

## Комплексы почвенных беспозвоночных лесотундры в условиях техногенного загрязнения

И. Н. БЕЗКОВОРАЙНАЯ

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28*

*Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79  
E-mail: birinik-2011@yandex.ru*

### АННОТАЦИЯ

Анализ структуры комплексов почвенных беспозвоночных лесотундровых редколесий в зоне техногенного воздействия предприятий ОАО «ГМК Норильский никель» показал, что по мере удаления от источника загрязнения плотность почвенных беспозвоночных значительно увеличивается. Выявлена зависимость мезо- и микрофауны от концентрации тяжелых металлов (Ni, Co, Cu, Pb) в подстилке. Низкая численность и разнообразие крупных сапрофагов, деградация подстилочного комплекса и усиление пресса хищников и фитофагов свидетельствуют о депрессивном состоянии лесотундровых сообществ, подверженных техногенным воздействиям.

**Ключевые слова:** лесотундровые экосистемы, структура мезофауны и микрофауны, загрязнение тяжелыми металлами.

Почвенная биота, находясь под контролем внешних условий, неизбежно реагирует на происходящие в данный момент времени изменения в почвенной среде. В зависимости от времени, типа и степени воздействия в комплексах почвенных организмов происходят количественные, структурные и функциональные изменения. Реакция почвенных животных на процессы деградации или восстановления нарушенных экосистем на локальном или региональном уровнях является надежным индикатором происходящих не только в почве, но и в экосистеме изменений.

Среди почвенных беспозвоночных можно выделить как количественные, так и аккумулятивные индикаторы техногенного загрязнения среды обитания. Как показывают многочисленные исследования, беспозвоноч-

ные отражают фактическую степень загрязнения экосистем, так как поглощают только подвижные формы элементов и пассивно не загрязняются [Кривошукский, 1994; Beyer et al., 1982; Gestel, 1991]. Несмотря на то, что аккумуляция тяжелых металлов и других токсиантов в биомассе почвенных животных является важным и достаточно информативным показателем, следует отметить ряд трудностей, связанных с выявлением аккумулятивных индикаторов. По мнению отдельных авторов, содержание микроэлементов в беспозвоночных является достаточно дискретным признаком – в особях одного вида, собранных в одной точке и в одно время, может отмечаться значительный разброс концентраций микроэлементов [Ганин, 1997; Haimi, Mätäsniemi, 2002]. Отмечается факт, когда на

освоенных территориях концентрации металлов в биомассе животных могут быть ниже, чем на ненарушенных, что свидетельствует о влиянии на этот признак природных концентраций металлов.

В большинстве случаев загрязнение среды промышленными выбросами действует на почвенных животных не непосредственно, а косвенно: разрушает среду обитания, изменяет кормовую базу, нарушает трофические связи и т. п. Следствием такого опосредованного влияния является перестройка сообщества, уменьшение численности и биомассы у одних беспозвоночных и рост у других, изменение видового состава, переориентация биотических связей и т. д.

В зоне техногенного воздействия предприятий ОАО «ГМК Норильский никель» лимитирующее влияние на жизнь почвенной биоты короткого вегетационного периода, недостатка кислорода в почве и действия многолетней мерзлоты усугубляет тотальное загрязнение среды обитания.

Цель данной работы – оценка структуры комплексов почвенных беспозвоночных лесотундры в условиях хронического загрязнения.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Оценка влияния хронического техногенного загрязнения на состояние комплексов беспозвоночных выполнялась в зоне техногенного воздействия предприятий ОАО «ГМК Норильский никель» в рамках комплексных исследований Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. Исследования проводили на ключевых участках, расположенных в бассейне р. Рыбная (69° с. ш., 88° в. д.), в разной степени удаленных от источника загрязнения. Изучены очень сильно нарушенные экосистемы – в 30 (участок № 1), 56 (№ 2) и в 86 км (№ 3) от источника загрязнения и сильно нарушенные экосистемы – в 106 км (№ 4) от источника загрязнения.

Очень сильно нарушенные экосистемы (участки № 1–3) находятся в зоне полного поражения древесного яруса, представленного усохшими лиственницей и елью. Живой напочвенный покров состоит из злаков, разнотравья и кустарничков. Для участка, рас-

положенного в 86 км от источника загрязнения, характерно наличие подроста ели, лиственницы и березы, сомкнутый живой напочвенный покров представлен хвоецево-шикшево-осочково-кустарничковыми группировками. Участок, расположенный в 106 км от источника, представлен елово-лиственничными редколесьями, доля усохшего древостоя достигает 70 %. При этом наблюдается интенсивное возобновление ели и березы. В формировании живого напочвенного покрова принимают участие багульник (*Ledum palustre*), черника (*Vaccinium myrtillus*), шикша (*Empetrum nigrum*), голубика (*Vaccinium uliginosum*), хвощ (*Equisetum arvense*), мхи, лишайники. На всех участках фитоценозы характеризуются как трансформированные техногенным воздействием.

В качестве фоновых характеристик качественного и количественного состава мезо- и микрофауны использованы данные, полученные на Хантайской исследовательской станции, расположенной в нижнем течении р. Хантайка (68° с. ш., 86° в. д.). Экосистемы представлены елово-лиственничным редколесьем зеленомошного и сфагнового типов леса. Древостои разновозрастные, смешанные, низко- и среднеполнотные V–V<sup>a</sup> классов бонитета [Плешиков и др., 2002]. В напочвенном покрове развит кустарничковый ярус, представленный голубикой, черникой, шикшей. Моховой покров занимает от 80 до 100 % проективного покрытия.

Экосистемы исследованных участков сформированы на криоземах. Отличительной особенностью почв является насыщенность верхнего аккумулятивного горизонта растительными остатками разной степени разложивости и отсутствием признаков оглеения [Краснощеков, 1999]. Надмерзлотные минеральные горизонты имеют ярко выраженные признаки криотурбационных процессов.

В работе дан анализ структуры микро- и мезофауны, представители которых играют ключевую роль в лесных экосистемах. К мезофауне (размер особи >2 мм) отнесены дождевые черви (Lumbricidae), энхитреиды (Enchytraeidae) (учитывались только особи, извлекаемые при ручной разборке проб) и личинки и имаго членистоногих (Arthropoda). Для учета крупных беспозвоночных исполь-

зованы прямые методы, общепринятые в почвенно-зоологических исследованиях: послойный отбор проб с последующей разборкой с использованием колонки почвенных сит [Гиляров, 1997]. На каждой пробной площади образцы (размер 25 × 25 см) отбирались в пятикратной повторности по слоям: подстилка, 0–5 см, 5–10, 10–20 см.

К микрофауне (размер особи <2 мм) отнесены коллемболы (*Collembola*), панцирные (*Oribatei*) и гамазовые (*Gamasina*) клещи. Пробы отбирались буром ( $d = 5$  см) в подстилке, в 0–5 и 5–10 см минеральном слое почвы в 10-кратной повторности. Выгонка проводилась с помощью эклекторов Тулгрена [Дунгер, 1997]. Определение морфо-экологических групп орибатид проводили по Д. А. Криволицкому [1965], коллембол – по С. К. Стебаевой [1970].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из проявлений саморегуляции северных экосистем является формирование мощного кустарничково-лишайникового и мохового покрова и подстилки, когда в прогреваемом и одновременно защищенном от неблагоприятных погодных воздействий ярусе создаются оптимальные условия для существования почвенной биоты. В ненарушенных экосистемах лесотундровых редколесий мощность мохово-лишайниковой подушки колеблется от 10(12) до 20(25) см. По запасам подстилок техногенно нарушенные и естественные экосистемы близки, они составляют 4,8–6,6 кг/м<sup>2</sup>.

Плотность мезофауны в 30 км от источника загрязнения составляет всего 56 экз./м<sup>2</sup> и постепенно увеличивается по мере удаления от источника загрязнения более чем в 5 раз (рис. 1). В почвах фонового участка она значительно превышает таковую в нарушенных экосистемах и составляет 583 экз./м<sup>2</sup>.

Высокая пространственная вариабельность данного показателя (коэффициент вариации (CV) = 26–177 %) обусловлена высокой мозаичностью напочвенного покрова лесотундровых редколесий вследствие чередования форм нано- и микрорельефа. Большинство беспозвоночных криогенных местообитаний тяготеют к возвышенным, дренированным,

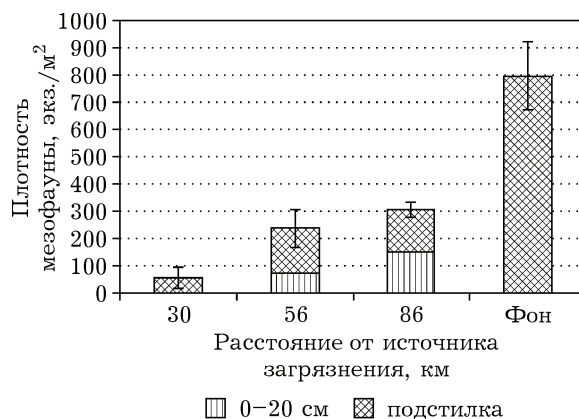


Рис. 1. Плотность мезофауны в местообитаниях, в разной степени удаленных от источника загрязнения. Фон – Хантайская исследовательская станция (здесь и далее)

лучше прогреваемым и ранее освобождающимся из-под снега участкам [Fukuyama et al., 1998].

Близкое залегание мерзлоты (10–25 см) и подстилающих пород (4–30 см) сокращает жизненное пространство для педобиоты в лесотундровых экосистемах. Мерзлота и глубина ее оттаивания определяют структуру вертикального распределения беспозвоночных по почвенному профилю. Основная масса беспозвоночных (70–100 %) обитает в подстилке и в верхнем аккумулятивном слое почвы 0–5(10) см. Концентрация всех групп мезофауны в мохово-лишайниковой дернине и подстилке является следствием слабой и поверхностной аэрации мерзлотных почв. Влияние близкого залегания вечной мерзлоты усиливается теплоизоляционными свойствами мха. По данным С. Г. Прокушкина с соавт. [2002] в почвах северных экосистем температура деятельного слоя находится в прямой зависимости от степени развития теплоизолирующего мохово-лишайникового покрова и мощности подстилки. В насаждениях с мощным развитием мохово-лишайникового покрова биологически активные температуры могут наблюдаться лишь в органогенном горизонте. Гибель древостоя на нарушенных участках загрязнения также способствует лучшему прогреванию подстилки и нижележащих минеральных слоев почвы, что обуславливает значительное проникновение в них крупных беспозвоночных (56 и 86 км от источника).

Групповой состав мезофауны местообитаний в разной степени удаленных от источника загрязнения, экз./м<sup>2</sup>

Группы	Расстояние от источника загрязнения, км			
	30	56	86	фон
Lumbricidae	0	0	0	4
Enchytraeidae	0	56	143	157
Mollusca	0	0	6	1
Lithobiidae	0	2	2	8
Coleoptera l+im*				
Carabidae	5	8	4	9
Staphylinidae	5	17	3	23
Elateridae	3	10	0	0
Curculionidae	0	0	2	0
Cantharidae	0	0	2	9
Diptera l				
Tipulidae	2	5	0	12
Bibionidae	0	0	5	11
Rhagionidae	2	3	10	3
Tabanidae	2	0	0	1
Muscidae	0	0	0	2
Empididae	0	0	0	1
Hymenoptera	2	3	94	0
Aranei	29	25	91	42
Coccoidea	10	107	0	162
Прочие	0	0	0	3

\* l + im – личинки и имаго.

По градиенту снижения загрязнения отмечено незначительное увеличение разнообразия крупных таксонов мезофауны (табл. 1). Лесотундровые сообщества, являясь пограничными между тундровыми и лесными местообитаниями, отличаются присутствием как типичных представителей тундровых сообществ, так и появлением лесных обитателей. Для рассматриваемых местообитаний характерна олигодоминантность – доминируют почвенные червецы (Coccoidea) и энхитреиды (Enchytraeidae).

Энхитреиды являются одной из доминирующих групп детритофагов во влажных и холодных почвах бореального пояса. Распространение этих червей отличается высокой вариабельностью, что обусловлено их повышенной чувствительностью к перепадам влажности [Didden, 1993]. Почвенные червецы являются характерными представителями лесотундровых сообществ [Стриганова, Порядина, 2005].

Трофическая структура педокомплексов беспозвоночных отражает изменение соотношения основных групп в зависимости от удаленности от источника загрязнения (рис. 2). Увеличивается доля сапрофагов с 5 (30 км)

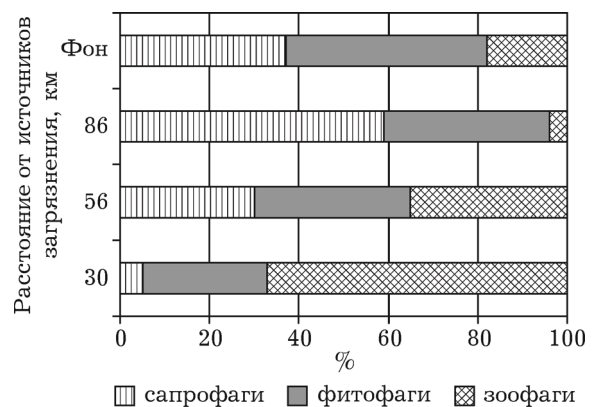


Рис. 2. Трофическая структура мезофауны в местообитаниях, в разной степени удаленных от источника загрязнения

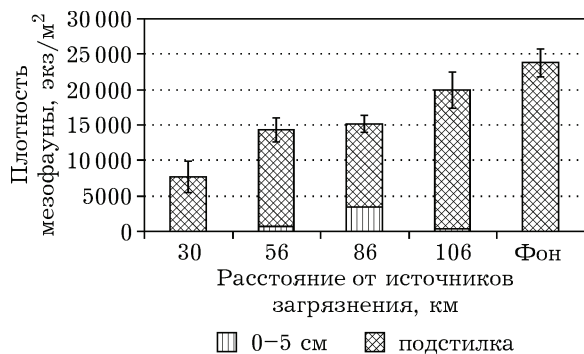


Рис. 3. Плотность микрофауны в местообитаниях, в разной степени удаленных от источника загрязнения

до 59 % (56 км от источника) главным образом за счет увеличения почти в 18 раз численности энхитреид. Снижается доля хищных форм соответственно с 67 до 4 %. Доля фитофагов практически не меняется. Низкая численность и разнообразие сапрофагов, деградация подстилочного комплекса и усиление пресса хищников и фитофагов является индикатором депрессивного состояния лесотундрового сообщества и может рассматриваться как одно из проявлений техногенного фактора. Сохранение в течение длительного времени такого соотношения в трофической структуре сообщества может привести к локальным изменениям в деструкционном блоке биологического круговорота.

Для ненарушенных местообитаний характерно более равномерное распределение долей между трофическими группами и увеличение разнообразия деструкторов: в комплексе появляются дождевые черви, увеличивается разнообразие личинок двукрылых (*Diptera*), которые наряду с энхитреидами игра-

ют важную роль в трансформации органического вещества в криогенных почвах.

Представители микрофауны достаточно хорошо адаптированы к таким жестким условиям среды, как низкие температуры и недостаток или избыток влаги. При обедненности мезофауны и в отсутствие конкуренции за пищевой ресурс мелкие беспозвоночные играют ключевую роль в формировании биологической активности криогенных почв. Для ключевого участка, расположенного в 30 км от источника, плотность почвенных микроартропод составляет 7,6 тыс. экз./м<sup>2</sup>, по мере удаления от источника загрязнения она возрастает в 2–2,5 раза, приближаясь по данному показателю к фоновому местообитанию (рис. 3). Как и крупные беспозвоночные, представители микрофауны имеют высокую вариабельность плотности ( $CV = 47–188\%$ ). Основным местообитанием для них является подстилка.

Для ключевых участков № 1–3, расположенных вблизи источника загрязнения, отмечен сдвиг в соотношении панцирных клещей и ногохвосток. Комплекс характеризуется как “коллемболоидный” – численность коллембол составляет 56–61 % (табл. 2). Толерантность коллембол к загрязнению тяжелыми металлами подтверждается многими авторами [Lock et al., 2003; Gillet, Ponge, 2004]. Доминирование данной группы характерно для моховых местообитаний типичных тундр и лесотундр с высоким уровнем мерзлоты и резкими колебаниями температуры на поверхности почвы. Как известно, многие коллемболы обладают широкой экологической валентностью (особенно по отношению к температурному режиму почвы и пище) и в то же время вы-

Т а б л и ц а 2

Групповой состав микрофауны местообитаний, в разной степени удаленных от источника загрязнения, экз./м<sup>2</sup>

Группы	Расстояние от источника загрязнения, км				
	30	56	86	106	фон
<i>Collembola</i>					
Tomoceridae	346	208	624	104	0
Isotomidae	3619	2857	3585	156	2128
Hypogastruridae	623	676	338	52	407
Onychiuridae	87	779	3351	286	543
<i>Oribatei</i>	2720	247	6518	19 271	15 890
<i>Gamasina</i>	243	2540	702	286	4934



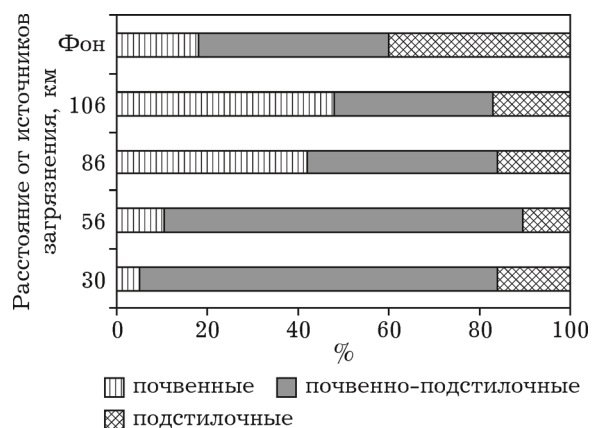


Рис. 4. Экологическая структура комплекса коллембол в местообитаниях, в разной степени удаленных от источника загрязнения

сокой чувствительностью к влажности местообитания. Именно этот фактор, по мнению Н. А. Кузнецовой [2003], должен быть одним из основных, дифференцирующих распределение коллембол в пространстве.

По мере удаления от источника загрязнения среди коллембол меняется долевое соотношение морфо-экологических групп: значительно увеличивается доля почвенных и соответственно снижается доля подстильно-почвенных (рис. 4). Доля подстильных во всех нарушенных местообитаниях одинакова. В почвах ненарушенных местообитаний доминируют подстильные и подстильно-почвенные коллемболы, на них приходится по 40 %. Такое соотношение морфо-экологических групп является типичным для ненарушенных лесных местообитаний с развитой подстилкой.

Для почв ненарушенных лесотундровых редколесий характерно доминирование орибатид (*Oribatei*) (см. табл. 2). Температура почв в условиях сильного зимнего промерзания является фактором, определяющим географическое распространение орибатид. На север проникают преимущественно мелкие формы, способные зимой уходить в толщу гумусового слоя [Криволицкий, 1994]. Анализ морфо-экологической структуры орибатид не выявил зависимости ее разнообразия от степени удаленности и, следовательно, загрязненности местообитаний. Самыми многочисленными практически везде являются опистоидные клещи (90 % от общей численности) – типичные обитатели микротрещин и ходов корней и подстилки в лесных экоси-

стемах. По мере удаления от источника загрязнения незначительно увеличивается разнообразие подстильных клещей (отмечены представители галлюмоидного и карабодоидного типов). Скорее всего, присутствие (или отсутствие) той или иной экологической группы орибатид обусловлено локальными гидротермическими условиями и не отражает степень техногенного воздействия.

По данным Э. Ф. Ведровой [2012], среди всех компонентов растительного происхождения в исследованных местообитаниях максимальным накоплением тяжелых металлов характеризуется подстилка – аккумуляция меди, никеля, свинца и кобальта увеличивается вдоль градиента загрязнения от слабо к очень сильно нарушенным сообществам в 18 раз. Масса элементов, которую сапрофаги пропускают через себя в течение сезона, сравнима с поступлением элементов в почву с растительным опадом [Покаржевский, 1985]. Многими исследователями показано, что для меди, никеля и свинца содержание их в животных не больше, чем в растительном опаде на единицу массы. Коэффициенты концентрации свинца и меди, например, для таких крупных сапрофагов, как дождевые черви, составляют соответственно 5,7 и 8,1 [Beyer et al., 1982]. Сравнительно невелика связь между концентрациями металлов в почве и в таких беспозвоночных, как коллемболы, так как между ними находится целая трофическая цепочка.

Полученные зависимости плотности мезо- и микрофауны от концентрации тяжелых металлов в подстилках ключевых участков отражают косвенное влияние загрязнения на беспозвоночных, через трансформацию их среды обитания (рис. 5). Крупные беспозвоночные показали более тесную зависимость ( $r^2 = 0,64-0,70$ ) от концентрации меди, никеля и свинца, чем микроартроподы ( $r^2 = 0,07-0,23$ ). Концентрация кобальта в подстилках имеет лимитирующее значение для плотности как крупных, так и мелких беспозвоночных ( $r^2 = 0,68-0,81$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ комплексов почвенных беспозвоночных, нарушенных техногенным загрязнением лесотундровых редколесий, выявил зависи-

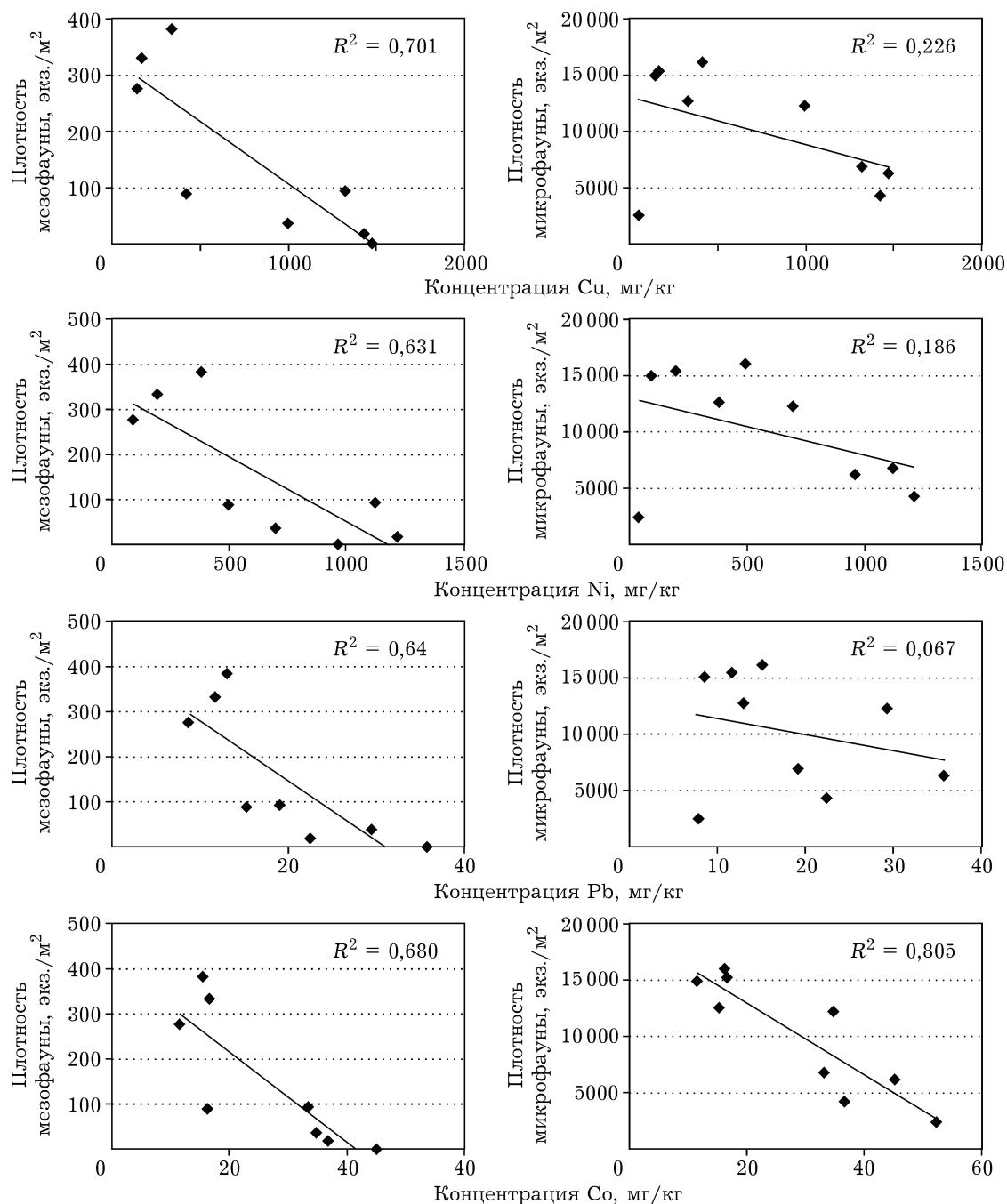


Рис. 5. Зависимость плотности мезо- и микрофауны от концентрации тяжелых металлов в подстилках

мость их плотности от степени техногенного воздействия – она значительно снижается по мере приближения к источнику загрязнения. Низкая численность и разнообразие сапрофагов, деградация подстилочного комплекса и усиление пресса хищников и фитофагов свидетельствует о депрессивном состоянии нарушенных лесотундровых сообществ и локальных нарушениях в деструкционном блоке био-

логического круговорота. Выявленные зависимости плотности мезо- и микрофауны от концентрации тяжелых металлов (Ni, Cu, Pb) в подстилках отражают большую зависимость крупных беспозвоночных от степени трансформации среды обитания при тотальном техногенном загрязнении. Концентрация кобальта имеет лимитирующее значение для плотности всех размерных групп беспозвоночных.

Автор выражает благодарность канд. биол. наук А.В. Пименову за предоставленные материалы геоботанического описания пробных площадей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Ведрова Э. Ф. Биогеохимическая оценка лесных экосистем равнинных территорий Норильско-Хантайского растительного округа // Почвы Сибири. Красноярск, 2012. Вып. 4. С. 50–60.
- Ганин Г. Н. Почвенные животные Уссурийского края. Владивосток; Хабаровск: Дальнаука, 1997. 160 с.
- Гиляров М. С. Учет крупных беспозвоночных (мезофауна) // Количественные методы в почвенной зоологии. М.: Наука, 1997. С. 9–26.
- Дунгер В. Учет микроартропод (микрофауна) // Количественные методы в почвенной зоологии. М.: Наука, 1997. С. 26–51.
- Краснощечков Ю. Н. Микроэлементы в криоземах предтундровых лесов Приенисейской Сибири // Почвоведение. 1999. № 12. С. 1455–1462.
- Кривоуцкий Д. А. Морфо-экологические типы панцирных клещей (Acariformes, Oribatei) // Зоол. журн. 1965. Т. XLIX, вып. 8. С. 1176–1189.
- Кривоуцкий Д. А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 272 с.
- Кузнецова Н. А. Влажность и распределение коллембол // Зоол. журн. 2003. Т. 82, № 2. С. 239–247.
- Плешиков Ф. И., Каплунов В. Я., Токмаков С. В., Беньков А. В., Титов С. Д., Первунин В. А. Структура фитомассы и годичная продукция северных лесов // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 73–83.
- Покаржевский А. Д. Геохимическая экология наземных животных. М.: Наука, 1985. 300 с.
- Прокушкин С. Г., Абаимов А. П., Прокушкин А. С. Температурный режим в листовничниках на мерзлотных почвах // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 34–45.
- Стебаева С. К. Жизненные формы ногохвосток (Collembola) // Зоол. журн. 1970. Т. 49, вып. 10. С. 1437–1455.
- Стриганова Б. Р., Порядина Н. М. Животное население почв бореальных лесов Западно-Сибирской равнины. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2005. 234 с.
- Beyer W. N., Chaney R. L., Mulhern B. M. Heavy metal concentrations in earthworms from soil amended with sewage sludge // J. Environ. Qual. 1982. Vol. 11. P. 381–385.
- Didden W. A. M. Ecology of terrestrial Enchytraeidae // Pedobiologia. 1993. N 37. P. 2–29.
- Fukuyama K., Aversky A. I., Maximov T. C., Isaev A. P., Takahashi K. Soil micro-arthropods in a Siberian permafrost area at 1 year and 5 years after wild fire // Proc. of the sixth symp. on the joint Siberian permafrost studies. Tsukuba, Japan, 1998. P. 107–111.
- Gestel C. A. Earthworms in ecotoxicology. Amsterdam: Free Univ. Press., 1991. 197 p.
- Gillet S., Ponge J.-F. Are acid-tolerant Collembola able to colonise metal-polluted soil? // Appl. Soil Ecol. 2004. N 26. P. 219–231.
- Haimi J., Mätäsniemi L. Soil decomposer animal community in heavy-metal contaminated coniferous forest with and without liming // Europ. Journ. Soil Biol. 2002. N 38. P. 131–136.
- Lock K., Janssens F., Janssen C. R. Effects of metal contamination on the activity and diversity of springtails in an ancient Pb-Zn mining area at Plombières, Belgium. // Ibid. 2003. N 39. P. 25–29.

## The Forest-Tundra Soil Invertebrate Communities under Conditions of Technogenic Pollution

I. N. BEZKOROVAYNAYA

*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS,  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28*

*Siberian Federal University  
660041, Krasnoyarsk, Svobody ave., 79  
E-mail: birinik-2011@yandex.ru*

The study of soil invertebrate communities in the forest-tundra area under technogenic pollution showed that the further from the pollution source the higher the density of soil invertebrates. Dependence of meso- and macrofauna on the concentration of heavy metals (Ni, Co, Cu, Pb) in forest litter was revealed. Low density and diversity of large saprophages, degradation of litter invertebrate complex and increasing abundance of predators and phytophagous species indicated the depressed state of forest-tundra ecosystems affected by anthropogenic impact.

**Key words:** forest-tundra ecosystems, structure of meso- and macrofauna, heavy metal pollution.