

ОБЩАЯ
БИОЛОГИЯ

УДК 630*182.2:502.3:504.5:546.3

**ДИНАМИКА ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕ СНИЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ: БЫСТРОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ
ИЛИ ПРОДОЛЖЕНИЕ ДЕГРАДАЦИИ?**

© 2014 г. М. Р. Трубина, Е. Л. Воробейчик, Е. В. Хантемирова,
И. Е. Бергман, С. Ю. Кайгородова

Представлено академиком В.Н. Большаковым 04.02.2014 г.

Поступило 04.04.2014 г.

DOI: 10.7868/S0869565214300252

Снижение атмосферных выбросов промышленных предприятий, происходящее в последние годы во многих странах, дает возможность анализировать процессы естественного восстановления экосистем, что важно как с теоретической (анализ механизмов устойчивости), так и практической (выбор стратегий природопользования) точек зрения. Однако изучение восстановительных процессов сопряжено с принципиальным ограничением — неполнотой информации о биоте до начала снижения выбросов. Для корректного сравнения ее состояние должно быть зафиксировано строго в одних и тех же точках пространства, поскольку в противном случае велик риск ошибочно принять пространственную вариативность параметров, особенно сильную на загрязненных территориях [1], за их изменение во времени. Хотя интерес к изучению естественного восстановления деградированных экосистем возрастает [2–7], в большинстве работ, за редким исключением [8], это требование не соблюдено.

Существуют две противоположные точки зрения относительно скорости демулационных сукцессий после снижения техногенной нагрузки. Одни авторы полагают, что экосистемы восстанавливаются быстро, другие — что биота “по инерции” продолжает оставаться в угнетенном состоянии еще длительное время даже после полного прекращения выбросов. Инерционная гипотеза впервые была сформулирована как следствие из экспериментов с имитационными моделями [9]. Эмпирических же данных для ее проверки очень мало и они противоречивы: в ряде случаев продемонстрировано отсутствие восстановительных трендов [8]; в других, напротив, отмечено относи-

тельно быстрое восстановление, в частности, радиального прироста деревьев [4] и обилия травяно-кустарничкового яруса (ТКЯ) [3, 10].

Цель данной работы — анализ динамики растительных сообществ после снижения уровня атмосферного загрязнения.

В 1989 г. мы начали изучение лесных экосистем, подверженных многолетним (с 1940 г.) выбросам Среднеуральского медеплавильного завода [11]. В импактной (1 и 2 км к западу от завода), буферной (4 и 7 км) и фоновой (30 км) зонах были заложены 25 постоянных пробных площадей 25 × 25 м (по 5 на удаление) в елово-пихтовых разновозрастных лесах с элементами неморального флористического комплекса, произрастающих на пологих склонах увалов. Почвы — дерново-подзолистые, среднемощные, тяжелосуглинистые. Средний возраст деревьев верхнего яруса на момент начала наблюдений в большинстве случаев составлял 60–80 лет. Высота и диаметр деревьев максимальны в фоновой зоне (18–20 м и 18–23 см соответственно), минимальны — в импактной (9–12 м и 9–14 см соответственно). Повторные регистрации состояния древостоя выполнили на тех же пробных площадях в 1998 и 2008 гг., ТКЯ — в 1999 и 2007 гг. Для оценки параметров древостоя использовали сплошной пересчет деревьев с измерением высоты и диаметра, надземной биомассы ТКЯ — укусы на 10–15 площадках 50 × 50 см с последующей разборкой по видам, видового богатства — геоботанические описания. Содержание подвижных форм (экстрагент — 5%-я HNO_3) тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) и pH в почве (верхний слой A_1) оценено в 1989 г. (один смешанный образец на пробную площадь), в 1999 и 2012 гг. (по 5 смешанных образцов).

Атмосферные выбросы завода в 1989 г. составляли 141 тыс. т, в 1999 г. — 66 тыс. т, в 2005 г. — 25 тыс. т, после 2010 г. — менее 5 тыс. т. Наиболее существенно снизились выбросы Cu (в 58 раз

Таблица 1. Динамика параметров лесных экосистем в разных зонах нагрузки (среднее $\pm$ ошибка, учетная единица – пробная площадь, $n = 5$)

Параметр	Год	Зона нагрузки (удаление от завода, км)				
		Фоновая (30)	Буферная (7)	Буферная (4)	Импактная (2)	Импактная (1)
Почва						
рН	1989	4.53 ± 0.12	4.33 ± 0.17	4.04 ± 0.08	4.29 ± 0.09	4.18 ± 0.13
	1999	4.42 ± 0.08	4.51 ± 0.19	4.01 ± 0.07	4.04 ± 0.04	3.87 ± 0.06
	2012	4.89 ± 0.06	5.03 ± 0.06	4.55 ± 0.03	4.63 ± 0.09	4.60 ± 0.12
Cu, мкг/г	1989	23.8 ± 2.2	169.0 ± 13.4	251.9 ± 29.9	883.3 ± 105.7	1567.8 ± 111.0
	1999	36.4 ± 3.8	339.4 ± 52.8	219.2 ± 23.8	520.6 ± 40.8	2038.2 ± 234.5
	2012	52.2 ± 21.4	424.1 ± 21.9	366.7 ± 114.3	1039.6 ± 146.9	1084.4 ± 131.7
Pb, мкг/г	1989	19.4 ± 1.3	46.9 ± 5.6	44.6 ± 9.1	128.0 ± 22.1	278.0 ± 33.4
	1999	30.1 ± 2.2	101.3 ± 16.6	47.9 ± 9.5	60.4 ± 6.4	288.4 ± 51.8
	2012	65.9 ± 23.5	215.0 ± 14.4	135.0 ± 45.3	317.1 ± 31.6	378.7 ± 46.4
Древесный ярус						
Z	1989	409.2 ± 53.9	418.1 ± 44.0	313.1 ± 26.4	149.3 ± 22.1	63.0 ± 9.2
	1998	253.1 ± 29.4	321.2 ± 19.6	228.5 ± 25.1	139.6 ± 24.5	38.2 ± 6.8
	2008	438.9 ± 61.5	526.0 ± 32.3	394.5 ± 23.5	301.2 ± 14.9	74.2 ± 57.2
N	1989	2048 ± 251	2086 ± 108	1318 ± 148	1450 ± 125	822 ± 126
	1998	858 ± 86	1226 ± 49	701 ± 86	1094 ± 206	365 ± 60
	2008	1104 ± 117	1155 ± 69	1184 ± 262	1997 ± 133	464 ± 257
D	1989	7.8 ± 4.2	7.0 ± 1.2	16.5 ± 3.2	25.2 ± 2.3	26.8 ± 4.7
	1998	7.4 ± 2.9	12.4 ± 0.7	18.7 ± 4.9	7.8 ± 2.7	34.4 ± 4.2
	2008	22.3 ± 1.2	18.7 ± 5.7	4.1 ± 1.9	—	80.4 ± 8.2
Травяно-кустарничковый ярус (ТКЯ)						
S ₁	1989	7.6 ± 1.2	3.9 ± 0.5	3.8 ± 0.4	0.6 ± 0.1	0.8 ± 0.1
	1999	11.4 ± 0.7	5.4 ± 0.4	4.9 ± 0.4	0.9 ± 0.3	1.7 ± 0.3
	2007	10.0 ± 0.3	4.9 ± 0.3	3.9 ± 0.2	0.9 ± 0.3	1.3 ± 0.2
S ₂ (S ₃)	1989	36.8 ± 2.4 (52)	32.2 ± 1.2 (42)	24.8 ± 1.8 (35)	9.2 ± 0.6 (18)	7.0 ± 1.4 (15)
	1999	53.2 ± 1.9 (72)	39.0 ± 1.8 (57)	31.4 ± 3.6 (56)	11.6 ± 1.6 (26)	6.4 ± 1.2 (15)
	2007	58.2 ± 0.9 (82)	44.0 ± 1.8 (71)	31.8 ± 3.2 (56)	14.0 ± 2.0 (30)	7.0 ± 0.6 (14)
М ТКЯ	1989	16.5 ± 3.0	7.3 ± 1.7	18.6 ± 4.8	6.7 ± 2.0	16.5 ± 7.8
	1999	30.2 ± 2.8	14.6 ± 0.3	14.3 ± 1.8	4.8 ± 2.2	15.7 ± 2.2
	2007	52.2 ± 6.9	17.9 ± 3.7	16.5 ± 1.9	2.9 ± 1.7	44.5 ± 21.1

Примечание. Здесь и в табл. 2: Z – запас древесины, м³/га; N – густота древостоя, шт./га; D – доля сухостоя по запасу, %; S₁ – количество видов на 0.25 м² (для каждой пробной площади – среднее по 10–15 значениям); S₂ – количество видов на 625 м²; S₃ – количество видов в целом для зоны нагрузки; M – биомасса, г/м². Прочерк – отсутствие данных.

в 2005 г. по сравнению с 1989 г.), HF (в 51 раза), As (в 35 раз), Zn (в 7.8 раза) и SO₂ (в 5.5 раз). Таким образом, мы располагаем информацией о состоянии растительности на момент высоких выбросов (1989 г.), начала их существенного снижения (1998–1999 гг.) и почти полного прекращения (2007–2008 гг.).

В период 1989–1999 гг. кислотность почвы на всех участках не изменилась, а с 1999 по 2012 г. – снизилась на 0.5–0.7 ед. рН, но в импактной и бу-

ферной зонах осталась более высокой, чем в фоновой (табл. 1, 2). Концентрации всех металлов (данные по Zn и Cd не приведены) увеличились как в период 1989–1999 гг., так и в 1999–2012 гг. (только в импактной (1 км) зоне во второй период несколько снизилось содержание Cu). Увеличение содержания металлов, помимо собственно атмосферного выпадения, скорее всего, обусловлено их постепенным вымыванием из подстилки. Дополнительным фактором закрепления металлов в поч-

Таблица 2. Результаты двухфакторных дисперсионных анализов (с повторными измерениями) различий между зонами нагрузки и периодами наблюдений. Приведен достигнутый уровень значимости для F-критерия

Параметр	Период наблюдений и источник изменчивости					
	I период			II период		
	Зона	Время	Зона × Время	Зона	Время	Зона × Время
pH	0.003	0.339	0.298	<0.001	≤0.001	0.375
Cu	≤0.001	0.004	0.033	≤0.001	0.131	0.008
Pb	≤0.001	0.028	0.059	<0.001	≤0.001	0.011
Z	≤0.001	0.001	0.774	<0.001	0.001	0.165
N	<0.001	≤0.001	0.419	<0.001	0.031	0.115
D	<0.001	0.252	0.579	0.022	0.177	0.011
S ₁	≤0.001	0.001	0.595	≤0.001	0.101	0.157
S ₂	≤0.001	0.002	0.062	≤0.001	0.018	0.823
М (ТКЯ)	0.059	0.033	0.249	<0.001	0.115	0.427
М (злаки и осоки)	0.069	<0.001	0.030	0.010	0.004	0.152
М (разнотравье)	<0.001	0.012	0.041	≤0.001	0.072	<0.001
М (папоротники)	<0.001	0.107	0.447	0.005	0.010	0.302
М (хвощи)	<0.001	0.123	0.829	<0.001	0.167	0.008

Периоды наблюдений: I – 1989–1999 гг. (почва и ТКЯ) или 1989–1998 гг. (древостой), II – 1999–2012 гг. (почва), 1999–2007 гг. (ТКЯ) или 1998–2008 гг. (древостой).

ве может быть снижение ее кислотности. Таким образом, сформировавшаяся к концу 1990-х гг. техногенная геохимическая аномалия за 20 лет не претерпела существенных изменений, а наоборот, стала еще более выраженной. Это хорошо согласуется с представлениями о крайне медленной разгрузке загрязненных ландшафтов даже при полном прекращении выбросов из-за низкой подвижности металлов [12].

В период 1989–1999 гг. густота древостоя и запас древесины уменьшились на 20–40%, причем синхронно на всех участках (см. табл. 1, 2), а доля сухостоя практически не изменилась. Это свидетельствует о наличии единого для всего района внешнего воздействия, никак не связанного с уменьшением загрязнения. Общим трендом для всех участков было увеличение видового разнообразия ТКЯ в микромасштабе (десятки сантиметров, S₁, табл. 1). На всех участках, за исключением наиболее близкого к заводу, наблюдалось увеличение разнообразия в мезомасштабе (десятки метров, S₂) и макромасштабе (сотни метров, S₃) в основном за счет видов нарушенных местообитаний (*Agrostis capillaris*, *Chrysosplenium alternifolium*, *Phegopteris connectilis* и др.). Биомасса ТКЯ существенно увеличилась только в 30 и 7 км от завода (за счет *Calamagrostis obtusata* и разнотравья), а на

остальных участках – снизилась. В 4, 2 и 1 км от завода изменилась ее структура: доля злаков увеличилась, хвоей – уменьшилась (рис. 1).

В период 1998–2008 гг. густота и запас древостоя увеличились, причем, как и ранее, синхронно на всех участках. Доля сухостоя также увеличилась во всех зонах, но не синхронно: наиболее существенно (до 80%) – в импактной. Последнее свидетельствует о прогрессирующем разрушении древесного яруса, что согласуется с данными других работ [6–8]. Видовое разнообразие ТКЯ в микромасштабе во всех зонах осталось неизменным; в мезомасштабе – увеличилось только в 30 и 7 км от завода, но не столь сильно, как в предыдущий период, а на остальных участках стабилизировалось. Изменения в видовом составе в фоновой и буферной (7 км) зонах, как и ранее, были связаны с появлением видов нарушенных местообитаний (*Galeopsis bifida*, *Tussilago farfara*, *Chamaenerion angustifolium* и др.) или луговых видов (*Coccycyanthe flosculi*, *Succisa pratensis* и др.). В импактной зоне, в отличие от других участков, видовое богатство и состав сообществ не изменились. Биомасса ТКЯ существенно увеличилась только в 30 и 1 км от завода: в фоновой зоне, в основном, за счет папоротников, в импактной – исключительно за счет

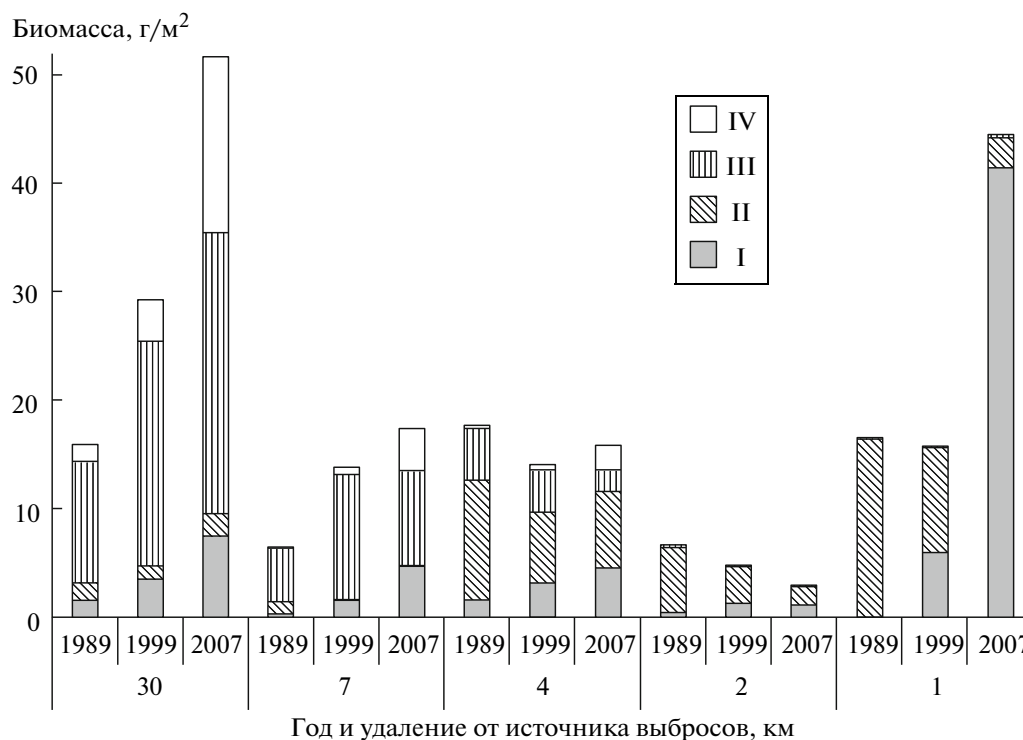


Рис. 1. Динамика структуры травяно-кустарничкового яруса на разном удалении от источника выбросов: I — злаки и осоки, II — хвощи, III — разнотравье, IV — папоротники.

Agrostis capillaris; биомасса хвощей в импактной зоне продолжала снижаться.

Изменения ТКЯ в первый период было бы заманчиво напрямую связать со снижением выбросов и рассматривать как свидетельство его быстрого восстановления. Однако анализ динамики в оба периода не позволяет сделать такого заключения. Скорее всего, динамика ТКЯ вторична по отношению к изменениям древостоя, которые, в свою очередь, вызваны естественными причинами. Известно, что в середине первого периода (6 июня 1995 г.) в Свердловской обл. был зарегистрирован ураган, повлекший массовый вывал деревьев. Район наших исследований задело лишь его краем, что вызвало только снижение густоты древостоя. “Взрывное” увеличение разнообразия и биомассы ТКЯ, характер изменений его состава и структуры в фоновой и буферной зонах (появление или увеличение обилия видов открытых и нарушенных местообитаний) полностью соответствуют хорошо документированному ходу демулационных процессов после ветровалов [13]. Из этого следуют два важных вывода: 1) естественные нарушения могут играть большую роль в динамике лесных сообществ в условиях загрязнения, чем собственно сокращение выбросов; 2) данные кратковременных наблюдений рискованно использовать как доказательство быстрого восстановления экосистем при снижении выбросов из-за возможного совпадения с дей-

ствием естественных факторов, а для корректного заключения о причинах динамики необходимы долговременные исследования.

Отсутствие каких-либо положительных изменений в состоянии растительности на территории с высоким уровнем загрязнения в течение всех 20 лет наблюдений свидетельствует о том, что, несмотря на снижение выбросов, токсическая нагрузка в импактной зоне остается очень высокой, превышающей критический уровень для большинства видов. Это может рассматриваться как свидетельство справедливости инерционной гипотезы, а одним из основных механизмов стабильности выступает медленное очищение почвы от металлов.

Работа выполнена при поддержке Программы развития научных школ (НШ-2840.2014.4), Правительства Свердловской обл. и РФФИ (13-04-96073).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубина М.Р., Воробейчик Е.Л. // ДАН. 2012. Т. 442. № 1. С. 139–141.
2. Калабин Г.В., Моисеенко Т.И. // ДАН. 2011. Т. 437. № 3. С. 398–403.
3. Черненко Т.В., Кабиров Р.Р., Басова Е.В. // Лесоведение. 2011. № 6. С. 49–66.
4. Черненко Т.В., Боцарев Ю.Н. // Журн. общ. биологии. 2013. Т. 74. № 4. С. 283–303.

5. *Gunn J., Keller W., Negusanti J., et al.* // *Water, Air, Soil Pollut.* 1995. V. 85. P. 1783–1788.
6. *Bates J.W., Bell J.N.B., Massara A.C.* // *Atmos. Environ.* 2001. V. 35. P. 2557–2568.
7. *Vavrova E., Cudlin O., Vavricek D., Cudlin P.* // *Plant Ecol.* 2009. V. 205. P. 305–321.
8. *Зверев В.Е.* // *Экология.* 2009. № 4. С. 271–277.
9. *Тарко А.М., Бакадыров А.В., Крючков В.В.* // *ДАН.* 1995. Т. 341. № 4. С. 571–573.
10. *Черненко Т.В., Кабиров Р.Р., Механикова Е.В. и др.* // *Лесоведение.* 2001. № 6. С. 31–37.
11. *Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В.* // *Экология.* 1994. № 3. С. 31–43.
12. *Barcan V.* // *Environ. Int.* 2002. V. 28. № 1/2. P. 63–68.
13. *Скворцова Е.Б., Уланова Н.Г., Басевич В.Ф.* *Экологическая роль ветровалов.* М.: Лес. пром-сть., 1983. 192 с.