

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА В СТАРОПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРНЫХ РАЙОНАХ

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЕСТРУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ВЫСОТНОМ И ТОКСИЧЕСКОМ ГРАДИЕНТАХ: ПРИРОДНО- ТЕХНОГЕННЫЕ АНАЛОГИИ

Е.Л. Воробейчик

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург,
Россия*

Разложение мертвого органического вещества в наземных экосистемах — один из ключевых процессов, осуществляемый почвенной биотой. Именно это звено биологического круговорота обеспечивает возврат биогенов в почву и в значительной степени определяет продуктивность и устойчивость экосистем. Поэтому изучение закономерностей деструкционного процесса важно как в теоретическом, так и прикладном аспектах. К настоящему моменту о закономерностях разложения органики накоплено много информации (Swift et al., 1979; Driven ..., 1997): известны основные агенты деструкции, определены ее стадии и характерные скорости, выявлены особенности протекания в разных биомах и типах экосистем. Однако ряд моментов остается не исследованным, в частности, одним из таких почти белых пятен можно считать пространственную структуру деструкционного процесса.

Интерес к данному вопросу далеко не случаен. Если ранее пространственную вариабельность свойств природных объектов рассматривали исключительно как досадное обстоятельство, мешающее получению корректных статистических оценок искомых параметров, то в последнее время точка зрения существенно изменилась. Сейчас все больше исследователей склоняется к тому, что пространственная структура — это важнейшее, в определенном смысле имманентное, свойство экологических систем, требующее самого пристального изучения. Прогрессу в данной области способствует также и то обстоятельство, что в последние два десятилетия в экологии активно применяются методы геостатистики, первоначально зародившиеся в геологии (Goovaerts, 1997). В отличие от традиционных статистических процедур, они созданы для оперирования с регионализированными переменными, т.е. с такими, которые жестко связаны с пространственными координатами. Данная группа методов направлена на то, чтобы определить и далее смоделировать характерный размер пространственной неоднородности (т.е. величину области пространства, в пределах которой распределение переменной не является случайным, а зависит от окружения). Это позволяет существенно

Е.Л. Воробейчик

улучшить понимание закономерностей формирования и модификации пространственной структуры объекта исследования.

При анализе действия загрязнения почвы тяжелыми металлами на скорость разложения целлюлозы в южнотаежных лесах Среднего Урала нами ранее был обнаружен интересный феномен: на импактной территории, где имеют место экстремально высокие уровни загрязнения, при повсеместном и практически полном блокировании деструкции органики (Воробейчик и др., 1994), сохраняются пространственно локализованные «очаги» («горячие точки») очень высокой целлюлозолитической активности (Воробейчик, 2002). Скорость деструкции в этих «очагах» сравнима со скоростью на фоновой территории, где отсутствует локальное загрязнение. Обнаруженный феномен заставляет по иному взглянуть на индуцированное загрязнением торможение деструкции, которое некорректно рассматривать как «гладкий», пространственно однородный процесс, удовлетворительно описываемый изменением средних. Закономерно возникают вопросы, связанные с дальнейшим анализом данного феномена. Насколько он воспроизводим? За счет каких групп почвенных микроорганизмов формируются «очаги» высокой активности? Почему микроучастки с высокой активностью занимают небольшую долю пространства, а не всю территорию, как при отсутствии загрязнения? Приурочены ли «очаги» к каким-либо определенным элементам фитоценотической мозаики? Стабильны ли они во времени? Может ли быть объяснена пространственная вариабельность деструкции физико-химическими и микроклиматическими параметрами среды, в том числе содержанием поллютантов? Насколько специфичны изменения структуры в отношении именно химического загрязнения? Существуют ли аналогии с действием каких-либо других экстремальных экологических факторов? В настоящей работе мы попытались найти ответы на часть из поставленных вопросов. В частности, проведено сравнение изменений пространственной структуры в токсическом и высотном градиентах.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Токсический градиент (выбросы SO_2 и тяжелых металлов, в основном Cu, Pb, Cd, Zn) исследован в районе действия Среднеуральского медеплавильного завода, расположенного на окраине г. Ревды Свердловской области (Средний Урал, южная тайга). Пробные площади заложены в фоновой (30 км к западу от завода), буферной (4.5 км) и импактной (1 км) зонах токсической нагрузки в ельниках-пихтарниках разных растительных ассоциаций. Закономерности техногенной трансформации лесных экосистем района исследований описаны ранее (Воробейчик и др., 1994).

Высотный градиент исследован в окрестностях пос. Кытлым (юг Северного Урала, Кытлымский горный массив, средняя тайга). Пробные площади заложены в горно-таежном (620 м н.у.м., ельники-пихтарники зеленомошные), подгольцовом (780 м н.у.м., редколесье) и горно-тундровом (980 м н.у.м., мохово-лишайниковые тундры) высокогорных поясах на г. Третий Бугор.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Скорость деструкции оценена по убыли массы стандартных образцов чистой целлюлозы (лабораторная фильтровальная бумага) за фиксированный период экспозиции. Несмотря на простоту метода, он очень информативен, поскольку позволяет проводить прямые измерения скорости в конкретных точках пространства и в настоящее время в той или иной модификации (так называемые «litter bag test», «cotton-strip-assay», «bait-lamina-test») широко распространен в почвенной биологии (Methods ..., 1996). Образцы целлюлозы помещали в пакеты размером 5x10 см из капроновой сетки с ячейей 0.5 мм или 0.14 мм, которые закладывали внутрь подстилки (если подстилка была очень тонкой, то на границе подстилки и гумусово-аккумулятивного горизонта). Длительность экспозиции в разных вариантах экспериментов варьировала от полутора месяцев до года. Использовали несколько вариантов размещения точек опробования: линия с узлами через 10, 30 или 100 см; сетка с узлами через 30 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В токсическом градиенте наблюдаются существенные изменения пространственной структуры деструкционного процесса (рис. 1, табл. 1). На фоновой территории скорости деструкции в пределах рассматриваемой площадки 2.4x5.4 м распределены относительно равномерно, тогда как в буферной и особенно импактной зонах наблюдается резко выраженное пятнистое распределение: основная часть пространства имеет очень низкую скорость, на фоне которой сформированы «очаги» высокой скорости. Соответственно, регистрируются существенные различия по всем параметрам частотных распределений (в частности, коэффициент вариации на импактной территории увеличен более чем в 5 раз). С методической точки зрения важно, что площадное размещение точек опробования и использованное нами ранее линейное размещение (Воробейчик, 2002) приводят к аналогичным результатам.

Сходные изменения наблюдаются в высотном градиенте (рис. 2., табл. 2). Биотопы горно-тундрового пояса существенно отличаются по рассматриваемым характеристикам от биотопов горно-таежного и подгольцового поясов, хотя различия параметров частотных распределений менее выражены, чем в случае токсического градиента. В горной тундре основная часть пространства имеет низкую (почти нулевую) скорость деструкции, но хорошо выражены пики высокой скорости, равные по величине средним (но не максимальным, как в случае токсического градиента) значениям горно-таежного и подгольцового поясов.

Сопоставляя результаты экспериментов, выполненных в разное время, можно прийти к заключению о стойкой воспроизводимости обнаруженного феномена (табл. 3). Если в качестве условной границы высокой скорости деструкции принять 10%-ную процентиль частотного распределения в оптимальном биотопе (фоновая зона и горная тайга в токсическом и высотном градиентах соответственно), можно обнаружить, что доля образцов с высокой скоростью в пессимальном биотопе (импактная зона и горная тундра в токсическом и высотном градиентах соответственно) относительно константна (лежит в достаточно узком диапазоне — от 10 до 25%).

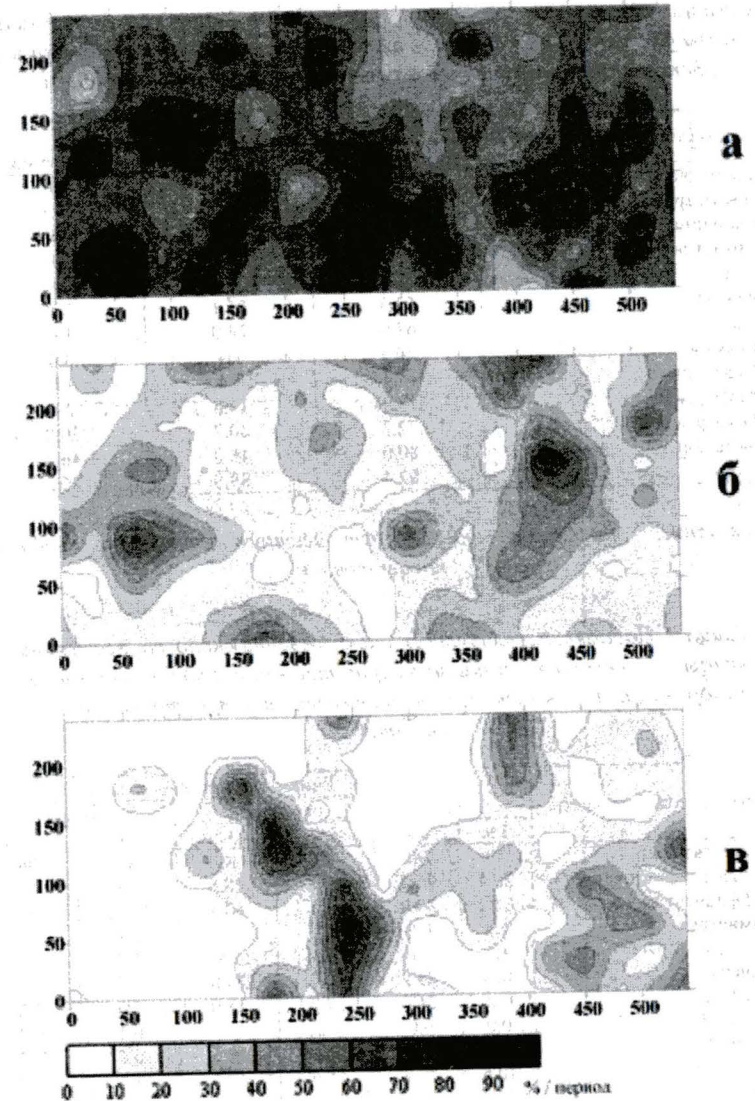


Рис. 1. Пространственное распределение скорости деструкции целлюлозы на площадке 2.4x5.4 м в фоновой (а), буферной (б) и импактной (в) зонах токсической нагрузки (по осям — расстояние в см).

Таблица 1. Параметры частотных распределений скорости деструкции целлюлозы (% / период экспозиции) в разных зонах токсической нагрузки (схема расположения точек опробования — сетка с узлами через 0.3 м)

Статистический параметр	Зона нагрузки		
	Фоновая	Буферная	Импактная
Количество проб	170	168	170
Среднее арифметическое	62.1	25.5	15.8
Коэффициент вариации, %	23.5	63.8	126.3
Асимметрия	-0.5	1.4	1.8
Экссесс	0.2	1.8	2.8
Медиана	63.5	21.1	7.4
Мода *	64.0	24.0	1.0
Минимум	20.9	1.4	0.0
10% дециль	42.6	9.4	1.0
25% квартиль	53.9	14.3	2.4
75% квартиль	72.7	30.7	20.0
90% дециль	80.0	48.0	46.8
Максимум	92.4	83.8	86.2

Примечание. * при расчете моды скорость деструкции округлена до единиц процентов.

Таблица 2. Параметры частотных распределений скорости деструкции целлюлозы (% / период экспозиции) в горно-таежном, подгальцовом и горно-тундровом поясах в метровом и сантиметровом пространственных масштабах

Статистический параметр	Биотоп и масштаб					
	тайга		редколесье		тундра	
	1 м	10 см	1 м	10 см	1 м	10 см
Количество проб	89	90	89	89	85	96
Среднее арифметическое	20.4	25.7	19.8	28.6	5.4	3.5
Коэффициент вариации, %	67.2	59.8	67.1	60.4	115.7	98.0
Асимметрия	1.2	0.9	2.2	1.6	2.4	1.3
Экссесс	1.4	1.6	8.0	2.9	7.3	1.6
Медиана	16.1	23.9	17.0	25.8	3.5	2.3
Мода*	16.0	24.0	17.0	28.0	1.0	1.0
Минимум	0.0	0.0	1.2	5.7	0.1	0.0
10% дециль	6.3	6.8	7.7	11.5	0.7	0.2
25% квартиль	10.6	15.9	11.6	17.6	1.4	0.9
75% квартиль	25.8	34.4	23.0	33.6	6.8	5.3
90% дециль	40.3	45.6	36.9	52.5	13.2	8.6
Максимум	63.3	80.6	88.8	88.8	36.2	15.3

Примечание. * при расчете моды скорость деструкции округлена до единиц процентов.

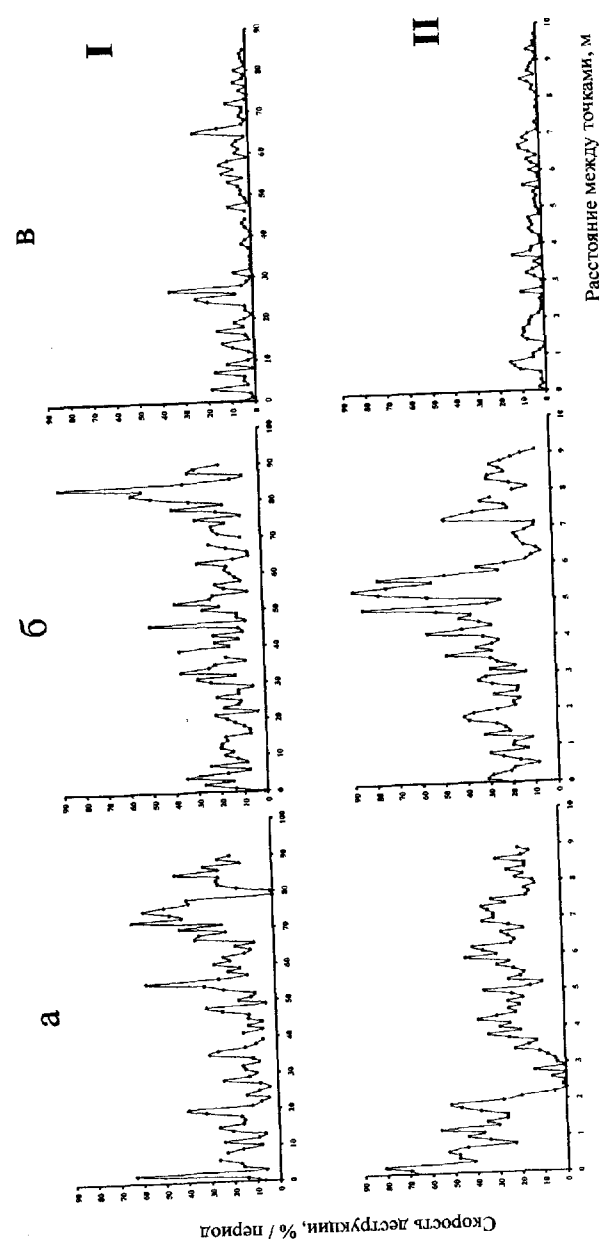


Рис. 2. Пространственное распределение скорости деструкции целлюлозы в метровом (I) и сантиметровом (II) масштабах в горно-таежном (а), подгальцовом (б) и горно-тундровом (в) поясах.

Таблица 3. Доля образцов с высокой скоростью деструкции целлюлозы на импактной территории (токсический градиент) и в горно-тундровом поясе (высотный градиент) при разных вариантах проведения экспериментов

Дата закладки	Пространственный масштаб, м	Длительность экспозиции, дней	Количество проб	Граница высокой скорости*, % / период	Доля образцов (%) с высокой скоростью
09.08.1989 г.	1.0	369	76	76.14	13.2
03.07.1999 г.	0.1	369	30	92.07	10.0
	1.0	328	60	76.14	15.0
	0.1	328	40	76.14	15.0
07.06.2000 г.	0.3		95		17.9
		106	95	22.98	25.3
		348	95	69.06	14.7
20.06.2001 г.	0.3 **	84	171	42.56	12.3
02.06.2001 г.	1.0	70	96	6.80	25.9
	0.1	70	86	6.30	19.8

Примечание. * в качестве границы высокой скорости деструкции принята 10% процентиль частотного распределения скорости на фоновой территории (токсический градиент) и в горно-таежном поясе (высотный градиент); ** схема размещения точек опробования – сетка, в остальных случаях – линия.

Геостатистический анализ базируется на построении вариограммы — зависимости полудисперсии $g(h)$ от лага h (расстояние между точками):

$$\chi(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} (x_i - x_{i+h})^2,$$

где $m(h)$ — количество сравниваемых пар при величине лага h , x_i — регистрируемый показатель. Далее вариограмма аппроксимируется какой-либо регрессионной моделью, параметры которой имеют содержательную интерпретацию. Чаще всего используют «сферическую модель» (Goovaerts, 1997):

$$\chi(h) = \begin{cases} \frac{1}{2} C \left[3 \frac{h}{a} - \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] + \gamma_0 & \text{для } h \leq a, \\ C + \gamma_0 & \text{для } h > a, \end{cases}$$

где C — «порог» (стационарный уровень полудисперсии), a — характерный размер (ранг) неоднородности (величина лага, при котором полудисперсия выходит на стационарный уровень), γ_0 — коэффициент «эффекта самородка» (пересечение полудисперсии с осью ординат при $h=0$). Для характеристики структурированности пространственного распределения параметра используют коэффициент структурной дисперсии $D = C / (C + \gamma_0)$; чем ближе он к 100%, тем более «закономерно» структурировано распределение; равенство структурной дисперсии нулю означает, что параметр распределен в пространстве абсолютно случайно.

Коэффициенты сферической модели найдены численным оцениванием (табл. 4); все они достоверны, по крайней мере с $p < 0,01$. Во всех случаях хорошо выражен «эффект самородка», что свидетельствует о слабой структурированности распределений и, соответственно, большой роли случайных факторов в детерминации целлюлозолитической активности. В токсическом градиенте характерный размер неоднородности уменьшается от двух метров на фоновой территории до одного метра в буферной и импактной зонах. В высотном градиенте характерный размер неоднородности, определенный для сантиметрового масштаба, также уменьшается (от двух метров в горно-таежном поясе до 40 см в горно-тундровом). Низкие значения коэффициентов детерминации и структурной дисперсии для вариограмм метрового масштаба можно интерпретировать как в значительной степени случайное распределение пиков высокой скорости в пределах 100 м линии.

Таким образом, изменения пространственной структуры деструкционного процесса в токсическом и высотном градиентах сходны между собой по своим «внешним» проявлениям: и в том, и в другом случае при переходе от оптимальных биотопов к пессимальным существенно увеличивается пространственная неоднородность за счет формирования «очаговой» структуры распределения скоростей деструкции. Это можно рассматривать как проявление общей закономерности — неспецифичности реакции биоты на антропогенную нагрузку, когда любому изменению, наблюдаемому в условиях антропогенно трансформированных ландшафтов, можно подобрать природный аналог. Пока остается открытым вопрос о сходстве или различии механизмов, лежащих в основе описанных изменений.

Таблица 4. Параметры сферической модели, аппроксимирующей вариограммы (построены по 25 лагам) для разных биотопов в токсическом (сетка) и высотном (линия) градиентах

Биотоп	оценки параметров модели			r^2	D, %
	C	γ_0	a, м		
	<i>Токсический градиент</i>				
фоновая	70.62 ± 7.35	158.84 ± 7.00	1.95 ± 0.18	0.939	30.78
буферная	197.17 ± 58.38	63.96 ± 58.81	0.73 ± 0.11	0.881	75.51
импактная	199.06 ± 66.23	219.77 ± 66.13	1.30 ± 0.35	0.686	47.53
	<i>Высотный градиент</i>				
10 см масштаб					
тайга	158.26 ± 4.95	49.39 ± 4.97	2.16 ± 0.13	0.945	76.22
редколесье	253.94 ± 14.35	86.32 ± 14.11	1.40 ± 0.10	0.979	74.63
тундра *	0.97 ± 0.31	0.76 ± 0.31	0.36 ± 0.09	0.373	56.05
1 м масштаб					
тайга	57.25 ± 28.53	103.05 ± 28.02	5.02 ± 1.84	0.199	35.72
редколесье	57.16 ± 36.31	89.80 ± 36.20	3.31 ± 1.53	0.173	38.89
тундра**	11.50 ± 3.89	26.38 ± 3.68	6.48 ± 1.89	0.532	30.36

Примечание. r^2 – коэффициент детерминации, D – коэффициент структурной дисперсии, * вместо семивариограммы использована мадограмма, ** оценки параметров модели сделаны по 12 лагам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02-04-96429-Урал) и Комиссии РАН по работе с молодежью (проект № 281 6-го конкурса-экспертизы). Автор признателен за техническую помощь и организацию экспедиционных работ М.Р. Трубиной, П.Г. Пищулину, С.А. Каргавову, И.Н. Михайловой, А.И. Ермакову.

ЛИТЕРАТУРА

- 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. Изменение пространственной структуры деструкционного процесса в условиях атмосферного загрязнения лесных экосистем // Известия АН. Сер. Биологическая. 2002. № 3. С. 368 — 379.
- Driven by nature: plant litter quality and decomposition / ed. By G. Cadisch and K.E. Giller. Oxon: CABI Publishing, 1997. 409 p.
- Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- Methods in soil biology / ed. by Schinner F. et al. Berlin et al.: Springer, 1996. 426 p.
- Swift M.J., Heal O.W., Anderson J.M. Decomposition in terrestrial ecosystems. Berkeley: University of California Press, 1979. 372 p.

ББК 28.081
Э 40
УДК 574.4 (23.0)

КНИГА ПОДГОТОВЛЕНА И ИЗДАНА ПРИ ФИНАНСОВОЙ ПОДДЕРЖКЕ РОССИЙСКОГО ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (ГРАНТ № 02-05-74045)

Научный редактор д.б.н. **А.Г.Васильев**

Э 40. Экологические проблемы горных территорий: Матер. Междунар. науч. конф., 18–20 июня 2002 г. / ИЭРиЖ УрО РАН; Науч. ред. А.Г.Васильев. — Екатеринбург: Изд-во «Академкнига», 2002. — 300 с.

ISBN 5-93472-085-6

В книге рассмотрены современные проблемы геоэкологии, сохранения биоразнообразия растений и животных, биомониторинга окружающей среды, а также медико-экологические аспекты изучения горных и горнопромышленных территорий.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, включая специалистов в области экологии и геоэкологии, медицинских работников, студентов ВУЗов, изучающих основы экологии, учителей, работников органов охраны природы и охотничьего хозяйства, краеведов и натуралистов, радеющих за сохранение природы горных регионов планеты.

По всем вопросам, касающимся книги, обращаться:
620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202
Институт экологии растений и животных УрО РАН

ISBN 5-93472-085-6

© Коллектив авторов, 2002
© Оформление. Издательство
«Академкнига», 2002