

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 HNO₃) тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) и pH в почве (верхний слой A₁) 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						
pH	1989	4.53 \pm 0.12	4.33 \pm 0.17	4.04 \pm 0.08	4.29 \pm 0.09	4.18 \pm 0.13
	1999	4.42 \pm 0.08	4.51 \pm 0.19	4.01 \pm 0.07	4.04 \pm 0.04	3.87 \pm 0.06
	2012	4.89 \pm 0.06	5.03 \pm 0.06	4.55 \pm 0.03	4.63 \pm 0.09	4.60 \pm 0.12
Cu, мкг/г	1989	23.8 \pm 2.2	169.0 \pm 13.4	251.9 \pm 29.9	883.3 \pm 105.7	1567.8 \pm 111.0
	1999	36.4 \pm 3.8	339.4 \pm 52.8	219.2 \pm 23.8	520.6 \pm 40.8	2038.2 \pm 234.5
	2012	52.2 \pm 21.4	424.1 \pm 21.9	366.7 \pm 114.3	1039.6 \pm 146.9	1084.4 \pm 131.7
Pb, мкг/г	1989	19.4 \pm 1.3	46.9 \pm 5.6	44.6 \pm 9.1	128.0 \pm 22.1	278.0 \pm 33.4
	1999	30.1 \pm 2.2	101.3 \pm 16.6	47.9 \pm 9.5	60.4 \pm 6.4	288.4 \pm 51.8
	2012	65.9 \pm 23.5	215.0 \pm 14.4	135.0 \pm 45.3	317.1 \pm 31.6	378.7 \pm 46.4
Древесный ярус						
Z	1989	409.2 \pm 53.9	418.1 \pm 44.0	313.1 \pm 26.4	149.3 \pm 22.1	63.0 \pm 9.2
	1998	253.1 \pm 29.4	321.2 \pm 19.6	228.5 \pm 25.1	139.6 \pm 24.5	38.2 \pm 6.8
	2008	438.9 \pm 61.5	526.0 \pm 32.3	394.5 \pm 23.5	301.2 \pm 14.9	74.2 \pm 57.2
N	1989	2048 \pm 251	2086 \pm 108	1318 \pm 148	1450 \pm 125	822 \pm 126
	1998	858 \pm 86	1226 \pm 49	701 \pm 86	1094 \pm 206	365 \pm 60
	2008	1104 \pm 117	1155 \pm 69	1184 \pm 262	1997 \pm 133	464 \pm 257
D	1989	7.8 \pm 4.2	7.0 \pm 1.2	16.5 \pm 3.2	25.2 \pm 2.3	26.8 \pm 4.7
	1998	7.4 \pm 2.9	12.4 \pm 0.7	18.7 \pm 4.9	7.8 \pm 2.7	34.4 \pm 4.2
	2008	22.3 \pm 1.2	18.7 \pm 5.7	4.1 \pm 1.9	—	80.4 \pm 8.2
Травяно-кустарничковый ярус (ТКЯ)						
S ₁	1989	7.6 \pm 1.2	3.9 \pm 0.5	3.8 \pm 0.4	0.6 \pm 0.1	0.8 \pm 0.1
	1999	11.4 \pm 0.7	5.4 \pm 0.4	4.9 \pm 0.4	0.9 \pm 0.3	1.7 \pm 0.3
	2007	10.0 \pm 0.3	4.9 \pm 0.3	3.9 \pm 0.2	0.9 \pm 0.3	1.3 \pm 0.2
S ₂ (S ₃)	1989	36.8 \pm 2.4 (52)	32.2 \pm 1.2 (42)	24.8 \pm 1.8 (35)	9.2 \pm 0.6 (18)	7.0 \pm 1.4 (15)
	1999	53.2 \pm 1.9 (72)	39.0 \pm 1.8 (57)	31.4 \pm 3.6 (56)	11.6 \pm 1.6 (26)	6.4 \pm 1.2 (15)
	2007	58.2 \pm 0.9 (82)	44.0 \pm 1.8 (71)	31.8 \pm 3.2 (56)	14.0 \pm 2.0 (30)	7.0 \pm 0.6 (14)
M ТКЯ	1989	16.5 \pm 3.0	7.3 \pm 1.7	18.6 \pm 4.8	6.7 \pm 2.0	16.5 \pm 7.8
	1999	30.2 \pm 2.8	14.6 \pm 0.3	14.3 \pm 1.8	4.8 \pm 2.2	15.7 \pm 2.2
	2007	52.2 \pm 6.9	17.9 \pm 3.7	16.5 \pm 1.9	2.9 \pm 1.7	44.5 \pm 21.1

Примечание. Здесь и в табл. 2: Z – запас древесины, м³/га; N – густота древостоя, шт./га; D – доля сухостоя по числу стволов деревьев, %; 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. pH, 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 (*Coccyganthe 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

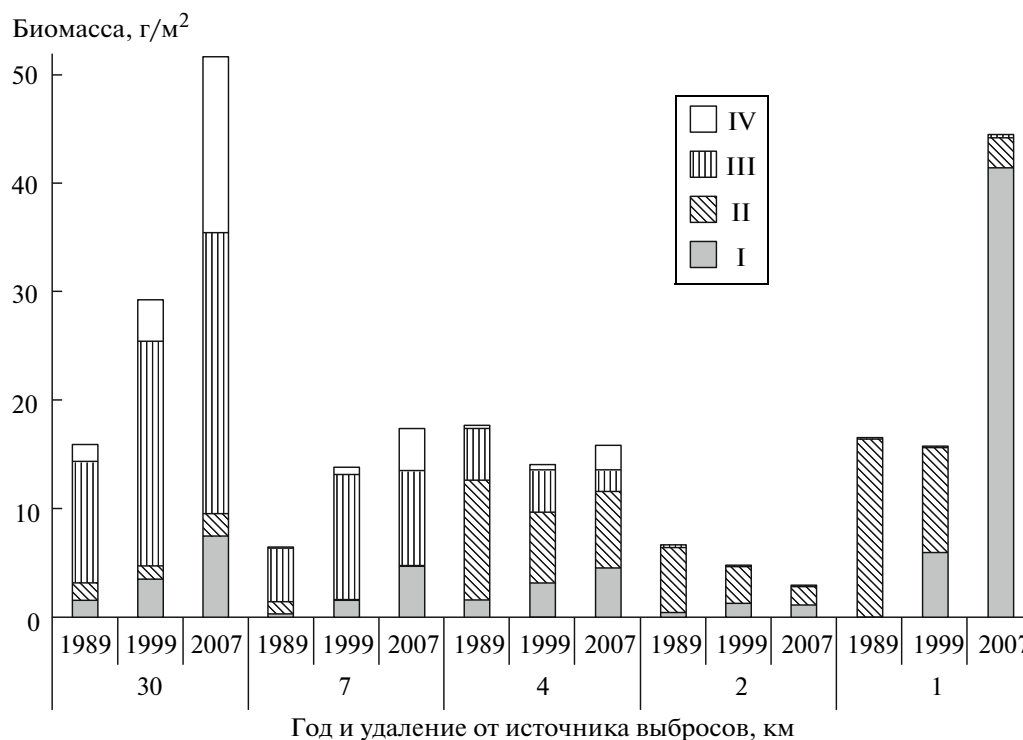


Рис. 1. Динамика структуры травяно-кустарничкового яруса на разном удалении от источника выбросов: I – злаки и осоки, II – хвощи, III – разнотравье, IV – папоротники.

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., Боцкарев 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. *Черненькова 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. *Varcan 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.