

ОРИГИНАЛЬНЫЕ
СТАТЬИ

УДК 630*574.3:504.054+592

**ДИНАМИКА ПОЧВЕННОЙ МЕЗОФАУНЫ
В ЗОНЕ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

© 2009 г. А. В. Танасевич¹, Л. Б. Рыбалов², И. О. Камаев¹

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
117997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32

E-mail: atan@orc.ru, ilyakamayev@yandex.ru

²Институт проблем экологии и эволюции РАН

119071 Москва, Ленинский просп., 33

E-mail: lrybalov52@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2008 г.

Проанализирована многолетняя динамика основных показателей обилия и разнообразия комплекса почвенной мезофауны (численность, биомасса, таксономический состав и пр.) северотаежных ельников по градиенту аэротехногенного следа металлургического комбината “Североникель”, Мурманская обл. Выявлены группы-доминанты: в численности и таксономическом разнообразии доминируют пауки, показатели биомассы определяют личинки жуков. Наличие моховой дернины признано основным биотическим лимитирующим фактором распределения почвенной мезофауны. Установлена высокая степень зависимости показателей обилия мезофауны от толщины мохового покрова и его проективного покрытия. В отличие от некоторых других компонентов наземных сообществ (растительность, мелкие млекопитающие), многократное снижение поллютантного прессы в течение последних 14 лет не вызвало у комплекса почвенной мезофауны восстановительной динамики.

Почвенная мезофауна, биоиндикация, поллютантное загрязнение, металлургическое производство, Мурманская обл.

Почвенная мезофауна – один из важнейших компонентов почвенной биоты, не только играющий существенную роль в функционировании почвы, но и принимающий активное участие в ее создании. Любое изменение среды обитания непосредственно отражается на состоянии фауны и населения почвообитающих беспозвоночных, что позволяет использовать их в качестве надежного индикатора состояния природных сообществ [1, 5, 16]. Наиболее показателен в биоиндикационном аспекте комплекс почвенной мезофауны – фаунистическая группировка, составленная крупными беспозвоночными животными, легко учитываемыми при ручной разборке почвенных проб [7, 8].

Почвенная мезофауна северо-западной части России, в частности Мурманской обл., изучена относительно неплохо. Первые сведения по разным группам насекомых региона, в том числе и по почвенным, можно найти у В.Ю. Фридолина [26],

изучавшего биоценологические связи в различных (в то время еще ненарушенных) природных сообществах Хибин. Затем последовали работы Б.А. Тихомирова [25] по дождевым червям тундровых почв, Г.А. Новикова [17] по экологии отдельных групп насекомых, Б.Р. Стригановой [23] по распределению почвенной мезофауны в прибрежных тундрах Кольского п-ова. Несколько работ опубликовано по ландшафтно-вертикальной поясности населения почвенных беспозвоночных Хибин [18, 31].

Изучению влияния крупных промышленных производств на различные компоненты экосистем Мурманской обл., в том числе и на почвенную фауну, также посвящено немало работ. Особое внимание исследователи уделили деятельности двух крупнейших в регионе металлургических комбинатов “Печенга-Никель” [19, 20] и “Североникель” [9–12, 32] как предприятий, наносящих наибольший урон окружающим природным сообществам. К сожалению, большинство указанных работ представляют собой тезисы докладов, краткость изложения материала в кото-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (07-04-01743-а).

рых не компенсируется их количеством, а отрывочность сведений не позволяет воссоздать целостную картину масштабов и глубины воздействия металлургических производств на комплекс природных объектов региона.

В 1982–1983 и 1991–1992 гг. были проведены комплексные исследования воздействия комбината “Североникель” на наземную растительность, альгофлору и животное население почв. Результаты этих исследований, подкрепленных богатейшим материалом анализов химического состава почв, растительных и животных компонентов, изложены в нескольких крупных статьях и монографиях [15, 21, 22, 28 и др.]. Именно эти данные и методология исследований послужили основой для планирования наших работ с целью получения сопоставимых результатов для мониторинга многолетней динамики почвообитающих беспозвоночных животных, находящихся под сильным и продолжительным поллютантным прессом.

Металлургический комбинат “Североникель” начал свою работу в конце 1930-х годов и до настоящего времени является главным источником аэротехногенного загрязнения региона. Основные поллютанты, выбрасываемые в атмосферу – это соединения серы (до 80%), азота, фтора, оксиды тяжелых металлов, в основном Cu, Ni, Cd и др. [22]. Зона воздействия комбината соответствует розе ветров и вытянута в меридиональном направлении. Западный снос поллютантов минимальный. С 1992 г. началось снижение объемов выбросов комбината “Североникель”, в результате чего этот показатель за несколько лет снизился в 5 раз. Эта положительная в экологическом отношении тенденция не могла не сказаться на улучшении состояния окружающих природных сообществ, на восстановлении растительного покрова и животного населения. Так, за последние годы отмечено увеличение разнообразия мелких млекопитающих, улучшение их популяционных и биологических показателей [13]; восстановительные тенденции отмечены и на геоботаническом материале [27, 29].

Цель наших исследований – проследить современную динамику основных показателей обилия и разнообразия (численность, биомасса, таксономический состав и пр.) комплекса почвенной мезофауны северотаежных ельников по градиенту аэротехногенного загрязнения комбината “Североникель”; выявить и оценить связь с дигрессионными или восстановительными тенденциями растительности и отдельных ее компонентов, а также сравнить современное состояние почвенной мезофауны с аналогичными данными, полученными 14 лет назад на тех же пробных площадках.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследования проводили в окрестностях металлургического комбината “Североникель” (г. Мончегорск, Мурманская обл.) в первой декаде августа 2005 и 2006 гг. Данная территория расположена за полярным кругом в подзоне северной тайги и занята в основном еловыми и сосновыми мохово-кустарничковыми редкостойными лесами, приуроченными к хорошо дренированным склонам.

В качестве модельного типа леса были выбраны ельники как наиболее типичные и широко распространенные в регионе, характеризующиеся более мощным и менее фрагментированным (по сравнению с сосняками) моховым покровом, создающим благоприятные условия для существования почвенных беспозвоночных. Маломощная подстилка сосняков не только не может поддерживать режим влажности, оптимальный для жизнедеятельности мезофауны, но и не создает достаточного жизненного пространства, необходимого для обитания некоторых таксономических групп беспозвоночных животных.

Почвы исследованных ельников представлены Al–Fe–гумусовыми подзолами. В ненарушенных или слабонарушенных ельниках почвенный профиль состоит из следующих горизонтов: подстилка (L) представлена живой частью зеленых мхов, главным образом *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. и *Barbilophozia lycopodioides* (Wallr.) Loeske, и опадом ели и кустарничков (черника, голубика, вороника); ниже расположен плохо разделяемый на составляющие ферментативный слой FH, сложенный отмершими частями мхов разной степени оторфованности. Нижняя часть этого горизонта иногда носит следы гумификации, но минеральный гумусово-аккумулятивный горизонт как таковой не выражен. Общая мощность подстилки варьировала от 0 до 9 см в нарушенных ельниках и от 8 до 20 см в заведомо ненарушенных (ельник на границе Лапландского заповедника). Оторфованный горизонт подстилает тонкий слой подзола (E) средней мощностью в 2–4 см, практически необитаемый. Иллювиальный горизонт (Bf) представляет собой плотную упаковку разноориентированных валунов разного размера с засыпкой мелкозема легкого гранулометрического состава охристо-красноватых оттенков. Обитаемый слой мезофауны ограничен лишь подстилкой (A0).

Для изучения воздействия аэротехногенного загрязнения комбината была выбрана транsekта длиной 65 км южного направления, соответствующая наибольшему поллютантному следу.

По трансекте заложено 5 пробных площадей на расстоянии 5, 10, 20, 30 и 65 км от комбината. В качестве контроля выбрана точка вблизи северо-западной оконечности Лапландского заповедника, расположенная на расстоянии 80 км к западу от комбината, в стороне от поллютантного следа, свободная от влияния комбината. Площадки размером 25 × 25 м выбраны в одинаковых элементах ландшафта, на пологих склонах холмов юго-западной экспозиции с уклоном 2–5°, в однотипных ельниках кустарничково-зеленомошных с незначительным участием березы и с сомкнутостью крон 10–20%.

На каждой площадке была обозначена линия проб 10–15 м длиной, проходящая по выровненному микрорельефу и пересекающая основные наиболее типичные для данного ельника растительные группировки. Пробы на мезофауну отбирали по общепринятой методике размером 0.0625 м² (25 × 25 см) на глубину обитаемого горизонта (до подзола) послойно: первый слой – очес (A0L), второй слой – оторфованный (ферментативный) горизонт (A0F + H). На площадках отобрано по

Разборку проб проводили в лабораторных условиях вручную, животных взвешивали в обезживленном состоянии. Всего за 2 сезона работ отобрано 96 почвенных проб.

Математический анализ данных проведен с помощью пакета программ Statistica 6.0. Для выявления статистически значимых различий в показателях обилия населения почвенной мезофауны и мощности подстилки использовали двухфакторный дисперсионный анализ (факторы: “участок” и “год”). Корреляции между показателями обилия, мощностью подстилки и проективным покрытием мхов и кустарничков вычислены посредством коэффициента Спирмена.

По сравнению с пробной площадкой, удаленной от комбината на 5 км, на 30-километровом участке содержание в подстилке основных поллютантов – Cu и Ni – уменьшено в 50 раз, Co – в 8 раз, Pb – более чем в 2 раза [22]. Содержание поллютантов в почве на участке, удаленном от комбината на 65 км, минимально, и может рассматриваться как фон [28]. Краткая геоботаническая характеристика заложенных площадок представлена в табл. 1.

Таблица 1. Краткая характеристика пробных площадок

Удаление от комбината, км	Биотоп	Формула и сомкнутость крон древостоя	Проективное покрытие кустарничков	Проективное покрытие мхов, %	Мхи, слагающие моховой покров	Мощность обитаемого слоя, см
5	Техногенная пустошь	–	<5	<5	<i>Pohlia nutans</i>	3.3
10	Отмерший ельник мертвопокровный-кустарничковый	–	20	–	–	6.7
20	Ельник мертвопокровный-кустарничковый	8E2Б 0.1	50	8	<i>Barbilophozia</i>	7.8
30	Ельник мохово-кустарничковый	9E1Б 0.2	65	44	<i>Barbilophozia</i> , <i>Pleurozium</i> , <i>Hylocomium</i>	9.2
65 (фон)	То же	9E1Б 0.2	31	74	<i>Pleurozium</i> , <i>Hylocomium</i>	10.6
Лапландский заповедник (80, контроль)	”	9E1Б 0.2	57	81	<i>Pleurozium</i> , <i>Hylocomium</i> , <i>Dicranum</i>	12.9

8 проб: 6 проб в межкрупном пространстве и 2 под кроной ели. Подобная схема соответствует сомкнутости крон древостоя, а трансекта, проходящая по основным растительным группировкам ельника, позволяет наиболее полно оценить состав и структуру мезофауны биотопа в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Краткая характеристика таксономического состава почвенной мезофауны. Почвенную мезофауну северотаежных ельников составляют следующие основные группы беспозвоночных

животных: дождевые черви, многоножки, пауки, клопы, жуки (имаго и личинки), личинки двукрылых, бабочек, а также моллюски.

Дождевые черви (Lumbricidae) немногочисленны и представлены одним видом *Dendrobaena octaedra* (Savigny, 1826), обитателем моховой дернины.

Многоножки (Myriapoda, Chilopoda). Единственный вид этой группы – *Lithobius (Monotarsobius) curtipes* C.L. Koch, 1847 – достаточно обычен и местами многочислен.

Пауки (Aranei). Наиболее массовый и разнообразный компонент мезофауны как изученных ельников, так и таежных лесов в целом. Наиболее представительно здесь, как и по всей бореальной зоне Голарктики, семейство пауков-пигмеев Linyphiidae.

Клопы (Hemiptera). Обычная, а на нарушенных участках довольно многочисленная группа насекомых семейств Tengidae (Кружевницы) и Miridae (Слепняки).

Жуки (Coleoptera). Из жесткокрылых наиболее часто в пробах встречаются личинки жуков-щелкунов (Elateridae) и жуков-мягкотелок (Cantharidae). Среди первых доминирует *Eanus costalis* (Paykull, 1800), реже и менее обильно встречается *Athous subfuscus* (Mueller, 1764). Из представителей жуков-мягкотелок наиболее массовый – *Podabrus lapponicus* (Gyllenhal, 1810). Среди более чем 20 видов жуков-стафилинов (Staphylinidae), обнаруженных в пробах, наиболее многочисленны *Oxypoda annularis* (Mannerheim, 1830) и *Othius lapidicola* Kiesenwetter, 1848. Представители жуков других семейств: жужелицы (Carabidae), жуки-долгоносики (Curculionidae) и жуки-скрытноеды Cryptophagidae, попадались в пробах нерегулярно и в малых количествах. Из жужелиц (Carabidae) обнаружено лишь несколько экземпляров имаго *Amara brunnea* (Gyllenhal, 1810) и *A. erratica* (Duftschmid, 1812), а также *Notiophilus aquaticus* (L., 1758) и *N. germyi* Fauvel, 1863.

Двукрылые (Diptera). Среди личинок двукрылых обычны настоящие мухи (Muscidae), реже ктыри (Asilidae) и комары-долгоножки (Tipulidae).

Личинки пилильщиков (надсемейство Tenthredinoidea). Редко и единично.

Личинки бабочек (Lepidoptera) относительно редки и представлены видами семейства совок (Noctuidae), реже пяденицы (Geometridae).

Среди моллюсков (Mollusca) доминировали слизни *Arion subfuscus* (Draparnaud, 1805); раковинные моллюски *Vallonia pulchella* (Muller, 1774) и *Euconulus fulvus* (Muller, 1774) обнаружены в единичных экземплярах.

Динамика численности и биомассы мезофауны (рис. 1–4). Значения общей численности и биомассы мезофауны для пробных площадей в 2005 и 2006 гг. статистически значимо не различались ($p = 0.142$ и $p = 0.960$ соответственно), несмотря на климатическую разницу этих лет: если 2005 г. был в целом теплым и влажным, то 2006 г. более холодным и сухим. Разница в увлажнении отразилась на мощностях подстилки: в более су-

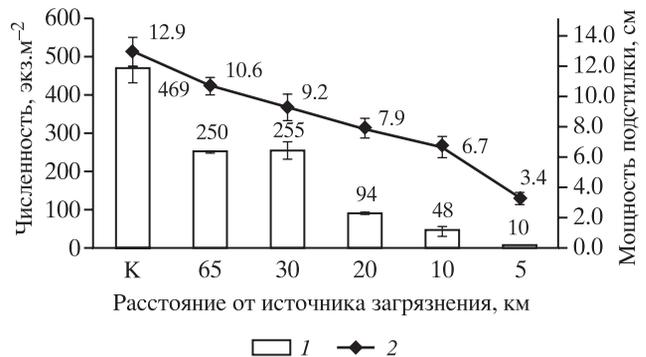


Рис. 1. Численность мезофауны и мощность подстилки на разном расстоянии от источника загрязнения: 1 – численность, 2 – мощность подстилки, К – контроль.

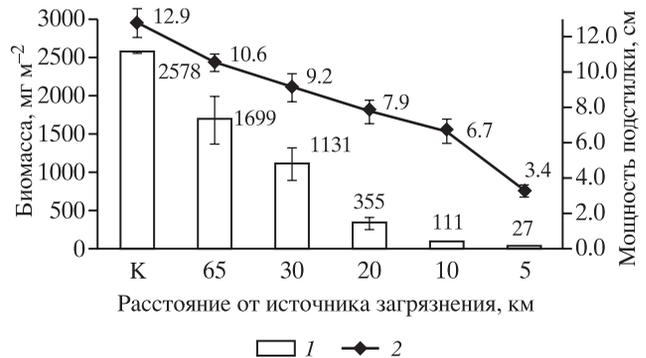


Рис. 2. Численность мезофауны и мощность подстилки на разном расстоянии от источника загрязнения: 1 – биомасса, 2 – мощность подстилки, К – контроль.

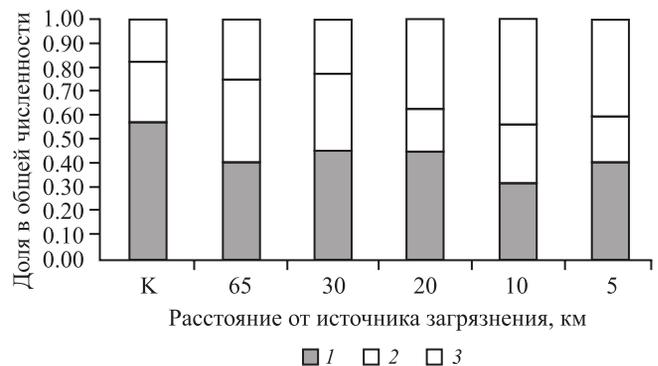


Рис. 3. Соотношение групп в общей численности мезофауны: 1 – пауки, 2 – жуки, 3 – остальные группы, К – контроль.

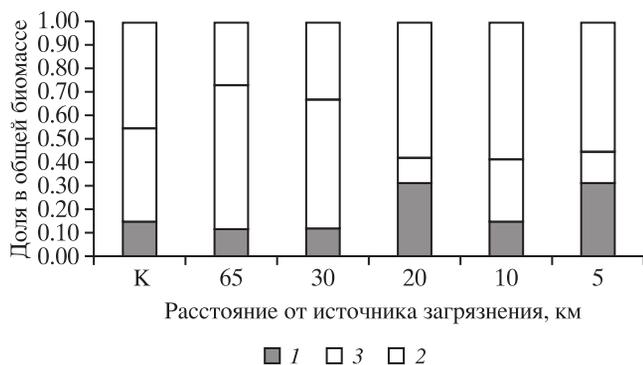


Рис. 4. Соотношение групп в общей биомассе мезофауны: 1 – пауки, 2 – жуки, 3 – остальные группы, К- контроль.

хой 2006 г. ее толщина на площадках была в среднем на 2 см меньше, чем в 2005 г., различия статистически значимы ($p = 10^{-6}$).

Население почв демонстрирует четкую тенденцию резкого падения показателей численности и биомассы по направлению к источнику загрязнения. Так, с 30- до 5-километровой зоны численность мезофауны снижается в 26 раз, а ее биомасса в 42 раза (различия значений показателей обилия по площадкам статистически значимы табл. 2). Эти данные хорошо согласуются с цифрами, приведенными в работе Т.В. Черненьковой с соавт. [28] для 1991–1992 гг., отметившими в

этом же диапазоне падение общей численности в 20, а биомассы в 38 раз.

На ближайшем к комбинату пробном участке (техногенная пустошь, 5 км от источника загрязнения) подстилка как таковая практически отсутствует. Поверхность грунта оголена, повсюду присутствуют делювиальные россыпи мелких камней, в микропонижениях скапливается сухой опад и ветошь. Местами грунт покрыт пятнами тонкой (1–2 см) и очень плотной “коркой” мха *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb., не пригодной для обитания мезофауны. Животное население пустоши на месте пораженного ельника крайне бедно и представлено лишь хищниками-герпетобионтами – клопами, пауками и жуками-стафилинами, т.е. группами, легко расселяющимися и быстрее других занимающими “пустые” ниши. Показатели численности и биомассы мезофауны крайне малы: 10 экз. m^{-2} и 27 $mg\ m^{-2}$. Само понятие “почвенная мезофауна” для данного участка применимо лишь условно, так как почвы (подстилки) здесь практически нет, а население беспозвоночных животных составляют лишь поверхностно активные формы.

Подстилка на участке, удаленном от комбината на 10 км (отмерший ельник), хоть и составляет в среднем 6.7 см, но сложена лишь остатками валежа елей и сухими частями кустарничков (главным образом *Empetrum*), без участия живых мхов и ли-

Таблица 2. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показателей обилия почвенной мезофауны и мощности подстилки за 2005 и 2006 гг.

Фактор	Квадрат суммы	Ошибка	Средний квадрат	Ошибка	Число степеней свободы	F	p
Численность							
Участок	9264.8		1853.0		5	73.14	10^{-6} *
Год	55.1	2128.2	55.1	25.33	1	2.19	0.142
Взаимодействие факторов	95.1		19.0		5	0.75	0.588
Биомасса							
Участок	3233262.5		64472.5		5	17.66	10^{-6} *
Год	8.5	306584.3	8.5	3649.8	1	0.002	0.960
Взаимодействие факторов	9694.4		1938.9		5	0.53	0.752
Подстилка							
Участок	870.5		174.1		5	24.17	10^{-6} *
Год	48.9		48.9		1	6.79	0.01*
Взаимодействие факторов	47.8	604.91	9.53	7.20	5	1.32	0.26

* Значимые действия факторов.

Примечание. F – значение критерия Фишера, p – статистическая вероятность события.

шайников. Спектр доминирующих групп мезофауны такой же, как и в техногенной пустоши: клопы, пауки, жуки-стафилины, но здесь уже встречаются (хотя и единично) многоножки, личинки мух, а среди жуков – хищные личинки жуков-мягкотелок (*Cantharidae*). В составе пауков появляются представители семейства пигмеев (*Linyphiidae*) – мелких подстилочных обитателей с мягкими покровами, более требовательных к влажности местообитания, чем герпетобионтные формы. Значения численности и биомассы по сравнению с предыдущим участком возрастают почти в 5 раз, но тем не менее они на порядок ниже, чем на контрольном участке. В 2005 и в 2006 гг. доля пауков и жуков в общей численности мезофауны была примерно одинакова и составила 32 и 34%, 27 и 22% соответственно, доля же клопов в эти годы существенно различалась: в 2005 г. эта группа составила 23% численности, в следующем году 39%. Структура населения, выраженная через биомассу, также существенно менялась. В 2005 г. биомасса пауков, жуков и многоножек составила 19, 33 и 30%, в 2006 г. 70% биомассы пришлось на клопов, жуки составили 21, пауки 11%, а многоножки в пробах не отмечены вовсе. Такие резкие колебания численности и биомассы характерны для нестабильных сообществ, находящихся или в глубоко угнетенном состоянии, или на начальных стадиях сукцессии [14].

Ельник с развитым кустарничковым ярусом сохранился на участке, удаленном от комбината на 20 км. Несмотря на то что обитаемый слой здесь в среднем лишь на 1 см толще, чем на предыдущей пробной площадке, значения численности и биомассы мезофауны значительно выше. Связать это можно с появлением в составе подстилки мха *Barbilophozia*, даже незначительная доля участия которого в проективном покрытии (8%) привела к изменению структуры подстилки и режима влажности и как следствие к удвоению показателей численности и биомассы. На этом участке впервые появляются личинки бабочек (*Noctuidae*) и цикадки (*Cicadellidae*). Пауки из группы доминирующих таксонов выходят в супердоминанты, составляя 45% численности всей мезофауны, и далее по мере удаления от комбината своего лидирующего положения не теряют. Увеличение показателей обилия и разнообразия населения пауков произошло в основном за счет пауков-пигмеев подсемейства *Erigoninae* – типичных обитателей моховой дернины. Структура населения, выраженная в соотношении численности групп, в 2005 и 2006 гг. очень близка; по степени убывания процента участия в населении: пауки (47 и 44%), жуки (20 и 16%), клопы (9.5 и 6.2%). Струк-

тура населения с учетом биомассы групп в 2005 и в 2006 гг., также сходна за исключением того, что в 2005 г. была зафиксирована высокая доля биомассы личинок мух (30% общей биомассы), в 2006 г. эту долю составили личинки бабочек. Эти две группы насекомых часто демонстрируют значительные колебания по годам, и их считают “временными” изменяющимися компонентами структуры населения.

На следующем по удалению участке (30-й км) впервые наблюдается сформированный моховой покров. Наличие моховой дернины, очевидно, является решающим биотическим фактором в формировании комплекса мезофауны, сходного с таковым в ненарушенных местообитаниях. Показатели численности и биомассы по сравнению с предыдущим участком (20 км) возрастают в 3 раза. Именно здесь, в трансектном ряду ельников, впервые появляются дождевые черви – один из ведущих компонентов почвенной фауны, а спектр и соотношение групп (как таксономических, так и трофических) близки к таковым на самом удаленном от источника загрязнения участке (65-й км) и на контрольной площадке. Доминантами по численности на участке 30-й км являются пауки, причем в 2005 г. они поделили первенство с жуками (40 и 38% от общей численности), в 2006 г. пауки составили 52%, оставив на долю жуков лишь 26%. В структуре населения с учетом биомассы картина обратная: в 2005 и 2006 гг. жуки составили 56 и 52% соответственно, и по мере удаления от комбината эта группа мезофауны удерживает доминирующее положение по биомассе. Плотность дождевых червей на данной площадке в 2005 и 2006 гг. была невысокой и составила всего 2 и 4 экз. м⁻², а их биомасса варьировала от 12% общей биомассы в 2005 г. до 22% в 2006 г. Эти значения далеки от тех, какие обычно показывают дождевые черви в более южных лесных и луговых сообществах, где их биомасса может составлять до 70–80% от всей биомассы почвенных беспозвоночных [4, 6, 24, 30].

Все показатели численности и биомассы как мезофауны в целом, так и отдельных таксономических групп на участке 65-й км очень близки к таковым на 30-м км. Здесь также по численности доминируют пауки (однако первенство с жуками они поделили не в 2005 г., а в 2006 г.); что же касается биомассы, то, как и на участке 30-й км, жуки здесь также значительно преобладают – их доля варьирует в пределах 60–70%.

Ельник, расположенный вблизи северо-западной оконечности Лапландского заповедника на удалении 80 км от комбината и находящийся в сто-

роне от поллютантного следа, выбран нами в качестве контрольного участка. Несмотря на то что пробная площадка была заложена в аналогичных ландшафтных условиях и все почвенные и геоботанические показатели соответствовали ельнику на участке 65-й км, мы получили здесь существенно иные значения показателей обилия. Общая численность и биомасса мезофауны в 2005 г. была вдвое выше, чем на участке 65-й км, хотя набор, спектр и доля участия основных групп почвенной мезофауны примерно одинаковые. В 2006 г. значения численности и биомассы мезофауны в ельнике Лапландского заповедника превышали аналогичные показатели на участке 65-й км в 1.7 и 1.3 раза. Толщина обитаемого слоя на контрольном участке всего на 18% больше, чем на участке 65-й км, и на 30%, чем на участке 30-й км. Хотя в абсолютных величинах прирост мощности не велик (2.3 и 3.7 см), вероятно, именно он привел не только к резкому скачку численности и биомассы, но и к увеличению видового разнообразия, особенно заметному у пауков. Так, в ельнике Лапландского заповедника в 16 пробах (за 2 года) обнаружено 39 видов пауков, тогда как на 65- и 30-м км – 18 и 19 видов. Хорошо сформированный, мощный и нефрагментированный моховой покров существенно сглаживает колебания неблагоприятных факторов и увеличивает емкость среды для почвенных беспозвоночных.

Трофическая структура населения мезофауны (рис. 5). Воздействие комбината существенным образом меняет трофическую структуру населения мезофауны ельников. Особенно это выражено на ближайших к комбинату участках – на 5- и 10-м км, частично на 20-м км. На этих трех пробных площадках господствуют зоофаги, что характерно для временных пионерных сообществ, постоянно пополняющихся за счет легко мигрирующих хищных групп. Начиная с 30-километровой зоны трофическая структура почвенной мезофауны северотаежных ельников приближается к структуре слабонарушенных или ненарушенных сообществ. На участках 30- и 65-й км спектр трофических групп практически одинаков: половину биомассы составляют животные со смешанным типом питания – миксофаги, которые в зависимости от наличия/отсутствия и доступности пищевого субстрата могут менять свои трофические предпочтения; 30–35% – зоофаги, остальная часть приходится на фито- и сапрофагов примерно в равных долях. Трофическая структура населения мезофауны контрольного ельника (Лапландский заповедник) отличается от последних двух. Здесь участие зоофагов, сапрофагов и миксофагов составляет по 30%, на долю фитофа-

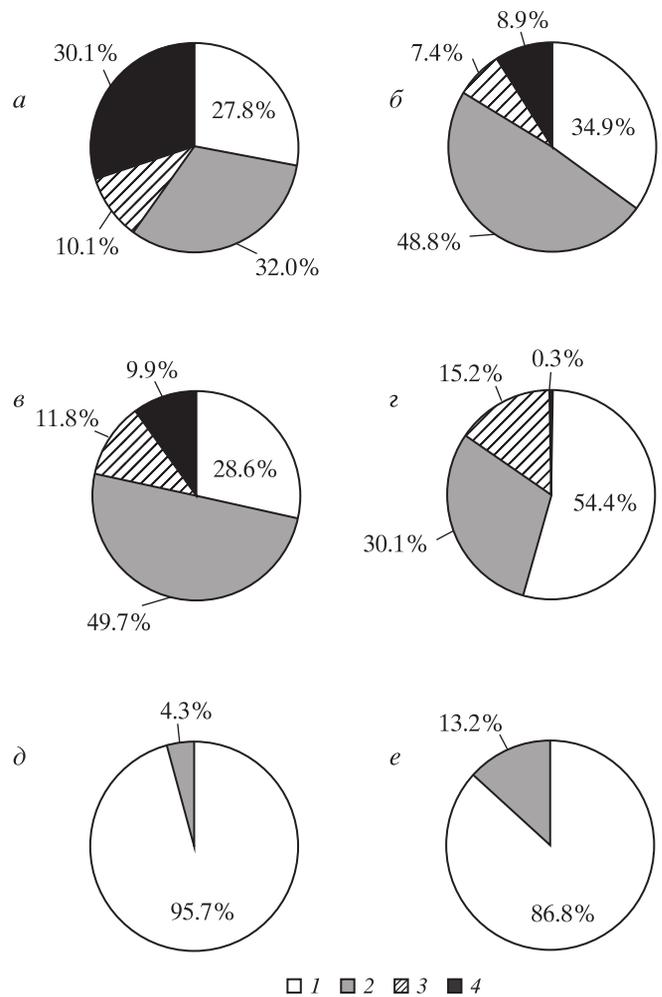


Рис. 5. Трофическая структура комплексов мезофауны: а – контроль, б – 65 км, в – 30 км, з – 20 км, д – 10 км, е – 5 км; 1 – зоофаги, 2 – миксофаги, 3 – фитофаги, 4 – сапрофаги.

гов всего 10%. На рис. 5 наглядно показана деградация трофической структуры мезопедобионтов по мере приближения к источнику загрязнения: последовательно уменьшается доля сапрофагов и фитофагов, вплоть до их полного исчезновения в 10-километровой зоне; удельный вес хищников, напротив, растет, достигая 85% и более от общей биомассы на участках, подверженных сильному воздействию комбината.

Связь мезофауны с проективным покрытием мхов и кустарничков. Из целого ряда биотических факторов, влияющих на состояние почвенной мезофауны, несомненно, ведущим является наличие развитого мохового покрова, сложенного зелеными мхами. Как показывает многолетний опыт почвенно-зоологических исследований авторов данной статьи, именно зеленые (в нашем случае *Pleurozium*, *Hylocomium* и *Dicranum*), а не

политриховые мхи создают благоприятные условия для беспозвоночных, так как плотная структура последних не предоставляет достаточного жизненного пространства, необходимого для комфортного существования многих групп членистоногих животных, в первую очередь основных доминантов – пауков и жуков, в силу особенностей своей биологии предпочитающих рыхлую структуру субстрата с достаточной влажностью. Наличие мохового покрова (начиная с 30 км от комбината) определяет всплеск численности, биомассы и таксономического разнообразия, а также появление новых значимых групп, в частности дождевых червей. По мере удаления от источника загрязнения растет мощность подстилки, а с ней – численность и биомасса мезофауны (рис. 1,2). Показатели обилия мезофауны напрямую зависят от мощности подстилки (т.е. толщины обитаемого слоя), что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции Спирмена (табл. 2, 3). Что касается связи проективного покрытия кустарничков и мхов (ППМ) с величинами численности и биомассы, то выявлена тесная связь лишь с ППМ. Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что наличие мохового слоя, его мощность и величина проективного покрытия – ведущие факторы распределения мезофауны в исследованных ельниках, поэтому ожидание восстановления комплекса почвенной биоты следует связывать в первую очередь с возобновлением и развитием именно мохового покрова.

Таблица 3. Корреляция между показателями обилия мезофауны и проективным покрытием кустарничков и мхов, а также мощностью подстилки

Показатель обилия мезофауны	Коэффициент корреляции Спирмена		
	проективное покрытие		мощность подстилки
	кустарнички	мхи	
Численность	0.58	0.72	0.85
Биомасса	0.55	0.79	0.78

Многолетняя динамика мезофауны в зоне поллютантного воздействия. Наши исследования 2005 и 2006 гг. велись на тех же самых участках, на которых проводились аналогичные геоботанические и почвенно-зоологические работы в 1991–1992 гг., что позволяет сравнить состояние почвенной мезофауны 14-летней давности с современным. Особый интерес вызывает тот факт, что с 1992 г. произошло многократное (более чем в 5 раз) снижение объемов выбросов комбината “Североникель”, и окружающие природные комплексы уже в течение 14 лет развиваются в усло-

Таблица 4. Многолетняя динамика показателей обилия мезофауны

Период исследований	Удаление от комбината, км			
	30	20	10	5
Численность, экз. м ⁻²				
1991–1992*	203	88	28	10
2005–2006**	255	94	48	10
Биомасса, мг м ⁻²				
1991–1992*	1125	545	104	30
2005–2006**	1131	355	111	27

* По [28].

** Оригинальные данные.

виях многократно сниженной поллютантной нагрузки. В табл. 4 приведены данные предыдущих лет и результаты наших исследований.

Как видно из табл. 4, значения общей численности и биомассы двух периодов исследований очень близки между собой. Различия в показателях статистически не значимы ($p = 0.205$); тренд снижения общей численности и биомассы по мере приближения к комбинату сохранился. Детальное сравнение наших данных, с данными, полученными предыдущими исследователями [28], показало, что за прошедшие 14 лет не произошло заметных изменений ни в таксономической, ни в трофической структурах населения мезофауны; неизменными остались группы и виды-доминанты, доля их участия в биомассе и численности. Не изменился и характер дигрессионной тенденции по мере приближения к комбинату.

Таким образом, исследования показывают, что восстановительной динамики комплекса почвенной мезофауны за 14 лет существования в условиях многократно сниженного поллютантного пресса не наблюдается. Внутри 30-километровой зоны сообщество почвенных беспозвоночных животных находится в стабильно угнетенном состоянии. Ситуация сдвинется в положительную сторону, возможно, лишь вслед за существенными сдвигами в восстановительной динамике растительности, в первую очередь с появлением и развитием мохового покрова. Подстилка как компонент почвы очень инертна к внешним воздействиям, и ее реакция на оздоровление среды значительно более медленная, чем у растительных компонентов сообщества, положительную динамику которых удалось уловить [27, 29]. Как показывают исследования, на восстановление сообщества почвенных беспозвоночных обычно уходят десятилетия [2, 3, 16].

Выводы. 1. На ближайшем к комбинату участке (5 км) почвенное население практически полностью деградировало. Внутри 20-километровой зоны почвенная мезофауна находится в крайне угнетенном состоянии и характеризуется отсутствием в составе населения многих таксономических групп, сменами доминантов, а также чрезвычайно низкими показателями численности и биомассы. За пределами 30-километровой зоны состав и структура мезофауны по большинству показателей приближаются к населению ненарушенных природных сообществ.

2. Из биотических факторов, влияющих на состояние почвенной мезофауны, ведущим является наличие мохового слоя, его мощность и величина проективного покрытия. Наличие моховой дернины, даже маломощной и фрагментированной, ведет к скачку численности, биомассы, таксономического разнообразия и появлению новых ценоотически значимых групп.

3. Доминирующей группой по численности и таксономическому разнообразию на всем трансекте являются пауки, причем начиная с 20-го км эта группа в среднем составляет почти половину численности всей мезофауны. В биомассе ведущую роль играют жуки (имаго и личинки): при наличии моховой дернины (с 30-го км) эта группа доминирует, составляя 50% и более от общей биомассы. Доля пауков значительна и колеблется в пределах 15–30%; на дождевых червей приходится 15–25% биомассы мезофауны.

4. Наиболее толерантны к загрязнению хищные группы беспозвоночных животных – пауки, многоножки и жуки-стафилины, встречающиеся в зоне с максимальной степенью загрязнения; наименее толерантны моллюски и дождевые черви (т.е. сапрофитофаги и сапрофаги), встречающиеся в исследованных ельниках не ближе, чем за 30 км от комбината.

5. Несмотря на снижение в пять раз общего количества техногенных выбросов металлургического комбината за последние 14 лет, его негативное влияние на почвенное население по-прежнему значительно. Никакой восстановительной динамики мезофауны не наблюдается. Внутри 30-километровой зоны сообщество почвенных беспозвоночных находится в стабильно угнетенном состоянии; восстановительный процесс возможен лишь вслед за восстановлением мохового покрова.

* * *

Авторы выражают искреннюю благодарность аспиранту М.П. Шашкову (ЦЭПЛ РАН) и студентке Т.В. Галинской (МГУ) за помощь в проведении полевых работ, А.Б. Рывкину (Норский ГПЗ), Е.М. Веселовой (МГУ) и В.В. Семенову (ИМПитМ ММА) за определение жуков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воробейчик Е.Л.* О влиянии техногенных эмиссий фтора на животное население почвы // Очерки по экологической диагностике. Свердловск. Изд-во УрГУ, 1991. С. 75–81.
2. *Воробейчик Е.Л.* Изменение мощности лесной подстилки в условиях химического загрязнения // Экология. 1995. № 4. С. 278–284.
3. *Воробейчик Е.Л.* Население дождевых червей (Lumbricidae) лесов Среднего Урала в условиях загрязнения выбросами медеплавильных комбинатов // Экология. 1998. № 2. С.102–108.
4. *Гиляров М.С.* Почвенные беспозвоночные как компоненты биогеоценозов // Журн. общей биологии. 1965. Т. 26. № 3. С.276–289.
5. *Гиляров М.С.* Зоологический метод диагностики почв. М.: Наука, 1965. 278 с.
6. *Гиляров М.С.* Почвенный ярус биогеоценозов суши // Усп. совр. биологии. 1968. Т. 66. № 1. С. 121–136.
7. *Гиляров М.С.* Зоологический метод диагностики почв. М.: Наука, 1969. 277 с.
8. *Гиляров М.С., Стриганова Б.Р.* Учет крупных беспозвоночных (мезофауна) // Количественные методы в почвенной зоологии. М.: Наука, 1987. С. 9–26.
9. *Зенкова И.В.* Мезофауна почв Кольского полуострова, загрязненных тяжелыми металлами // Актуальные проблемы биологии: Тез. докл. V Молодежной научн. конф., Сыктывкар, 14–16 апреля 1998 г. / Под ред. Головки Т.К. Сыктывкар: Изд-во КомиНЦ УрО РАН, 1998. С. 73.
10. *Зенкова И.В.* Состояние почвенной мезофауны в зоне воздействия комбината “Североникель” // Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия. Тез. докл. Всерос. совещ. и выездной научн. сессии, Апатиты, 22–25 июня 1998 г. / Под ред. Израэля Ю.А., Калабин Г.В. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. С. 175–177.
11. *Зенкова И.В.* Структурные изменения комплексов почвообитающих беспозвоночных животных в зонах промышленного загрязнения // Структурно-функциональные особенности биосистем Севера (особи, популяции, сообщества). Матер. конф., Петрозаводск, 26–30 сентября 2005 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского гос. ун-та, 2005. Ч. 1. С. 130–133.
12. *Зенкова И.В., Валькова С.А.* Изменение комплекса беспозвоночных-сапрофагов вдоль градиента загрязнения почв выбросами алюминиевого завода // Современные проблемы загрязнения почв. Сб. матер. II Междунар. научн. конф. Москва, МГУ, 28 мая–1 июня 2007 г. М.: Изд-во МГУ, 2007. Т. 1. С. 358–362.
13. *Катаев Г.Д.* Оценка состояния сообщества млекопитающих северотаежных экосистем в окрестностях предприятия по производству никеля // Экология. 2005. Т.36. № 6. С. 460–465.
14. *Кашикарров Д.Н.* Основы экологии животных. М.; Л.: Учпедгиз. 1945. 383 с.
15. *Конева Г.Г.* Изучение почвенной мезофауны в окрестностях металлургического комбината “Се-

- вероникель” // Аэрозагрязнение на Кольском полуострове: Тр. Междунар. совещ., 14–16 апреля 1993 г., Санкт-Петербург. СПб.: Изд-во СПбГУ. 1993. С. 362–364.
16. *Криволицкий Д.А.* Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 272 с.
 17. *Новиков Г.А.* Условия обитания животных в горных районах Кольского полуострова // Животный мир СССР. 1958. М.; Л., Изд-во ЗИН СССР. Т. 5. С. 515–575.
 18. *Россолимо Т.Е., Рыбалов Л.Б.* Распределение жу-желиц по высотнo-ландшафтнoм поясам Хибин // Взаимодействие организмов в тундровых экосистемах. Матер. совещ. Воркута. Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО АН СССР, 1989. С. 27–28.
 19. *Рыбалов Л.Б., Рыбкин А.В.* Экологическая оценка воздействия металлургических комбинатов на различные компоненты экосистем северо-запада Кольского полуострова // География и региональная политика. Матер. Междунар. научн. конф. Смоленск: Изд-во СГУ, 1997. С. 304–306.
 20. *Рыбалов Л.Б., Рыбкин А.В.* Экологическая ситуация на северо-западе Кольского полуострова и возможные пути перехода к устойчивому развитию // Ландшафтная экология. Межвуз. сб. науч. тр. Московского гос. обл. пед. ун-та. М.: Альфа, 1999. С. 67–77.
 21. *Степанов А.М., Кабилов Р.Р., Черненкова Т.В.* Изменение биологической активности почв северо-таежных лесов при антропогенном воздействии // Биология почв Северной Европы. М.: Наука, 1988. С. 205–214.
 22. *Степанов А.М., Черненкова Т.В., Верещагина Т.Н., Безукладова Ю.О.* Оценка влияния техногенных выбросов на почвенных беспозвоночных и растительный покров // Журн. общ. экологии. 1991. Т. 52. № 5. С. 699–707.
 23. *Стриганова Б.Р.* Почвенная фауна северного побережья Кольского полуострова. Экология почвенных беспозвоночных. М.: Наука, 1973. С. 75–84.
 24. *Стриганова Б.Р., Порядина Н.М.* Животное население почв бореальных лесов Западносибирской равнины. М.: КМК, 2005. 234 с.
 25. *Тихомиров Б.А.* Об условиях обитания дождевых червей в тундровых почвах // Природа. 1937. № 5. С. 52–58.
 26. *Фридолин В.Ю.* Животно-растительное сообщество горной страны Хибин // Тр. Кольской базы АН СССР, № 3. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. 296 с.
 27. *Черненкова Т.В.* Мониторинг лесных экосистем, находящихся в условиях техногенной нагрузки // Актуальные проблемы геоботаники. III Всерос. школа-конференция. Ч. 2. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2007. С. 285–288.
 28. *Черненкова Т.В., Бутусов О.В., Сычев В.В., Конева Г.Г., Кабилов Р.Р., Степанов А.М., Куперман Р.Г., Катаев Г.Д.* Воздействие металлургических производств на лесные экосистемы Кольского полуострова. СПб.: Изд-во Родники, 1995. 252 с.
 29. *Черненкова Т.В., Котлов И.П., Бочкарев Ю.Н., Козлова М.А.* Дендроиндикация атмосферного загрязнения // Новые методы в дендрoэкологии. Матер. Всерос. науч. конф. с международным участием. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2007. С. 17–20.
 30. *Чернов Ю.И.* Природная зональность и животный мир суши. М.: Мысль, 1975. 224 с.
 31. *Rybalov L.B., Rossolimo T.E.* Landscape and altitude distribution of invertebrate complexes in two subarctic regions of Russia // Northern Wilderness Areas: Ecology, Sustainability, Values. 1995. International Conference on Northern Wilderness Areas, December 7–9, 1994. Rovaniemi, Finland. University of Lapland, Arctic Centre. P. 421–431.
 32. *Zenkova I.V.* Changes of the invertebrate communities under conditions of the soil pollution by heavy metals // Biological basis the study, management and protection of flora, fauna and the soil cover in eastern Fennoscandia: Abstr. International conference and scientific session of the department of general biology of Russian Academy of Sciences, Russia, Petrozavodsk, September 6–10, 1999. Petrozavodsk, 1999. P. 108.

Dynamics of the Soil Macrofauna in Spruce Forests in the Zone Exposed to Technogenic Impact of the Mining Integrated Plant “Severonikel”

A. V. Tanasevitch, L. B. Rybalov, I. O. Kamayev

The long-term dynamics of the soil macrofauna abundance and diversity in northern taiga spruce forests were analyzed along the gradient of aerotechnogenic trail of the mining-and-metallurgical integrated plant “Severonikel” (Murmansk region). Dominant groups were distinguished: spiders predominated by the number and taxonomic diversity; beetles (imago and larvae) determined the biomass of macropedobionts. Among the biotic factors affecting the soil macrofauna, the leading one is the thickness and projective coverage of the moss layer. With approaching the pollution source, the trophic structure of macropedobionts changes: the share of saprotrophs and phytophags decreased up to their complete disappearance; the specific weight of predators, on the contrary, increased up to 85% and more of their total biomass in the areas exposed to very strong effects of “Severonikel”. Despite the reduction in total technogenic emissions (by 5 times) from the metallurgic complex for the last 14 years, their adverse effect on the soil population remains considerable. No regenerative dynamics of the macrofauna was observed.