

УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
БОТАНИЧЕСКИЙ САД
УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А. М. ГОРЬКОГО

БИОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И МОНИТОРИНГ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Материалы Международной научной конференции
Екатеринбург, 4—8 июня 2007 г.

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2007

УДК 502.521
Б633

Редакционная коллегия:

член-корреспондент РАН **С. А. Мамаев** (отв. редактор); доктор биологических наук А. К. Махнев; доктор сельскохозяйственных наук С. Л. Менщиков; кандидат биологических наук Т. С. Чибрик (отв. редактор); кандидат биологических наук М. А. Глазырина (отв. за выпуск)

*Издание поддержано Российским фондом фундаментальных исследований
(грант 07-04-06033-г)*

Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: материалы Междунар. науч. конф., Екатеринбург, 4—8 июня 2007 г. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2007. — 928 с.

ISBN 5-7996-0261-7

Материалы сборника включают доклады, отражающие достижения последнего пятилетия по таким основным направлениям исследований, как экологические основы биологической рекультивации нарушенных земель, геохимическая оценка нарушенных и рекультивированных земель, физиолого-биохимическая характеристика растительной продукции техногенных ландшафтов, оценка состояния и динамики техногенных экосистем, итоги экспериментальных работ по рекультивации.

Сборник рассчитан на широкий круг специалистов, в том числе в области ботаники, экологии, охраны окружающей среды.

УДК 502.521

ISBN 5-7996-0261-7

© Уральский государственный университет, 2007
© Ботанический сад УрО РАН, 2007

РЕАКЦИЯ ПОЧВЕННОЙ МЕЗОФАУНЫ НА ВЫБРОСЫ СРЕДНЕУРАЛЬСКОГО МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА

Е. Л. Воробейчик¹, А. И. Ермаков¹, М. Е. Гребенников¹,
Е. В. Голованова², А. В. Кузнецов¹, П. Г. Пищулин¹

¹Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Омский государственный педагогический университет, Россия

Введение. Влияние химического загрязнения на разные компоненты природных экосистем активно и давно изучается. Определенное место в этих работах занимают исследования крупных почвенных беспозвоночных (см. обзоры: Хотько и др., 1982; Криволицкий, 1994; Bengtsson, Tranvik, 1989; Tyler et al., 1989; Rusek, Marshall, 2000). Учитывая их важную роль в биологическом круговороте и обеспечении устойчивого функционирования почвы (Стриганова, 1980), ученые неоднократно высказывали предложения об использовании данной группы в экологическом контроле (Криволицкий, 1994). Территории, подверженные выбросам крупных промышленных предприятий («импактные регионы»), — удобные модельные объекты для анализа закономерностей реакции биоты на токсическую нагрузку (Воробейчик, 2004). В 1989—1991 гг. в одном из таких районов — возле Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ), крупнейшего предприятия Урала, — была исследована трансформация населения почвенной мезофауны (Воробейчик, 1995а; 1998; Воробейчик и др., 1994). Представляло интерес проследить, насколько воспроизводимы выявленные закономерности. Для этого через 15 лет (в 2004 г.) практически на тех же пробных площадях провели повторные почвенно-зоологические работы, предварительные результаты которых изложены в данной статье.

© Воробейчик Е. Л., Ермаков А. И., Гребенников М. Е., Голованова Е. В., Кузнецов А. В., Пищулин П. Г., 2007

Район исследований. СУМЗ расположен на окраине Ревды (Свердловская обл.). Основные ингредиенты выбросов — SO₂ и полиметаллическая пыль, в которой преобладают Cu, Pb, Cd, Zn, As. Многолетнее (с 1940 г.) загрязнение тяжелыми металлами в сочетании с поступлением кислотных агентов оказало сильное воздействие, приведшее в конечном итоге к почти полной деградации лесных экосистем возле завода. Характер техногенного воздействия и трансформации экосистем в этом районе подробно описан ранее (Воробейчик и др., 1994; Кайгородова, Воробейчик, 1996). Пробные площади размером 10 × 10 м (всего 17) заложены в ельниках-пихтарниках разных растительных ассоциаций на серых лесных почвах в четырех выделенных ранее по степени поражения растительного и почвенного покрова зонах нагрузки — фоновой (20—30 км к западу от завода, 5 площадей), буферной 1 (7 км, 2 площади), буферной 2 (4—6 км, 5 площадей) и импактной (1—3 км, 5 площадей).

Материал и методика. Почвенных беспозвоночных (размерная группа «мезофауна») учитывали в июле — августе 2004 г. с помощью ручной выборки из почвенных монолитов. Площадь пробы была равна 1/25 м² (20 × 20 см); глубина раскопок составляла 20—30 см (в зависимости от глубины встречаемости животных). Все оценки плотности в дальнейшем пересчитаны на 1 м². Для анализа вертикального распределения каждую пробу при отборе делили на два слоя — подстилку и почву; слои анализировали отдельно. Разбор проб осуществляли непосредственно на месте или, в большинстве случаев, в лабораторных условиях, куда почвенные монолиты доставляли в полиэтиленовых пакетах. На каждой пробной площади было отобрано 10 почвенных монолитов, размещенных случайно. Общий объем материала — 170 проб и около 9 тыс. почвенных беспозвоночных. Дождевых червей после очищения от почвы фиксировали 4 %-ным раствором формальдегида с добавлением глицерина; прочих беспозвоночных фиксировали в 70 %-ном спирте. Определение

беспозвоночных вели в основном до семейства по «Определителю обитающих в почве личинок насекомых» (1964); дождевых червей — до вида по Т. С. Перель (1979). Качественные сборы дождевых червей проведены также в июле 2006 г.

Трофическую активность почвенной биоты оценили в августе 2006 г. методом приманочных пластин (Törne, 1990), который позволяет интегрально охарактеризовать активность всех почвенных сапрофагов. Основными потребителями приманки считаются дождевые черви, энхитреиды, коллемболы и почвенные клещи (Kratz, 1998), вклад почвенной микрофлоры незначителен (Helling et al., 1998). Приманка — это смесь порошка карбоксиметилцеллюлозы и листьев крапивы (соотношение 7 : 3). Заполненные приманкой пластины (12-сантиметровые полоски с 16 отверстиями диаметром 1,5 мм, расположенными через каждые 5 мм) погружали в подстилку и гумусово-аккумулятивный горизонт строго вертикально; время экспозиции — 15 суток. Трофическую активность оценивали по степени перфорирования отверстий в пластине по шестибальной шкале — от 1 (перфорировано полностью) до 0 (совершенно не тронут). Определение трофической активности проведено для 45 круговых площадок под пологом отдельных деревьев ели (по 15 в фоновой, буферной 2 и импактной зонах). На каждую площадку приходилось по 15 пластин, расположенных группами по 3 в линию из 5 точек через 50 см; общий объем — 675 пластин и 10 800 индивидуальных измерений.

Результаты и их обсуждение. Почвенную мезофауну исследованной территории слагают представители трех типов беспозвоночных: кольчатые черви, членистоногие и моллюски (см. табл. 1). Малощетинковые черви из сем. Lumbricidae и Enchytraeidae на фоновых и буферных территориях формируют ядро населения (30—60 % от общей численности), плотность дождевых червей достигает 400 экз./м² (а с учетом коконов — 1 400 экз./м²), энхитреид — 255 экз./м². Чле-

нистоногие представлены паукообразными, многоножками и насекомыми. Из первых значимую роль играют сенокосцы и пауки (главным образом сем. Linyphiidae), плотность которых достигает 350 экз./м². Многоножки представлены как хищными губоногими из сем. Lithobiidae (доминирует *Monotarsobius curtipes*, Koch, 1847) и Geophilidae, так и сапротрофными диплоподами сем. Polydesmidae (единственный вид *Polyzonium cyathiferum*, Mikh., 1981). Плотность многоножек варьирует в широких пределах и достигает максимальных значений на фоновых и буферных участках: 242,5 экз./м² — для литобиид, 62,5 экз./м² — геофилид, 55 экз./м² — диплопод. Насекомые — самая разнообразная группа в почвенной мезофауне, включающая личиночные и имагинальные стадии представителей 9 отрядов. Более 95 % численности насекомых составляют двукрылые, жесткокрылые, перепончатокрылые и равнокрылые.

В токсическом градиенте наблюдается значительное (на порядок величины) уменьшение общего обилия почвенной мезофауны (см. табл. 1, 2). Можно выделить три типа реакции на токсическую нагрузку: полное исчезновение, снижение обилия и относительное постоянство обилия. Первый тип реакции демонстрируют дождевые черви, энхитреиды и моллюски, отсутствующие на импактной территории. Второй — губоногие и двупарноногие многоножки, паукообразные, личинки двукрылых, стафилинид, мягкотелок, долгоносиков. Третий тип присущ личинкам щелкунов, листоедов, жукам сем. Cryptophagidae, сохраняющим, а в ряде случаев, при сильном загрязнении, даже увеличивающим свою численность. Заключение относительно других групп сделать затруднительно из-за их низкой численности во всех зонах нагрузки. Сходные тенденции для данного района были зарегистрированы нами ранее (Воробейчик, 1995а; 1998; Воробейчик и др., 1994), а также в отношении ряда групп для других районов — личинок щелкунов (Некрасова, 1993; Середюк, 2004), дождевых червей, энхитреид,

Таблица 1

Обилие основных групп почвенной мезофауны в разных зонах токсической нагрузки (среднее \pm ошибка среднего), экз./м²

Площадь	Группа						Diplopoda
	Lumbricidae (черви)	Lumbricidae (коконы)	Enchytraeidae	Arachnoidea	Lithobiidae	Geophilidae	
30-1	407,5 \pm 56,5	997,5 \pm 121,2	192,5 \pm 31,0	240,0 \pm 53,1	162,5 \pm 24,5	20,0 \pm 8,2	22,5 \pm 11,5
30-2	335,0 \pm 62,9	1055,0 \pm 229,3	162,5 \pm 34,2	322,5 \pm 37,5	237,5 \pm 24,8	35,0 \pm 13,5	32,5 \pm 25,3
30-3	207,5 \pm 30,5	897,5 \pm 59,4	77,5 \pm 31,3	322,5 \pm 40,9	225,0 \pm 43,0	45,0 \pm 9,0	32,5 \pm 17,1
20-1	80,0 \pm 18,9	197,5 \pm 65,0	152,5 \pm 47,8	242,5 \pm 59,5	117,5 \pm 26,6	52,5 \pm 13,1	—
20-2	277,5 \pm 22,5	525,0 \pm 106,4	255,0 \pm 83,7	122,5 \pm 21,6	160,0 \pm 19,1	35,0 \pm 6,7	30,0 \pm 19,6
7-1	185,0 \pm 31,2	592,5 \pm 137,9	67,5 \pm 21,4	47,5 \pm 14,2	65,0 \pm 18,0	32,5 \pm 9,2	ед.
7-2	240,0 \pm 36,6	1125,0 \pm 204,6	182,5 \pm 105,7	350,0 \pm 67,0	85,0 \pm 15,0	62,5 \pm 11,9	10,0 \pm 10,0
6-1	27,5 \pm 16,9	37,5 \pm 18,4	32,5 \pm 27,1	72,5 \pm 28,2	12,5 \pm 5,6	12,5 \pm 5,6	—
5-1	147,5 \pm 24,6	562,5 \pm 124,6	105,0 \pm 75,6	85,0 \pm 30,3	50,0 \pm 9,1	27,5 \pm 9,5	—
4-1	2,5 \pm 2,5	137,5 \pm 30,1	10,0 \pm 4,1	247,5 \pm 48,8	45,0 \pm 16,6	—	5,0 \pm 3,3
4-2	5,0 \pm 3,3	92,5 \pm 32,7	2,5 \pm 2,5	235,0 \pm 31,7	10,0 \pm 5,5	40,0 \pm 9,3	55,0 \pm 38,9
4-3	15,0 \pm 7,6	72,5 \pm 18,8	—	327,5 \pm 96,1	75,0 \pm 17,9	15,0 \pm 7,6	20,0 \pm 20,0
3-1	—	—	—	Импактная зона	2,5 \pm 2,5	5,0 \pm 3,3	—
2-1	—	—	—	60,0 \pm 17,2	22,5 \pm 5,8	—	—
2-2	—	—	—	32,5 \pm 14,0	17,5 \pm 7,5	—	15,0 \pm 15,0
2-3	—	—	—	20,0 \pm 10,4	13,9 \pm 7,3	—	—
1-1	—	—	—	8,3 \pm 4,2	12,5 \pm 5,6	2,5 \pm 2,5	—
				40,0 \pm 17,6			

Примечание. Первая цифра в обозначении пробной площади соответствует расстоянию от завода, км; вторая — номеру площади на данном удалении от завода. Стадия развития насекомых: *im* — имаго, *l* — личинка, *p* — куколка. Прочерк означает отсутствие группы; ед. — единично.

Продолжение табл. 1

Площадь	Группа						Staphylinidae, <i>l</i>	Staphylinidae, <i>im</i>	Staphylinidae, <i>l</i>	Cantharidae, <i>l</i>
	Hemiptera	Homoptera	Carabidae, <i>im</i>	Carabidae, <i>l</i>	Sarabidae, <i>l</i>	Staphylinidae, <i>l</i>				
30-1	2,5 \pm 2,5	12,5 \pm 6,7	15,0 \pm 4,1	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	50,0 \pm 14,4	90,0 \pm 16,3	15,0 \pm 5,5	15,0 \pm 5,5	
30-2	15,0 \pm 7,6	32,5 \pm 14,5	17,5 \pm 8,4	—	—	97,5 \pm 20,9	120,0 \pm 19,6	57,5 \pm 26,9	57,5 \pm 26,9	
30-3	17,5 \pm 7,5	22,5 \pm 10,2	5,0 \pm 3,3	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	57,5 \pm 10,6	50,0 \pm 14,9	72,5 \pm 10,2	72,5 \pm 10,2	
20-1	42,5 \pm 14,0	—	5,0 \pm 3,3	—	—	162,5 \pm 43,2	12,5 \pm 5,6	27,5 \pm 11,5	27,5 \pm 11,5	
20-2	32,5 \pm 14,9	15,0 \pm 6,7	—	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	75,0 \pm 20,4	5,0 \pm 3,3	15,0 \pm 6,7	15,0 \pm 6,7	
7-1	7,5 \pm 3,8	5,0 \pm 3,3	7,5 \pm 3,8	5,0 \pm 3,3	5,0 \pm 3,3	40,0 \pm 15,0	52,5 \pm 10,2	5,0 \pm 3,3	5,0 \pm 3,3	
7-2	30,0 \pm 7,3	12,5 \pm 7,7	10,0 \pm 4,1	5,0 \pm 3,3	5,0 \pm 3,3	132,5 \pm 41,5	47,5 \pm 9,5	12,5 \pm 4,2	12,5 \pm 4,2	
6-1	—	—	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	35,0 \pm 9,3	22,5 \pm 6,9	5,0 \pm 3,3	5,0 \pm 3,3	
5-1	7,5 \pm 3,8	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	40,0 \pm 8,5	60,0 \pm 17,2	17,5 \pm 8,4	17,5 \pm 8,4	
4-1	12,5 \pm 5,6	7,5 \pm 5,3	7,5 \pm 3,8	7,5 \pm 3,8	7,5 \pm 3,8	55,0 \pm 12,2	5,0 \pm 3,3	67,5 \pm 14,9	67,5 \pm 14,9	
4-2	7,5 \pm 5,3	37,5 \pm 24,5	12,5 \pm 5,6	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	52,5 \pm 15,1	15,0 \pm 6,7	42,5 \pm 14,0	42,5 \pm 14,0	
4-3	7,5 \pm 7,5	10,0 \pm 7,6	7,5 \pm 7,5	—	—	102,5 \pm 22,5	7,5 \pm 3,8	35,0 \pm 14,0	35,0 \pm 14,0	
3-1	5,0 \pm 5,0	—	5,0 \pm 5,0	Импактная зона	—	47,5 \pm 12,0	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	
2-1	—	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	—	—	47,5 \pm 10,8	5,0 \pm 3,3	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	
2-2	2,5 \pm 2,5	5,0 \pm 3,3	2,5 \pm 2,5	—	—	42,5 \pm 10,6	10,0 \pm 5,5	5,0 \pm 3,3	5,0 \pm 3,3	
2-3	2,8 \pm 2,8	—	5,6 \pm 3,7	—	—	77,8 \pm 24,8	2,8 \pm 2,8	11,1 \pm 6,1	11,1 \pm 6,1	
1-1	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	5,0 \pm 5,0	2,5 \pm 2,5	2,5 \pm 2,5	50,0 \pm 14,4	10,0 \pm 4,1	20,0 \pm 12,8	20,0 \pm 12,8	

Продолжение табл. 1

Пло- щадь	Группа							Нумероптера phytophaga, l + p
	Elaterridae, l	Curculionidae, l	Chrysomelidae, l	Суртrophagidae, im	Lepidoptera, l + p	Нумероптера parasitica, im		
30-1	42,5 ± 17,5	15,0 ± 7,6	5,0 ± 3,3	—	17,5 ± 5,3	15,0 ± 5,5	27,5 ± 8,7	
30-2	42,5 ± 20,8	22,5 ± 10,2	—	—	5,0 ± 3,3	7,5 ± 3,8	30,0 ± 11,1	
30-3	80,0 ± 20,0	2,5 ± 2,5	2,5 ± 2,5	—	17,5 ± 7,5	12,5 ± 4,2	40,0 ± 11,3	
20-1	12,5 ± 5,6	—	2,5 ± 2,5	7,5 ± 5,3	10,0 ± 4,1	10,0 ± 5,5	12,5 ± 6,7	
20-2	52,5 ± 13,1	5,0 ± 3,3	2,5 ± 2,5	—	2,5 ± 2,5	7,5 ± 5,3	—	
7-1	100,0 ± 12,4	17,5 ± 5,3	2,5 ± 2,5	Буферная 1 зона	22,5 ± 10,2	2,5 ± 2,5	35,0 ± 15,5	
7-2	70,0 ± 12,2	15,0 ± 6,7	10,0 ± 5,5	—	25,0 ± 6,5	17,5 ± 12,9	12,5 ± 7,7	
6-1	62,5 ± 13,0	17,5 ± 8,4	2,5 ± 2,5	Буферная 2 зона	—	22,5 ± 8,7	22,5 ± 10,8	
5-1	60,0 ± 15,0	5,0 ± 5,0	7,5 ± 5,3	32,5 ± 20,1	37,5 ± 13,6	ед.	27,5 ± 9,5	
4-1	27,5 ± 8,7	12,5 ± 6,7	—	40,0 ± 27,4	5,0 ± 3,3	10,0 ± 5,5	10,0 ± 7,6	
4-2	35,0 ± 11,9	5,0 ± 5,0	—	7,5 ± 7,5	5,0 ± 3,3	2,5 ± 2,5	—	
4-3	55,0 ± 20,3	5,0 ± 5,0	—	12,5 ± 4,2	7,5 ± 3,8	2,5 ± 2,5	—	
3-1	52,5 ± 16,0	5,0 ± 3,3	45,0 ± 13,8	Имлактная зона	2,5 ± 2,5	12,5 ± 6,7	22,5 ± 9,5	
2-1	20,0 ± 9,0	—	—	2,5 ± 2,5	2,5 ± 2,5	—	12,5 ± 6,7	
2-2	5,0 ± 3,3	—	—	2,5 ± 2,5	—	—	20,0 ± 10,4	
2-3	13,9 ± 6,1	—	2,8 ± 2,8	2,8 ± 2,8	2,8 ± 2,8	2,8 ± 2,8	52,8 ± 29,0	
1-1	32,5 ± 9,2	—	2,5 ± 2,5	2,5 ± 2,5	10,0 ± 5,5	2,5 ± 2,5	60,0 ± 30,1	

Окончание табл. 1

Пло- щадь	Группа			Прочие группы	Все группы
	Дiptera нематосега, l	Diptera brachyseга, l	Mollusca		
30-1	27,5 ± 9,5	82,5 ± 16,3	675,0 ± 91,1	30,0 ± 6,2	3167,5 ± 282,6
30-2	375,0 ± 269,3	85,0 ± 26,4	367,5 ± 45,3	37,5 ± 13,0	3492,5 ± 566,8
30-3	42,5 ± 18,3	5,0 ± 3,3	237,5 ± 28,0	27,5 ± 12,6	2502,5 ± 179,8
20-1	52,5 ± 36,0	57,5 ± 17,1	132,5 ± 35,2	5,0 ± 3,3	1395,0 ± 209,9
20-2	5,0 ± 3,3	35,0 ± 11,3	55,0 ± 15,3	12,5 ± 5,6	1727,5 ± 250,3
7-1	5,0 ± 3,3	30,0 ± 10,4	42,5 ± 19,0	2,5 ± 2,5	1372,5 ± 196,8
7-2	5,0 ± 5,0	82,5 ± 58,1	302,5 ± 83,3	12,5 ± 6,7	2857,5 ± 326,1
6-1	5,0 ± 5,0	162,5 ± 159,7	—	20,0 ± 7,3	610,0 ± 186,7
5-1	5,0 ± 3,3	40,0 ± 11,3	27,5 ± 15,6	25,0 ± 8,3	1385,0 ± 26,2
4-1	12,5 ± 5,6	15,0 ± 10,0	—	22,5 ± 8,7	732,5 ± 109,7
4-2	2,5 ± 2,5	27,5 ± 13,1	17,5 ± 7,5	10,0 ± 5,5	727,5 ± 110,8
4-3	2,5 ± 2,5	5,0 ± 5,0	—	7,5 ± 3,8	820,0 ± 168,2
3-1	—	52,5 ± 39,0	Имлактная зона	32,5 ± 29,8	357,5 ± 53,4
2-1	5,0 ± 3,3	2,5 ± 2,5	—	10,0 ± 5,5	170,0 ± 32,7
2-2	—	2,5 ± 2,5	—	5,0 ± 3,3	155,0 ± 36,3
2-3	8,3 ± 5,9	—	—	2,8 ± 2,8	211,1 ± 37,1
1-1	7,5 ± 5,3	2,5 ± 2,5	—	25,0 ± 14,9	292,5 ± 29,4

Таблица 2

Результаты однофакторных дисперсионных анализов различий обилия таксономических и участия трофических групп почвенной мезофауны между разными зонами нагрузки

Группа	Значимость влияния зоны нагрузки		Относительная разница со значением в фоновой зоне, %			
	<i>F</i> (3; 13)	<i>p</i>	Буферная 1	Буферная 2	Импактная	
<i>Таксономическая структура (по обилию групп)</i>						
Lumbricidae (черви)	36,52	< 0,00001	-18,7	-84,9	-100,0	
Lumbricidae (коконы)	89,26	< 0,00001	+16,9	-75,4	-100,0	
Enchytraeidae	21,55	0,00003	-25,6	-82,1	-100,0	
Arachnoidea	8,87	0,00184	-20,5	-22,6	-86,9	
Lithobiidae	14,67	0,00018	-58,4	-78,7	-92,4	
Geophilidae	9,77	0,00122	26,7	-49,3	-95,9	
Diplopoda	1,69	0,21809	-78,7	-31,9	-87,0	
Hemiptera	3,57	0,04422	-14,8	-68,2	-88,4	
Homoptera	1,58	0,24137	-47,0	-30,3	-87,6	
Carabidae, im	0,40	0,75316	+2,9	-23,5	-52,0	
Carabidae, l	3,30	0,05460	+233,3	+100,0	-66,0	
Staphylinidae, im	1,19	0,35262	-2,5	-35,6	-40,6	
Staphylinidae, l	3,81	0,03684	-9,9	-60,4	-89,0	

Примечание. *F* (3; 13) — критерий Фишера, *p* — достигнутый уровень значимости; учетная единица — площадка; преобразование переменных: для обилия — логарифмирование, для долей — арксинус-преобразование. Относительная разница рассчитана как разница между значением в буферной (импактной) зоне и в фоновой зоне, отнесенная к фоновому значению.

Окончание табл. 2

Группа	Значимость влияния зоны нагрузки		Относительная разница со значением в фоновой зоне, %			
	<i>F</i> (3; 13)	<i>p</i>	Буферная 1	Буферная 2	Импактная	
Cantharidae, l	3,79	0,03738	-76,7	-10,7	-78,2	
Elatridae, l	2,97	0,07077	+84,8	+4,3	-45,7	
Curculionidae, l	5,45	0,01199	+80,6	0	-88,7	
Chrysomelidae, l	0,57	0,64595	+150,0	-20,0	+308,2	
Cryptophagidae, im	17,92	0,00007	-100,0	+1666,7	+70,1	
Lepidoptera, l + p	2,26	0,12994	+126,2	+4,8	-66,0	
Hymenoptera parasitica, im	1,78	0,20121	-4,8	-28,6	-66,0	
Hymenoptera phytophaga, l + p	1,32	0,31082	+8,0	-45,5	+50,7	
Diptera Nematocera, l	5,22	0,01386	-95,0	-94,5	-95,9	
Diptera Brachycera, l	3,28	0,05520	+6,1	-5,7	-76,9	
Mollusca	22,42	0,00002	-41,2	-96,9	-100,0	
Все группы	37,20	< 0,00001	-13,9	-65,2	-32,0	
<i>Трофическая структура (по долевым участкам)</i>						
Зоофаги	4,25	0,02670	-24,7	63,2	88,1	
Фитофаги	25,66	0,00001	81,6	121,3	457,5	
Сапрофитофаги	16,73	0,00009	-36,7	-91,9	-100,0	
Сапрофаги	20,80	0,00003	13,5	-41,7	-90,2	

многоножек (Степанов и др., 1991; Некрасова, 1993; Евдокимова и др., 2002).

Дифференцированная реакция разных групп на загрязнение имеет следствием закономерную трансформацию трофической структуры (см. рис. 1, табл. 2). При всей условности отнесения конкретного таксона надвидового ранга к той или иной трофической группе можно отметить следующее.

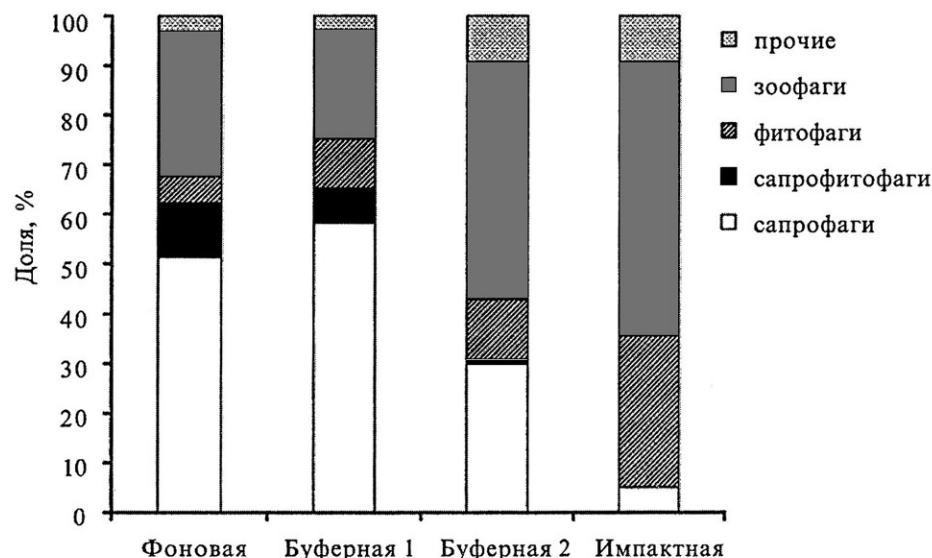


Рис. 1. Трофическая структура населения почвенной мезофауны в разных зонах токсической нагрузки

На фоновой территории доминируют сапрофаги (40—50 % от общей численности), сапрофитофаги составляют 3—20 %, фитофаги — 6—7 %, зоофаги — 19—44 %. С ростом загрязнения происходит уменьшение доли сапрофагов и сапрофитофагов до их почти полного выпадения в импактной зоне (от 0 до 8 %). В наиболее загрязненных участках импактной зоны население представлено только фитофагами (20—40 %) и зоофагами (43—67 %). Аналогичные изменения трофической структуры были отмечены другими авторами (Рябинин и др., 1988; Елпатьевский, Филатова, 1988; Некрасова, 1993;

Евдокимова и др., 2002). Снижение доли сапротрофных организмов (сапрофагов и сапрофитофагов) и увеличение биотрофных (фитофагов и зоофагов) логично связать с разным содержанием токсикантов в их пищевых субстратах (в растительном опаде и детрите оно существенно выше по сравнению с живыми организмами), а также с разной эффективностью потребления пищи, которая ниже у сапрофагов (Стриганова, 1980). Вероятно, именно большая величина входа в организм токсикантов у сапротрофов и меньшая «пластичность» их трофики обуславливают их элиминацию при токсической нагрузке. Столь существенные изменения в трофической структуре населения ведут к замедлению круговорота вещества на стадии деструкции органики, которое наблюдается на импактной территории (Воробейчик, 1995б; 2003).

При приближении к источнику выбросов меняется характер вертикального распределения населения (см. рис. 2). На фоновой территории около 40 % беспозвоночных сосредоточено в почве. При росте загрязнения для основных групп мезофауны (кроме энхитреид, геофилид и личинок долгоносиков) прослеживается четкая закономерность — перераспределение плотности в подстилку, в которой на импактной территории сосредоточено около 90 % животных. Для отдельных групп разница еще более контрастная. Так, личинки шелконов в фоновой зоне встречаются почти исключительно в почве (около 80 % численности), тогда как на импактных территориях 70—80 % особей зарегистрировано в подстилке. Вероятным объяснением этого может быть изменение водно-воздушных свойств почвы (Кайгородова, Воробейчик, 1996), что при высокой токсичности делает невозможным обитание в ней почвенных животных. Для хищных форм дополнительным фактором выступает сосредоточение в подстилке их жертв — как среди педобионтов, так и обитателей других ярусов. Обнаруженная закономерность противоречит данным ряда авторов, отмечавших в условиях загрязнения

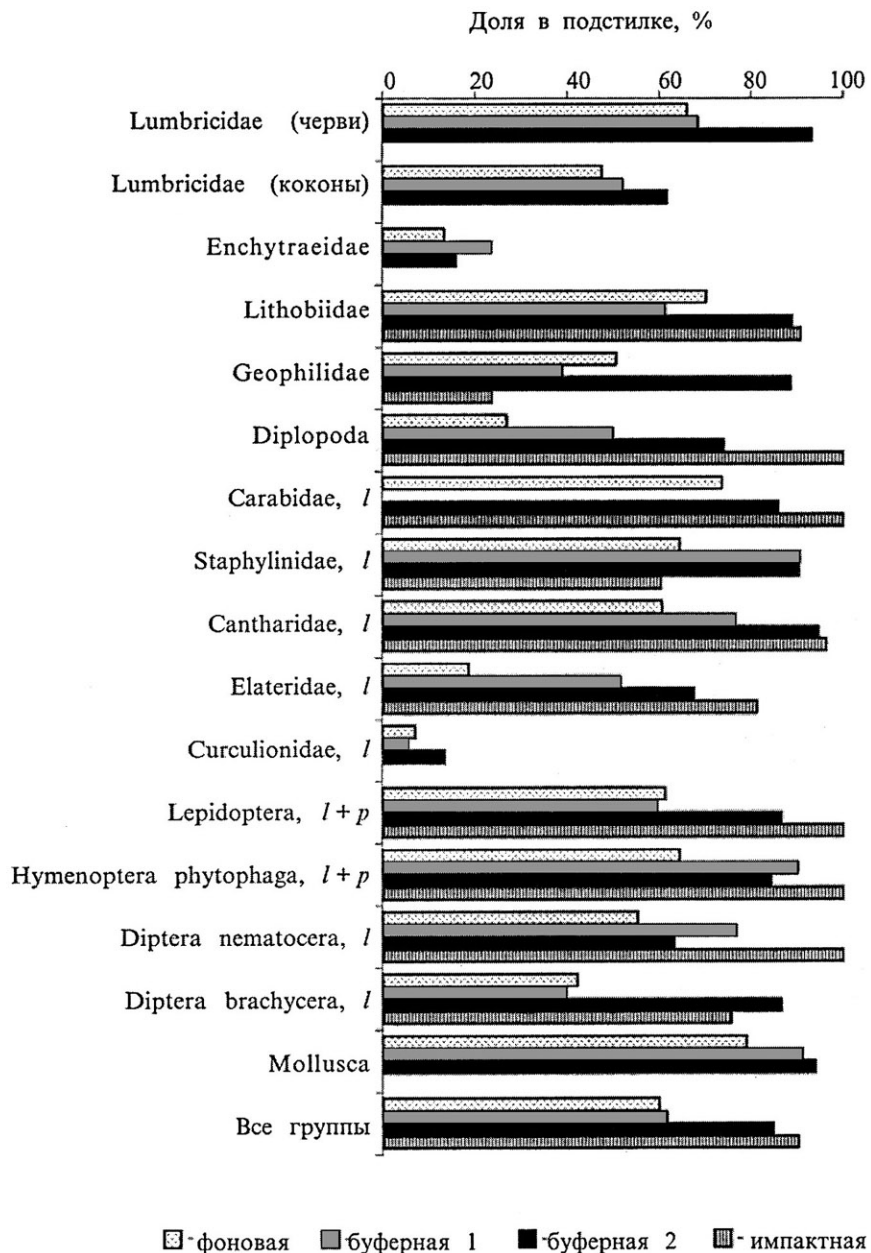


Рис. 2. Доля в подстилке основных групп почвенной мезофауны в разных зонах токсической нагрузки

перераспределение организмов из подстилки в почву (Рябинин и др., 1988). Это, вероятно, объясняется тем, что они анализировали кратковременные эффекты действия поллютантов в условиях натурального эксперимента.

Изменение видового состава прослежено для моллюсков (см. табл. 3) и дождевых червей (см. табл. 4). Среди почвенной мезофауны в районе исследований обнаружено 11 видов

Таблица 3

Доля видов моллюсков в разных зонах токсической нагрузки, %

Вид	Зона нагрузки		
	Фоновая	Буферная 1	Буферная 2
<i>Nesovitrea hammonis</i> Ström, 1765	65,0	56,4	33,3
<i>Discus ruderatus</i> Studer, 1820	3,4	11,4	44,4
<i>Euconulus fulvus</i> Müller, 1774	4,8	1,4	22,2
<i>Cochlicopa</i> sp.	13,6	18,6	—
<i>Vallonia costata</i> Müller, 1774	7,7	11,4	—
<i>Arion subfuscus</i> Draparnaud, 1805	0,2	0,7	—
<i>Carychium</i> sp.	1,4	—	—
<i>Punctum pygmaeum</i> Draparnaud, 1801	2,2	—	—
<i>Columella</i> sp.	1,2	—	—
<i>Bradybaena fruticum</i> Müller, 1774	0,3	—	—
<i>Vitrina pellucidus</i> Müller, 1774	0,2	—	—
Всего видов	11	6	3
Всего экземпляров	583	140	18

Примечание. Прочерк (—) означает отсутствие вида.

моллюсков, во всех зонах доминирует *Nesovitrea hammonis*. По мере приближения к источнику выбросов происходит как существенное снижение численности, так и сокращение видового богатства: с 11 видов в фоновой зоне до 6 видов в 7 км от завода и всего 3 видов в 4 км.

В районе исследований в 2004 г. обнаружено 8 видов дождевых червей (см. табл. 4), среди которых два уральских

Таблица 4

Доля видов дождевых червей в разных зонах токсической нагрузки, %

Вид	Зона нагрузки		
	Фоно- вая	Буфер- ная 1	Буфер- ная 2
<i>Perelia diplotetratheca</i> Perel, 1976	83,3	87,1	80,3
<i>Dendrobaena octaedra</i> Savigny, 1826	8,0	8,0	18,4
<i>Eisenia atlavinyteae</i> Perel et Graphodatsky, 1984	0,9	1,2	—
<i>Octolasion lacteum</i> Orley, 1885	0,2	—	—
<i>Aporrectodea rosea</i> Savigny, 1826	0,7	—	—
<i>Perelia tuberosa</i> Svetlov, 1924	6,9	—	1,3
<i>Dendrodrilus rubidus tenuis</i> Eisen, 1874	—	1,2	—
<i>Lumbricus rubellus</i> Hoffmeister, 1843	—	2,5	—
Всего видов	6	5	3
Всего особей	450	163	76

Примечание. Прочерк (—) означает отсутствие вида.

эндемика (*Perelia diplotetratheca* и *P. tuberosa*), распространенный преимущественно в азиатской части России *Eisenia atlavinyteae* и 5 видов-космополитов (*Dendrobaena octaedra*, *Aporrectodea rosea*, *Octolasion lacteum*, *Dendrodrilus rubidus* и *Lumbricus rubellus*). К первому морфо-экологическому типу, по Т. С. Перель (1975) (питаются слаборазложившимися растительными остатками), относятся 5 видов, принадлежащих к двум морфо-экологическим группам: подстилочным (*Dendrobaena octaedra*, *Dendrodrilus rubidus*) и почвенно-подстилочным (*Perelia diplotetratheca*, *Eisenia atlavinyteae* и *Lumbricus rubellus*). Ко второму морфо-экологическому типу (питаются почвенным перегноем) принадлежат 3 вида: *Octolasion lacteum*, *Perelia tuberosa* и *Aporrectodea rosea*; все относятся к верхнеярусной группе. Преобладание и большее разнообразие червей, питающихся растительными остатками над формами, использующими детрит, а также отсутствие норников можно объяснить относительно маломощным гумусовым горизонтом и наличием хорошо выраженной под-

стилки у исследованных почв. При качественных сборах червей на лугах увеличивается доля второго морфо-экологического типа и появляются среднеярусные формы (*Aporrectodea caliginosa caliginosa* — Savigny, 1826). Известно, что норники могут обитать лишь в хорошо дренированных почвах и поэтому с продвижением на север замещаются почвенно-подстилочными видами в переувлажненных почвах таежной зоны (Перель, 1979).

Во всех зонах доминирует *Perelia diplotetratheca*, составляя более 80 % от всех люмбрицид. Среди остальных видов заметна доля *Dendrobaena octaedra* и *Perelia tuberosa*. С приближением к заводу в первую очередь исчезают виды, питающиеся почвенным перегноем (в буферной зоне обнаружен единственный экземпляр *Perelia tuberosa*), что может говорить о большей чувствительности червей второго морфо-экологического типа к токсической нагрузке. В реакции первого морфо-экологического типа можно отметить увеличение доли подстилочных видов с приближением к заводу. Это еще более заметно при анализе качественных сборов 2006 г.: на удалении в 4 км от завода доминировал *Dendrodrilus rubidus*, обитая исключительно в гниющей древесине, субдоминантом был *Dendrobaena octaedra*, также обнаруженный преимущественно в стволах разлагающихся деревьев (при количественных учетах эти местонахождения не учитываются).

Изменения численности, возрастного состава и вертикального распределения люмбрицид подтверждают закономерности, описанные ранее (Воробейчик, 1995а; 1998). С приближением к заводу численность дождевых червей снижается вплоть до их полного исчезновения на площадках, расположенных ближе 3 км. Доля неполовозрелых особей составляет около 80—90 % и не зависит от расстояния до завода. Такая возрастная структура, а также наличие коконов на всех площадках, где встречены черви, свидетельствует об их размножении на самом «пределе» своего распространения,

т. е. при достаточно высоком уровне токсической нагрузки. Как и для всего населения мезофауны, для люмбрицид четко проявляется тенденция перемещения в верхние горизонты почвы и подстилку при приближении к заводу. Это связано не только с исчезновением представителей второго морфо-экологического типа, но и со смещением зоны активности червей, питающихся растительными остатками. Так, в 30 км от завода в почве обнаружено 33 % особей *Dendrobaena octaedra*, в 7 км — лишь 7 %, а ближе 6 км от завода все представители этого вида обнаружены только в подстилке. В 4 км от завода все виды найдены только в подстилке. Хотя подстилка содержит существенно больше подвижных форм тяжелых металлов, оглеение верхних горизонтов почв (Кайгородова, Воробейчик, 1996), приводящее к ухудшению структуры почвы и ее аэрации, вероятно, имеет для люмбрицид большее значение, чем непосредственное влияние поллютантов.

Как и следовало ожидать, интегральная трофическая активность сапрофагов закономерно уменьшается от фоновой зоны к импактной (см. рис. 3); относительная разница с фоновым уровнем в буферной зоне составляет 75,4 %, в импактной — 82,8 %. На загрязненных территориях возрастает пространственная вариабельность данного показателя. Логично связать это со снижением численности основных потребителей растительного опада, который в пластинках имитирует приманка, — дождевых червей, энхитреид и диплопод. Возможно, на загрязненных территориях основная роль в потреблении приманки переходит к другим группам мезофауны и к почвенной микрофауне — коллемболам и клещам. Аналогичное снижение трофической активности регистрировали при загрязнении почвы различными поллютантами, в том числе тяжелыми металлами (Larink, 1993; Kratz, 1998; Filzek et al., 2004).

В фоновой и буферной зонах трофическая активность закономерно понижается от верхнего слоя почвы к нижнему,

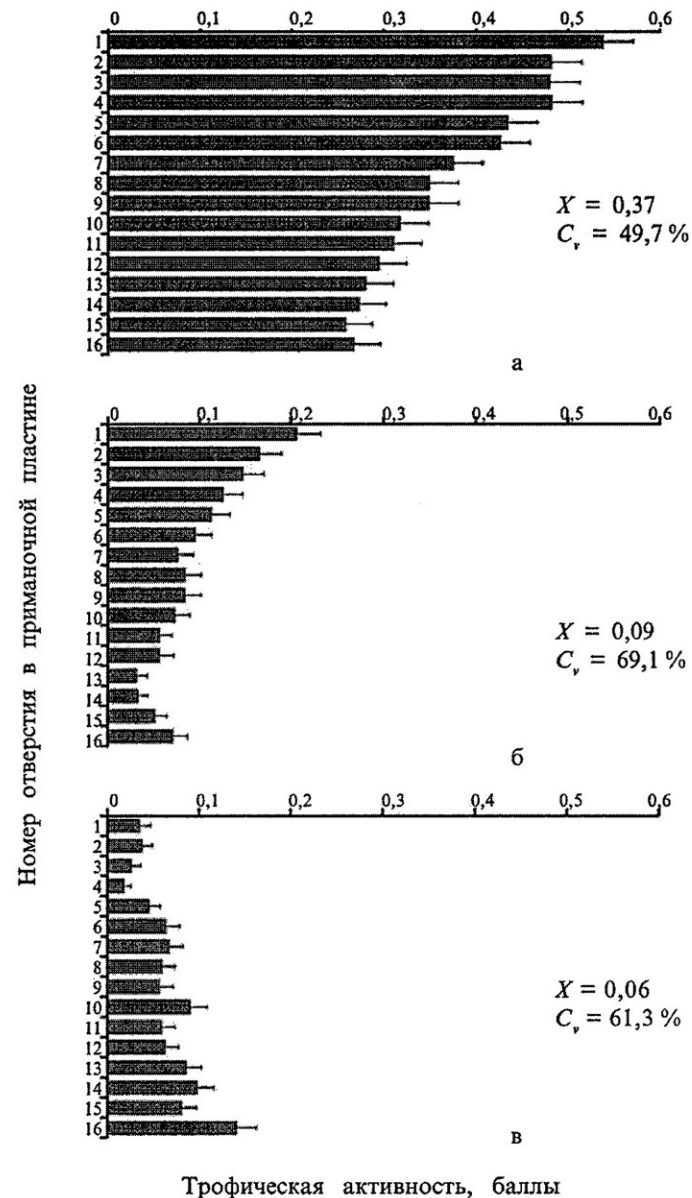


Рис. 3. Вертикальное распределение трофической активности почвенных сапрофагов в фоновой (а), буферной (б) и импактной (в) зонах нагрузки в верхнем 8-сантиметровом слое почвы. Горизонтальные линии — ошибка среднего (учетная единица — отверстие); X — среднее арифметическое; C_v — коэффициент вариации (учетная единица — площадка)

а наибольшие значения приходятся на верхний 4-сантиметровый слой. В импактной же зоне наблюдается противоположная ситуация — трофическая активность увеличивается от верхнего слоя к нижнему. Однако необходимо подчеркнуть, что из-за роста мощности подстилки в импактной зоне (Воробейчик, 1995б; 2003) максимум трофической активности приходится фактически на ее нижние слои или на границу между подстилкой и минеральными горизонтами почвы. Следовательно, нет противоречия между закономерностями изменения вертикального распределения трофической активности и обилием почвенной мезофауны (см. рис. 2). Инверсия вертикальной стратификации трофической активности может быть связана как с особенностями распределения поллютантов (наибольшая их концентрация регистрируется именно в верхних слоях), так и с большей неоднородностью гидротермического режима самых верхних слоев подстилки.

Заключение. Таким образом, выполненный через 15 лет повторный анализ реакции населения почвенной мезофауны в районе СУМЗа подтвердил все обнаруженные ранее закономерности: снижение общей численности, уменьшение группового и видового разнообразия, исчезновение на максимально загрязненных участках отдельных групп, смещение трофического спектра в сторону преобладания фитофагов и зоофагов при почти полной элиминации сапрофагов, перераспределение плотности основных групп из почвы в подстилку. Это свидетельствует об определенной стабильности ситуации на данной территории, несмотря на имевшее место снижение объема выбросов СУМЗа в конце XX в. по сравнению с серединой 1980-х гг. Можно прогнозировать, что даже при планируемом в ближайшие годы существенном снижении объемов выбросов этого предприятия, если не проводить специальные рекультивационные мероприятия, накопленный потенциал токсичности почвы в обозримой перспективе исключает естественное восстановление почвенной фауны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 04-04-96104-Урал), программы Президиума РАН «Биологическое разнообразие», программы развития ведущих научных школ (НШ-5286.2006.4) и Фонда содействия отечественной науке (Е. Л. Воробейчик).

Список использованной литературы

- Воробейчик Е. Л. Реакция почвенной биоты лесных экосистем Среднего Урала на выбросы медеплавильных комбинатов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 1995а.
- Воробейчик Е. Л. Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения // Экология. 1995б. № 4. С. 278—284.
- Воробейчик Е. Л. Население дождевых червей (Lumbricidae) лесов Среднего Урала в условиях загрязнения выбросами медеплавильных комбинатов // Экология. 1998. № 2. С. 102—108.
- Воробейчик Е. Л. Реакция лесной подстилки и ее связь с почвенной биотой при токсическом загрязнении // Лесоведение. 2003. № 2. С. 32—42.
- Воробейчик Е. Л. Экология импактных регионов: перспективы фундаментальных исследований // Фундаментальные и прикладные проблемы популяционной биологии: Материалы VI Всерос. популяционного семинара. Н. Тагил, 2004. С. 36—45.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург, 1994.
- Евдокимова Г. А., Зенкова И. В., Переверзнев В. Н. Биодинамика процессов трансформации органического вещества в почвах Северной Феноскандии. Апатиты, 2002.
- Елпатьевский П. В., Филатова Л. Д. Почвенная мезофауна в аномальных эколого-геохимических условиях // Геогр. и природ. ресурсы. 1988. № 1. С. 92—97.
- Кайгородова С. Ю., Воробейчик Е. Л. Трансформация некоторых свойств серых лесных почв под действием выбросов медеплавильного комбината // Экология. 1996. № 3. С. 187—193.
- Криволицкий Д. А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М., 1994.
- Некрасова Л. С. Влияние медеплавильного производства на почвенную мезофауну // Экология. 1993. № 5. С. 83—85.
- Определитель обитающих в почве личинок насекомых / Под ред. М. С. Гилярова. М., 1964.
- Перель Т. С. Жизненные формы дождевых червей (Lumbricidae) // Журн. общ. биологии. 1975. Т. 36, № 2. С. 189—202.

Перель Т. С. Распространение и закономерности распределения дождевых червей фауны СССР. М., 1979.

Рябилин Н. А., Ганин Г. Н., Паньков А. Н. Влияние отходов сернокислого производства на комплексы почвенных беспозвоночных // Экология. 1988. № 6. С. 29—37.

Середюк С. Д. Экологические особенности, популяционная структура и видовые сообщества семейства Elateridae в зонах техногенного воздействия: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2004.

Степанов А. М., Черненкова Т. М., Верецагина Т. Н., Безукладова Ю. О. Оценка влияния техногенных выбросов на почвенных беспозвоночных и растительный покров // Журн. общ. биологии. 1991. Т. 52, № 5. С. 699—707.

Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов. М., 1980.

Хотько Э. И., Ветрова С. Н., Матвеевко А. А., Чумаков Л. С. Почвенные беспозвоночные и промышленные загрязнения. Минск, 1982.

Bengtsson G., Tranvik L. Critical metal concentrations for forest soil invertebrates — a review of the limitations // Water Air and Soil Pollution. 1989. Vol. 47, Nr 3—4. P. 381—417.

Filzek P. D. B., Spurgeon D. J., Broll G., Svendsen C., Harnkard P. K., Parekh N., Stubberud E. H., Weeks J. M. Metal effect on soil invertebrate feeding: measurements using the bait lamina method // Ecotoxicology. 2004. Vol. 13. P. 807—816.

Helling B., Pfeiff G., Larink O. A comparison of feeding activity of collembolan and enchytraeid in laboratory studies using the bait-lamina test // Applied soil ecology. 1998. Vol. 7, Nr 3. P. 207—212.

Kratz W. The bait-lamina test — general aspects, applications and perspectives // Environmental Science and Pollution Research. 1998. Vol. 5, Nr 2. P. 94—96.

Larink O. Bait lamina as a tool for testing feeding activity of animals in contaminated soils // Ecotoxicology of soil organisms. Boca Raton, 1993. P. 339—345.

Rusek J., Marshall V. G. Impacts of airborne pollutants on soil fauna // Ann. Rev. Ecol. Syst. 2000. Vol. 31. P. 395—423.

Törne E. von. Assessing feeding activities of soil-living animals. 1. Bait-lamina-tests // Pedobiologia. 1990. Bd. 34. P. 89—101.

Tyler G., Pahlsson A. M. B., Bengtsson G., Baath E., Tranvik L. Heavy-metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates — a review // Water Air and Soil Pollution. 1989. Vol. 47, Nr 3—4. P. 189—215.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И МОНИТОРИНГ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

