекс Шеннона–Уивера</i>				
1995	$X \pm s$	4,63 ± 0,09	4,37 ± 0,07	4,23 ± 0,13*
	Min-max	4,50–4,90	4,21–4,55	3,84–4,40
1997	$X \pm s$	4,66 ± 0,10	4,57 ± 0,12	4,46 ± 0,19
	Min-max	4,40–4,90	4,22–4,91	3,91–4,73
1999	$X \pm s$	4,73 ± 0,07	4,62 ± 0,11	4,41 ± 0,13*
	Min-max	4,70–4,90	4,30–4,85	4,02–4,59
2001	$X \pm s$	4,70 ± 0,00	4,68 ± 0,09	4,48 ± 0,13*
	Min-max	4,70–4,70	4,40–4,90	4,10–4,60

Примечание. N – количество пробных площадей в пределах зоны; X – среднее арифметическое для зоны; s – ошибка среднего; Min–max – минимальное и максимальное значения в пределах зоны. * – значения отличаются от значений в зоне низкой нагрузки по U -критерию Манн–Уитни при $P < 0,05$.

временного фактора выявляется только по показателю видовой насыщенности на 0,25 м².

Данные табл. 1 свидетельствуют также, что за весь период наблюдений средние значения рассматриваемых показателей сообществ в разных зонах нагрузки изменились в разной степени. В меньшей степени изменения всех показателей разнообразия изменились в сообществах, находящихся в зоне низких нагрузок. На рис. 1, а приведены линии и уравнения регрессии, характеризующие

изменение показателя видовой насыщенности на 400 м² за рассматриваемый промежуток времени в сообществах из разных зон нагрузки. Самые низкие значения углового коэффициента в уравнениях регрессии характерны для совокупности сообществ из зоны низких нагрузок, самые высокие – для сообществ из зоны высоких нагрузок. Для двух других показателей разнообразия, значения которых в рассматриваемом временном интервале увеличиваются, более высокие зна-

Таблица 2

Временная динамика характеристик зависимостей «доза-эффект» для показателей разнообразия травяно-кустарничкового яруса лесных фитоценозов

Год	Доля дисперсии, %			Результат дисперсионного анализа ($df_{2,10}$)		Абсциссы критических точек, усл. ед.		
	D_1	D_2	D_3	F	P	верхней	средней	нижней
<i>Видовая насыщенность на 400 м²</i>								
1995	2,89	19,76	0	0,22	0,809	7,01	7,03	7,06
1997	4,41	8,69	0	0,40	0,682	6,38	6,42	6,47
1999	8,41	33,32	0	0,53	0,607	2,85	2,90	2,95
2001	29,16	35,79	12,09	1,54	0,266	5,13	5,91	6,69
<i>Видовая насыщенность на 0,25 м²</i>								
1995	12,96	48,95	21,99	2,21	0,160	3,03	3,04	3,05
1997	23,04	43,57	36,37	3,46	0,072	3,40	3,41	3,42
1999	25,00	57,84	41,01	3,53	0,080*	—	—	—
2001	20,25	35,61	2,44	1,10	0,374	6,01	6,18	6,35
<i>Индекс Шеннона-Уивера</i>								
1995	34,81	48,42	40,49	3,93	0,055*	5,28	6,09	6,88
1997	2,25	20,52	0	0,48	0,630	7,07	7,08	7,09
1999	26,01	46,35	17,57	1,83	0,215*	7,06	7,07	7,08
2001	18,49	39,60	13,37	1,63	0,250*	6,47	6,80	7,13

П р и м е ч а н и е. D_1 , D_2 – доля дисперсии, объясняемой линейным и логистическим уравнениями регрессии соответственно; D_3 – доля влияния загрязнения (квадрат корреляционного отношения). Результаты дисперсионного анализа: $df_{2,10}$ – число степеней свободы для фактора и ошибки; F – критерий Фишера; P – вероятность того, что различия между средними случайные. * – значения P , которые меньше 0,05 при анализе выборок с помощью H -критерия Краскела-Уолеса или критерия χ^2 .

чения углового коэффициента характерны для совокупности сообществ в зоне средних нагрузок, самые низкие – для зоны низких нагрузок (на рис. 1, б в качестве примера приведены данные для индекса Шеннона-Уивера). Угловые коэффициенты в уравнениях во всех случаях значимо не различаются, что, вероятно, связано с очень небольшим объемом выборки и с довольно высоким

разбросом значений показателей в каждой зоне нагрузки (см. табл. 1).

Зависимости “доза-эффект” для показателей разнообразия сообществ в разные годы приведены на рис. 2. Практически для всех зависимостей в рассматриваемом интервале нагрузок характерно наличие двух более или менее четко выраженных плато и области критического перехода. В большинстве слу-

Таблица 3

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями для параметров разнообразия в окрестностях Рефтинской ГРЭС, значения F-критерия Фишера (значения P)

Источник вариации (число степеней свободы)	Параметр		
	Видовая насыщенность на		Индекс Шеннона-Уивера
	400 м ²	0,25 м ²	
Загрязнение (2)	0,54 (0,600)	3,08 (0,096)	1,58 (0,257)
Время (3)	4,31 (0,061)	124,4 (0,0001)	7,79 (0,017)

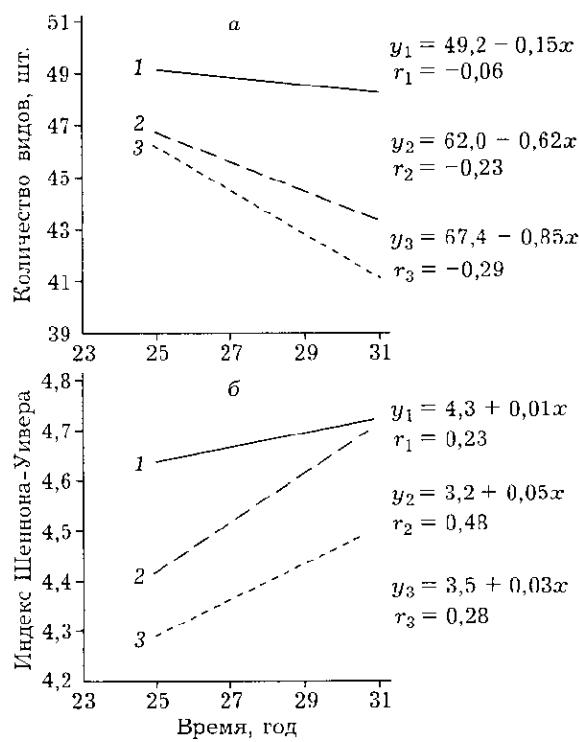


Рис. 1. Линии и уравнения регрессии, характеризующие изменение во времени видовой насыщенности на 400 м^2 (а) и индекса Шеннона-Уивера (б) в зоне низких (1), средних (2) и высоких (3) уровней загрязнения в окрестностях Рефтинской ГРЭС. По оси абсцисс – продолжительность воздействия выбросов станции.

чаев область перехода составляет очень незначительную часть (доли единицы или одна единица) от всего градиента нагрузки и доля дисперсии, объясняемой логистическим уравнением регрессии, во все годы наблюдений существенно выше, чем доля дисперсии, объясняемой линейным уравнением (см. табл. 2). Для показателей видовой насыщенности выделяются две области критических нагрузок – в области 3 (3,5) и 6 (7) условных единиц, для индекса Шеннона-Уивера – одна, в области 6 (7) условных единиц нагрузки (см. рис. 2 и табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

При относительно непродолжительном (20–30 лет) поступлении в среду выбросов тепловой электростанции в градиенте увеличения нагрузки наблюдается только небольшое снижение показателей разнообразия

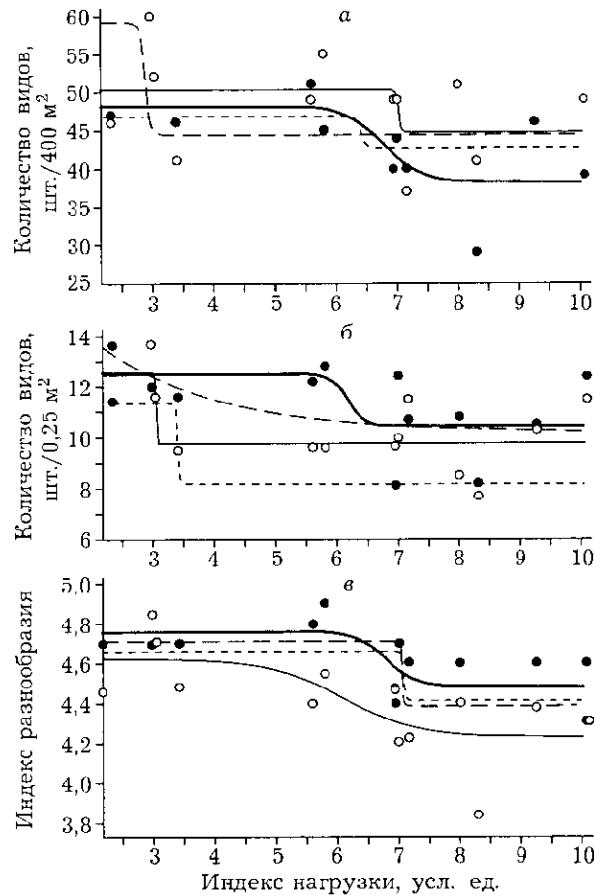


Рис. 2. Зависимости “доза-эффект” для показателей видовой насыщенности на 400 м^2 (а) и $0,25 \text{ м}^2$ (б), индекса Шеннона-Уивера (в) в 1995 г. (тонкая сплошная линия, белые кружки); 1997 г. – (пунктир, эмпирические точки опущены); 1999 г. – (штриховая линия, эмпирические точки опущены) и 2001 г. (толстая сплошная линия, черные кружки); 25-, 27-, 29- и 31-й год функционирования станции соответственно.

травяно-кустарникового яруса лесных фитоценозов и статистически значимые различия между сообществами из разных зон нагрузки могут отсутствовать (показатель видовой насыщенности на 400 м^2) или проявляться только в отдельные годы (другие показатели разнообразия, см. табл. 1). Доля влияния фактора загрязнения в отдельные годы может составлять более 50 % (см. табл. 2), и отсутствие статистически значимого влияния фактора загрязнения, скорее всего, связано с небольшим объемом выборки и с высоким разбросом значений показателей, особенно на момент начала наблюдений. Тем не менее данные по временной динамике показателя

видовой насыщенности на 400 м^2 свидетельствуют, что в зонах средних и высоких нагрузок в окрестностях станции продолжается элиминация видов из сообществ и выявленные негативные тенденции со временем усиливаются. Слабая выраженность негативных изменений в сообществах в радиусе 20 км от Рефтинской гидроэлектростанции, несмотря на большие ежегодные объемы выбросов, может быть обусловлена комплексом причин. Рефтинская гидроэлектростанция имеет очень высокие трубы (300 м), поэтому слабая выраженность импактной зоны может быть связана с рассеиванием загрязняющих веществ на значительные расстояния [23]. Как показали многолетние наблюдения за поступлением загрязняющих веществ в окрестностях станции, в отдельные годы разница между количеством поступающих загрязняющих веществ на разном удалении от станции действительно очень мала [21]. Отсутствие четко выраженных негативных изменений параметров разнообразия может быть связано и с компенсаторными реакциями в сообществах растений. В настоящее время существует много примеров изменений состава и структуры сообществ водных или наземных экосистем, не сопровождающихся изменением их отдельных интегральных параметров [3, 7, 9, 11, 18, 24–28]. Слабая выраженность негативных изменений может быть также связана с антагонистическим характером действия поступающих загрязняющих веществ: подщелачивающий эффект кальциево-магниевых примесей в определенной степени нейтрализуется поступлением больших объемов двуокиси серы. Это проявляется в очень незначительном изменении кислотности атмосферных осадков и депонирующих сред в окрестностях данного предприятия в сторону нейтральной реакции [21], тогда как в окрестностях других электростанций (Назаровская ГРЭС и др.) кислотность атмосферных осадков и депонирующих сред может меняться на несколько единиц в сторону щелочной реакции [1, 29], в результате негативные изменения в природных экосистемах вблизи этих электростанций более отчетливо выражены.

Интерес представляют данные об увеличении на рассматриваемом временном промежутке показателей видовой насыщенности на

$0,25 \text{ м}^2$ и индекса Шеннона–Уивера, которое наиболее отчетливо проявляется в зоне средних и высоких нагрузок. Видовая насыщенность на очень небольшой площади сообщества ($0,25 \text{ м}^2$) в значительной степени зависит от особенностей пространственного распределения видов внутри данного сообщества. При изучении характера пространственного распределения травяно-кустарничковых видов растений в пределах лесных фитоценозов в окрестностях длительно функционирующего (более 80 лет) Полевского криолитового завода показано, что при промежуточных уровнях нагрузки в сообществах наблюдается увеличение равномерности распределения видов [7] и при этих же нагрузках для сообществ характерны более высокие значения индексов разнообразия [7, 9]. Можно предположить, что наблюдаемое в окрестностях Рефтинской гидроэлектростанции увеличение видовой насыщенности на $0,25 \text{ м}^2$ на фоне снижения видовой насыщенности на площади 400 м^2 связано с увеличением равномерности распределения оставшихся видов в пределах сообщества. Возможно, что по этой же причине увеличиваются значения индекса Шеннона–Уивера, зависящие не только от общего количества видов в сообществе, но и от характера распределения видовых обилий. Увеличение индексов разнообразия в умеренно нарушенных сообществах из-за повышения фрагментарности распределения растительных микрогруппировок отмечено также и для еловых биогеоценозов при загрязнении окружающей среды тяжелыми металлами и двуокисью серы [5].

Даже при относительно непродолжительном поступлении загрязняющих веществ и довольно слабой выраженности изменений области минимальных и максимальных значений в зонах низких и высоких нагрузок отдельных показателей разнообразия (индекс Шеннона–Уивера и видовая насыщенность на $0,25 \text{ м}^2$) во все годы наблюдений практически не перекрываются (см. табл. 1). Для показателя видовой насыщенности на 400 м^2 области минимальных и максимальных значений на момент начала наблюдений перекрывались в значительной степени, но в 2001 г. также практически не перекрывались. В результате зависимости “доза–эффект” в градиенте нагрузки в большинстве случаев име-

ют нелинейный вид (см. рис. 2) и отличаются от дозовых зависимостей в окрестностях длительно функционирующих предприятий [2, 3, 7, 9] только «высотой ступени», т. е. степенью выраженности изменений значений параметров в зоне высоких нагрузок. Проведенные исследования показали, что «высота ступени» в дозовых зависимостях меняется во времени (см. рис. 2) и в связи с направлением изменений параметров в рассматриваемом временном интервале может увеличиваться (видовая насыщенность на 400 м^2) или уменьшаться (другие два показателя разнообразия). Во всех случаях изменение «высоты ступени» в рассматриваемом временном интервале связано с более выраженной динамикой показателей разнообразия в области средних и высоких нагрузок на фоне слабых изменений параметров сообществ в области низких нагрузок (см. табл. 1 и рис. 1). Хотя статистически значимые различия между зонами по скорости изменений не выявлены, что может быть связано и с небольшим объемом выборки в каждой зоне нагрузки, и с коротким периодом наблюдений (7 лет), проведенные исследования показывают, что даже небольшие различия в скорости изменений параметров в градиенте нагрузки приводят к увеличению или нивелированию различий между зонами нагрузки и к усилению (ослаблению) выраженности нелинейности эффекта в градиенте нагрузки (т.е. в пространстве).

Особого внимания заслуживает наличие двух пороговых уровней воздействия в рассматриваемом интервале нагрузок (один находится в области 3-кратного превышения минимальных поступлений взвешенных веществ, другой – в области 6–7-кратного превышения) и то, что пороговый уровень в области более низких нагрузок проявляется лишь в отдельные годы наблюдений. Существование нескольких критических точек перехода от одного количественного состояния к другому означает наличие нескольких точек (областей) стабилизации параметров. Сообщества, находящиеся в области нагрузок до 3–3,5 усл. ед., несмотря на разногодичные флуктуации, практически не изменили свои параметры в рассматриваемом временном интервале, и эта область нагрузки пред-

ставляет собой первую временную область стабилизации. Сообщества, находящиеся в зоне средних нагрузок, в отдельные годы могут демонстрировать значения, близкие к значениям показателей в сообществах из зоны высоких нагрузок (проявляется пороговый уровень в области 3–3,5 усл. ед.), но чаще всего демонстрируют значения, близкие к значениям показателей в сообществах из зоны низких нагрузок (проявляется пороговый уровень в области 6–7 усл. ед.). Область нагрузки от 3–3,5 до 6–7 усл. ед. представляет собой вторую потенциальную область временной стабилизации параметров (на рассматриваемом временном интервале она еще не проявилась в пространстве). Третья область временной стабилизации параметров, уже реально существующая в пространстве, лежит в области нагрузок выше 6–7 усл. ед.

На возможность существования нескольких точек стабилизации для сложноорганизованных систем указывалось уже давно [30], и в настоящее время для компонентов наземных экосистем существует ряд примеров многоступенчатых переходов в пространстве в градиенте изменения фактора [31], в том числе и при воздействии загрязнения среды тяжелыми металлами в сочетании с двуокисью серы [8, 32]. Важным моментом, способствующим пониманию механизмов трансформации системы при возмущающем воздействии, представляется не только существование в градиенте действия фактора нескольких критических точек – **каскадный эффект воздействия** [8], но и то, что на «переключение» из одного количественного состояния в другое (яркий пример – сообщества в зоне средних нагрузок) существенное влияние оказывают разногодичные флуктуации параметров разнообразия сообществ.

Существенное влияние разногодичных флуктуаций на степень выраженности различий между сообществами разных зон нагрузки и на характер изменения параметров в градиенте нагрузки выявлено нами ранее на примере загрязнения среды соединениями фтора и серы [7, 9]. В этих же работах показано, что в области нагрузок, предшествующих резкому изменению параметров сообществ, разногодичные флуктуации имеют наибольшую амплитуду. Влияние разногодич-

ных флюктуаций на форму зависимостей “доза–эффект” для отдельных функциональных параметров сообществ (биомассы) показано и при воздействии тяжелых металлов в сочетании с двуокисью серы [32]. Литературные данные и данные о временной динамике параметров разнообразия сообществ в градиенте нагрузки в окрестностях Рефтинской гидроэлектростанции позволяют предположить, что именно флюктуации, т.е. интегральный результат взаимодействия эндо- и экзогенных факторов, служат триггерами (переключателями) из одного состояния в другое в области порогового уровня воздействия.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют, что даже при слабо выраженных негативных изменениях параметров разнообразия травяно-кустарничкового яруса сосняков ягодниковых при воздействии выбросов Рефтинской гидроэлектростанции зависимости “доза–эффект” имеют, как правило, нелинейный вид. При аппроксимации дозовых зависимостей выделяются два пороговых уровня воздействия и три области нагрузок, в которых наблюдается (или потенциально возможна) временная стабилизация параметров (**каскадный эффект воздействия**). Нелинейность зависимостей “доза–эффект” возникает в результате разной скорости изменения параметров в градиенте нагрузки, и именно уровень загрязнения определяет продолжительность времени стабилизации параметров в том или ином состоянии. Самая низкая продолжительность времени стабилизации характерна для области высоких нагрузок, поэтому зависимости “доза–эффект” в пространстве имеют нелинейный вид, что особенно четко проявляется в окрестностях длительно функционирующих предприятий (ярко выраженные импактная зона и зона индустриальной пустыни). Флюктуации параметров разнообразия, возникающие при взаимодействии эндо- и экзогенных факторов, выступают в роли переключателя из одного количественного состояния в другое, в результате степень выраженности различий между зонами нагрузки и форма зависимостей “доза–эффект” могут меняться.

Работа на завершающем этапе выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01-04-96418.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Г. Волкова, Н. Д. Давыдова, Техногенез и трансформация ландшафтов, Новосибирск, Наука, Сиб. отд-ние, 1987, 189.
2. Е. Л. Воробейчик, Е. В. Хантемирова, Экология, 1994, 3, 31–43.
3. Комплексная экологическая оценка техногенного воздействия на экосистемы южной тайги, под ред. А. М. Степанова, М., 1992, 246.
4. Н. В. Лукина, В. В. Никонов, Структура и функции наземных и водных экосистем Севера в условиях антропогенного воздействия, Апатиты, Кольский научный центр, 1990, 33–41.
5. Н. В. Лукина, В. В. Никонов, Состояние еловых биогеоценозов Севера в условиях техногенного загрязнения, Апатиты, Кольский научный центр, 1993, 133.
6. А. К. Махнев, М. Р. Трубина, С. А. Прямоносова, Естественная растительность промышленных и урбанизированных территорий Урала, Свердловск, УрО АН СССР, 1990, 3–40.
7. М. Р. Трубина, Реакция травянистой растительности на хроническое загрязнение кислыми газами, Дис. ... канд. биол. наук, Екатеринбург, 1996, 24.
8. М. Р. Трубина, Экологические проблемы горных территорий, Екатеринбург, Академкнига, 2002, 240–244.
9. М. Р. Трубина, А. К. Махнев, Экология, 1997, 2, 90–95.
10. Т. В. Черненькова, Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение, М., Наука, 2002, 191.
11. R. Bobbink, M. Hornung, J. G. M. Roelofs, *J. Ecology*, 1998, 86, 717–738.
12. B. Freedman, T. C. Hutchinson, *Can. J. Bot.*, 1980, 55: 19, 2123–2140.
13. S. N. Linzon, Sulfur in the Environment 2. Ecological Impacts, N.Y., 1978, 109–162.
14. J. R. McClenahan, *Can. J. For. Res.*, 1978, 8, 432–438.
15. G. P. Pandey, *Environ. Conservation*, 1981, 8, 131–137.
16. J. Sienkiewicz, *Sci. Total Environ.*, 1986, 55, 339–349.
17. А. Д. Арманд, В. В. Кайдакова, Г. В. Кушнарева, В. Г. Добродеев, Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1991, 1, 93–104.
18. Е. Л. Воробейчик, О. Ф. Садыков, М. Г. Фарафонов, Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень), Екатеринбург, Наука, 1994, 280.
19. А. М. Степанов, Экотоксикология и охрана природы, М., 1988, 28–108.
20. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 59.04. 186–89, М., 1991, 693.
21. М. Р. Трубина, А.К. Махнев, Биологическая рекультивация нарушенных земель, Екатеринбург, УрО РАН, 2003, 507–518.
22. Г. Н. Зайцев, Математическая статистика в экспериментальной ботанике, М., Наука, 1984, 424.
23. Загрязнение воздуха и жизнь растений, под ред. М. Трешоу, Л., Гидрометеоиздат, 1988, 535.

24. М. Р. Трубина, Техногенные воздействия на лесные сообщества и проблемы их восстановления и сохранения, Екатеринбург, Наука, 1992, 93–104.
25. У. Х. Смит, Лес и атмосфера. Взаимодействие между лесными экосистемами и примесями атмосферного воздуха, М., Прогресс, 1985, 429.
26. T. P. Crowe, R. C. Thompson, S. Bray, S. J. Hawkins, *J. Aquat. Ecos. Stress & Recov.*, 2000, 7, 273–297.
27. J. S. Gray, *Bio. J. Linn. Soc.*, 1989, 37, 19–32.
28. J. A. Lee, *J. Ecology*, 1998, 86, 1–12.
29. Лесные экосистемы и атмосферные загрязнения, под ред. В. А. Алексеева, Л., Наука, Ленингр. отд-ние, 1990, 197.
30. I. Noy-Meir, *J. Ecology*, 1975, 63, 459–481.
31. Экосистемы в критических состояниях, под ред. Ю. Г. Пузаченко, М., Наука, 1989, 155.
32. Е. Л. Воробейчик, Экологическое нормирование токсических нагрузок на наземные экосистемы, Дис ... д-ра биол. наук, Екатеринбург, 2003, 48.

Spatial-Temporal Dynamics of the Diversity of Grass Suffruticous Synfolium of Forest Phytocenoses Near the Reft Electric Power Station

M. R. TRUBINA

The data on the dynamics of diversity parameters for the grass suffruticous synfolium of the bilberry pine forest in the vicinity of the Reft electric power station are reported. Investigation showed that even with weakly expressed negative changes in parameters, as a rule, the dose-effect dependences are non-linear. When approximating the dose dependencies, one distinguished two threshold levels of action and three load regions in which one observes (or potentially may observe) temporal stabilization of parameters (the cascade effect of action). It is shown that the non-linearity of «dose-effect» dependences arises as a result of different rates of parameter change in the load gradient; it is the pollution level that will determine the duration of parameter stabilization period in one state or another. The shortest stabilization time is characteristics of the region of large load, so the «dose-effect» dependences have a non-linear appearance in the space. The data obtained provide evidence that the fluctuations of diversity parameters from one year to another arising under the interaction between exo- and endogenous factors act as a switcher from one quantitative state to another; as a result, the degree of expressiveness of the differences between load zones and the shape of dose-effect dependencies may change.