

УДК 631.468: 591.9 (470.13)

Почвенные беспозвоночные в индикации состояния хвойных лесов в районе выбросов сыктывкарского лесопромышленного комплекса

© 2012. М. М. Долгин, д.б.н., зав. отделом, А. А. Колесникова, к.б.н., с.н.с., Т. Н. Конакова, аспирант, А. А. Таскаева, к.б.н., н.с., Е. Н. Мелехина, к.б.н., с.н.с. Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, e-mail: kolesnikova@ib.komisc.ru

Проведённый анализ результатов многолетних исследований (2002–2010 гг.) почвенной фауны в еловых и сосновых лесах выявил изменения структурных параметров комплексов беспозвоночных в районе выбросов крупнейшего в европейской части России целлюлозно-бумажного предприятия – Сыктывкарского лесопромышленного комплекса (СЛПК). У орибатид при приближении к предприятию существенно снижались видовое разнообразие и численность, происходило изменение структуры доминирования и наблюдалось обеднение населения поверхностных обитателей. Для населения коллембол ельников черничных характерно увеличение видового разнообразия и численности при среднем уровне загрязнения; для сообществ коллембол сосняков черничных очевидны структурные изменения, проявляющиеся в сокращении численности и видового разнообразия, в изменении соотношения жизненных форм по мере приближения к предприятию. Нарушения структурной стабильности сообществ почвенной мезофауны выявлены в середине градиента загрязнения, на импактных участках зарегистрировано повышение разнообразия и численности крупных почвенных беспозвоночных.

The results of soil invertebrates researches of spruce and pine forests in the vicinity of Syktyvkar Timber industry complex – the largest enterprise of paper industry on the European part of Russia, – indicated the changes of structure parameters of soil invertebrate complexes. The specific diversity and number of Oribatei decreased in the vicinity of the enterprise. The change of dominants and impoverishment of population of soil-surface inhabitants among the Oribatei was also observed. The specific diversity and number of Collembola in spruce forests decreased at the middle degree of pollution. The specific diversity and number of Collembola in pine forests decreased in the vicinity of the enterprise. The disturbances of soil macrofauna structure stability were revealed in the center of pollution gradient. The improvement of diversity and number of large soil invertebrates was registered on the impact plots of coniferous forests.

Ключевые слова: Oribatei, Collembola, Lithobiidae, Carabidae, Staphylinidae, структура сообществ, лесопромышленный комплекс

Keywords: Oribatei, Collembola, Lithobiidae, Carabidae, Staphylinidae, structure of communities, Syktyvkar Timber industry complex

Интенсивное развитие промышленности оказывает существенное влияние на состояние природных экосистем. Поэтому изучение почвенных животных с целью их использования в качестве косвенных биологических индикаторов состояния почв представляет несомненное теоретическое и практическое значение [1]. В литературе приводится достаточно много данных по воздействию промышленных выбросов на почвенных беспозвоночных [2 – 7]. Исследования, проведённые в ряде промышленных регионов России, показали, что при загрязнении воздушной среды выбросами металлургических комбинатов, химических предприятий и тепловых электростанций происходит изменение основных структурных параметров почвенной фауны: численности, биомассы, таксономического и трофическо-

го разнообразия, доминирования, пространственного распределения [8, 9]. В результате воздействия выбросов промышленных предприятий упрощается видовой состав и снижается численность мезофауны в окрестностях источника эмиссии [10 – 17]. Микроартроподы при высоком уровне загрязнений, напротив, увеличивают численность сообществ и плотность популяций отдельных видов [18, 19]. Требования к условиям среды обитания у разных видов и групп почвенных беспозвоночных обуславливают их разнообразные реакции на загрязнение почвы. Особенности структуры их сообществ отражают изменения широкого спектра почвенно-экологических факторов, что делает этих беспозвоночных ценным объектом при осуществлении биоиндикационных исследований [20].

Материал и методика

Сыктывкарский лесопромышленный комплекс (СЛПК) находится на территории Республики Коми (61°49' с.ш. и 50°44' в.д.) и функционирует с 1969 г. [21]. В состав выбросов предприятия входят оксиды серы и азота, сероводород, сернистый ангидрид, минеральная пыль, содержащая карбонаты и сульфиды кальция и натрия. Содержание твердых загрязняющих веществ в районе г. Сыктывкара превышает фоновые показатели в 4,4 раза, SO₂ – 3,3, CO₂ – 6,4, оксидов азота – 3, прочих веществ – в 19 раз. Уровень загрязнения H₂S незначителен, однако в воздухе повышено содержание метилмеркаптана и формальдегида [22]. За последние годы отмечена тенденция снижения фоновых концентраций сернистого ангидрида и диоксида азота на территории г. Сыктывкара в связи с модернизацией систем очистки промышленных выбросов на предприятии. В 2000 г. на предприятии была внедрена схема бесхлорной отбелики целлюлозы, в результате чего потребление хлора снизилось с 11,8 в 2001 г. до 7,5 тыс. т в 2004 г. После реконструкции хвойного потока СЛПК с 2007 г. полностью отказался от использования элементарного хлора. В настоящее время суммарное количество выбросов колеблется около 20 тыс. т в год, что в 1,4 раза ниже, чем в 2004 г., и в 1,6 раз ниже, чем в 1998 г. [24].

В районе выбросов предприятия условно выделены зоны с различным уровнем техногенной нагрузки. Первая зона сильного воздействия выбросов включает территорию рабочей зоны целлюлозно-бумажного комплекса радиусом 3,5 км, где уровни техногенной нагрузки превышают фоновые в 100–150 раз. Вторая зона значительного воздействия выбросов охватывает территорию от границ первой зоны на расстоянии до 6,0 км от центра эмиссии по линии преобладающего направления ветра, где уровни загрязнённости снежного покрова превышают фоновые в 20–100 раз. Третья зона умеренного воздействия выбросов охватывает территорию от границ второй зоны на расстоянии до 10,0 км от центра эмиссии, где уровни техногенной нагрузки превышают фоновые в 4–20 раз [21].

В 2002–2010 гг. была обследована почвенная фауна ельников черничных, расположенных к северо-западу от СЛПК на расстоянии 3,5; 4,3; 5,3; 10,0; 50,0 км. Фоновый ельник (50,0 км) расположен на территории лесного

заказника Ляльский. Еловые древостои спелые и разновысотные, характеризуются невысокой продуктивностью. Ярусность не выражена, ель представлена несколькими возрастными генерациями. Древесный ярус образует *Picea obovata*, в его составе часто присутствуют *Pinus sylvestris* и *Betula pendula*, реже – *Populus tremula* и *Abies sibirica*. Подлесок состоит из *Juniperus communis*, *Sorbus aucuparia*, *Salix* sp. и *Rosa acicularis*. Равномерный подрост представлен, в основном, разновозрастной елью (2000–4300 шт./га). В травяно-кустарничковом ярусе (общее проективное покрытие 40–60%) первый подъярус (высота до 40 см) образуют *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Rubus saxatilis*, *Solidago virgaurea*. Второй подъярус (высота до 10 см) формируют *Oxalis acetosella*, *Maianthemum bifolium*, *Trientalis europaea*, *Linnaea borealis*, *Pyrola rotundifolia*, *Geranium silvaticum*, *Goodyera repens*. Моховой покров с проективным покрытием 70–95% образуют *Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi* и *Dicranum polysetum*, пятнами *Polytrichum commune* и сфагновые мхи [22]. При приближении к предприятию в подстилках почвы ельников черничных увеличивается содержание С, N, S. Концентрация серы в подстилке загрязненного ельника (3,5 км) превышает таковую в подстилке фонового ельника (50,0 км) почти в семь раз. Однако кислотность подстилок в районе выбросов лесопромышленного комплекса, по сравнению с фоновым участком, не изменяется. Во-первых, атмосферные осадки, выпадающие вблизи источника загрязнения, отличаются невысокой кислотностью. Во-вторых, здесь в почву поступает большое количество пыли, содержащей в своем составе соединения щелочных и щелочно-земельных металлов, обладающие некоторой подвижностью. Так, содержание K₂O повышается в 20 раз, а концентрация Ca²⁺ увеличивается в пять раз в подстилках с приближением к источнику эмиссии [23].

В 2007–2009 гг. была обследована почвенная фауна сосняков черничных, расположенных на расстоянии 1,3; 5,0; 6,5; 49,0 км от предприятия. Фоновый сосняк (49,0 км) расположен на территории заказника Ляльский. Вблизи от СЛПК расположены сосняк разнотравный (1,3 км), производный от сосняка черничного, сосняки черничные влажные (5,0 и 6,5 км). Сосняки представлены средневозрастными и приспевающими древостоями послерубочного и послепожарного происхождения, средней или высокой продуктив-

ности. Древесный ярус состоит в основном из *Pinus sylvestris*, при незначительном участии *Populus tremula*, *Betula pubescens* и *B. pendula*, редко встречается *Picea obovata*. В подлеске единично присутствуют *Juniperus communis*, *Sorbus aucuparia*, *Salix* sp. Подрост представлен в основном елью (500–1700 шт./га), редко встречаются сосна, береза и пихта. Травяно-кустарничковый ярус (общее проективное покрытие – 40–70%) образуют 20–40 видов растений, среди которых доминируют *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *Avenella flexuosa* и *Luzula pilosa*. В мохово-лишайниковом ярусе (общее проективное покрытие – 60–90%) преобладают *Pleurozium schreberi*, *Hylocomium splendens* и *Polytrichum commune* [22]. По совокупности показателей жизненного состояния отдельных деревьев, древостоя, подроста и растений напочвенного покрова сосновые фитоценозы в 1998 г. характеризовались как слабо- и среднеповреждённые, в 2009 г. – здоровые [24]. Как и для еловых лесов, химический анализ не выявил увеличения кислотности верхних горизонтов почв в сосняках при приближении к источнику эмиссии. В составе обменных катионов в прикорневой зоне почвы сосняков в районе выбросов предприятия доминирует ион Ca^{2+} . Однако, содержание С, N, S снижается при приближении к предприятию [25].

Для выявления состава и численности почвенных беспозвоночных в хвойных лесах проводили отбор почвенно-подстилочных проб площадью 0,0025 м² (для учета микроартропод) и 0,0625 м² (для учёта крупных беспозвоночных) на глубину 15 см. На каждом обследованном участке отбирали по 5–8 образцов на микрофауну и по 8–10 образцов на мезофауну в июне, июле, сентябре каждого года. Всего в ельниках черничных было отобрано 245, 150, 305 почвенных образцов для учета орибатид, коллембол и крупных беспозвоночных соответственно. В сосняках черничных суммарное число проб составило 60, 72, 112 образцов для учёта орибатид, коллембол и крупных беспозвоночных соответственно.

При анализе полученных результатов использовали такие информативные показатели уровня антропогенной нагрузки на сообщества почвенных беспозвоночных, как численность, таксономическое разнообразие, экологическая структура. При этом доминирующими считали виды, имеющие относительное обилие более 10%, субдоминирующими – от 5,0 до 9,9% [26].

Результаты и обсуждение

Комплексы почвенных беспозвоночных в ельниках черничных

Численность панцирных клещей снижалась по мере приближения к источнику загрязнения (табл. 1). Численность орибатид в 10,0 км от предприятия была устойчиво выше, чем на трёх ближних участках, приближалась к фоновым значениям. В целом, на всех обследованных участках она соответствовала зональным значениям [27 – 30]. Значительное снижение видового богатства орибатид было отмечено на самом ближайшем к СЛПК участке (3,5 км). В ельниках (4,3 и 5,3 км) число таксонов возрастало, однако было ниже, чем на фоновом участке 50,0 км (46 видов). Значимых изменений в структуре населения орибатид в рассмотренных ельниках при приближении к предприятию не зарегистрировано. На всех участках сохранялось достаточно равномерное распределение обилий видов при значительном числе доминантов и субдоминантов. Состав ядра доминирующих и субдоминирующих видов существенно не менялся. В ельнике (3,5 км) доминирующими были *Eupelops* sp., *Heminothrus peltifer*, на участке 4,3 км – *Tectocephus velatus*, на участке 5,3 км – *Nanhermannia sellnicki*, *T. velatus*, *H. peltifer*, в ельнике (10,0 км) доминировали *T. velatus*, *H. longisetosus*. В фоновом ельнике доминантов не выделено, наиболее многочисленные виды по индексу обилия отнесены к разряду субдоминантов. Зарегистрировано 15 таких видов: *Nothrus silvestris*, *Heminothrus longisetosus*, *Epidamaeus bituberculatus*, *Eremaeus oblongus*, *Carabodes subarcticus*, *Tectocephus velatus*, *Oppiella nova*, *Medioppia globosa*, *M. tuberculata*, *M. obsoleta*, *Scheloriabates laevigatus*, *Ceratozetes gracilis*, *C. mediocris*, *Chamobates borealis*, *Achipteria* sp. В ельнике (4,3 км) снижался индекс обилия индикаторной жизненной формы – обитателей поверхности почвы и верхних горизонтов подстилки – более чем в два раза, по сравнению с другими участками. На ближайшем участке (3,5 км) сохранялся высокий индекс обилия поверхностных обитателей за счёт высокой численности вида *Eupelops* sp. Другие виды этой жизненной формы были малочисленны. В ненарушенных ельниках, в том числе на фоновом участке (50,0 км), более половины видов в группировках орибатид относилось к жизненной форме обитателей поверхности почвы и верхних горизонтов подстилки, первыми по обилию особей являлись обитатели мелких почвенных скважин.

Таблица 4

Характеристика комплексов орибитид в градиенте промышленного загрязнения черничных типов ельников и сосняков

Показатели	Ельники				Сосняки		
	10,0 км	5,3 км	4,3 км	3,5 км	6,5 км	5,0 км	1,3 км
Доля доминантов, %							
<i>Heminothrus (Platynothis) peltifer</i> (Koch, 1839)	8,6	10,7	–	25,2	0,9	1,7	3,8
<i>Heminothrus longisetosus</i> Willmann, 1925	11,8	5,0	5,4	2,3	1,0	0,2	–
<i>Nanhermannia sellnicki</i> Forsslund, 1958	3,3	11,9	8,7	7,3	2,1	3,3	–
<i>Tectocephus velatus</i> (Michael, 1880)	22,9	13,2	16,6	0,0	6,9	19,2	–
<i>Oppiella nova</i> (Oudemans, 1902)	4,7	5,0	7,2	8,0	19,5	28,2	44,9
<i>Dissorhina ornata</i> (Oudemans, 1900)	–	–	–	–	7,6	15,2	14,3
<i>Moritzoppia (Moritzoppia) neerlandica</i> (Oudemans, 1900)	–	–	–	–	14,4	3,1	9,1
<i>Eupelops</i> sp.	0,4	3,1	2,4	25,7	0,2	0,1	–
Доля жизненных форм, %							
обитателей поверхности почвы и верхних горизонтов подстилки	25,6	27,3	9,9	36	23,5	12,5	18,7
обитателей мелких почвенных скважин	18,4	30,9	36,6	31,8	50,0	57,3	72,8
обитателей толщи подстилки	34,4	27,3	33,6	31,8	10,7	6,2	5,3
эврибионтов	21,6	14,5	19,9	0,4	11,6	22,8	0,8
первично неспециализированных	–	–	–	–	4,0	1,2	1,4
Пределы численности (тыс. экз./м ²)	112,0 – 210,0	82,0 – 135,2	78,0 – 131,7	48,5 – 121,5	59,2 – 157,3	52,0 – 145,1	7,2 – 33,5
Число видов	26	30	30	21	33	30	20
Всего экземпляров	9600	5600	5100	5000	3600	3400	1100

Примечание: «–» – вид не зарегистрирован на этом участке.

В фоновом ельнике (50,0 км) зарегистрировано 29 видов ногохвосток (за предыдущий многолетний период исследования здесь выявлено 52 вида) и отмечены: высокая общая численность коллембол (19,6–86,1 тыс. экз./м²), доминирование трех видов – *Folsomia quadrioculata*, *Isotomiella minor*, *Desoria hiemalis*, преобладание почвенной и полупочвенной групп жизненных форм [31]. В ельниках, расположенных в районе выбросов СЛПК, обнаружено от 31 до 36 видов коллембол [32]. Общая численность и видовое богатство группировок коллембол определялись расстоянием от источника загрязнения (табл. 2). Отмечена тенденция к повышению этих показателей в зоне значительного воздействия выбросов. Видовое богатство максимально на участке, расположенном в 5,3 км, а численность – на участке на расстоянии 4,3 км от СЛПК, что обусловлено увеличением обилия вида *Xenylla brevicauda*. Становились редкими виды надсемейства Poduroidea – наиболее примитивные почвенные формы, обладающие узкими ареалами. Группировка коллембол ельника (10,0 км) насчитывала 15 таких видов, а участков, расположенных в 3,5, 4,3 и 5,3 км от СЛПК – 12–14 видов. Однако два вида из группы подуроидов – *Protaphorura boedvarssoni* и *Supraphorura furcifera*, – не только не испытывали угнетения в зонах сильного и значительного воздействия выбросов СЛПК, но и увеличивали здесь свою численность. Аналогичная тенденция характерна для видов *Isotoma viridis*, *Parisotoma notabilis*, *Desoria hiemalis* – субдоминантов или доминантов в фоновом ельнике (50,0 км). Типичные доминанты (*Folsomia quadrioculata*, *Isotomiella minor*) группировок ногохвосток ненарушенных еловых лесов, напротив, по мере увеличения загрязнения снижали свое обилие.

Численность крупных почвенных беспозвоночных в зонах умеренного и значительного воздействия выбросов СЛПК не отличалась от таковой в фоновом ельнике (50,0 км) – 104,6±7,1 экз./м², тогда как на ближнем к предприятию участке (3,5 км) этот показатель возрос почти в два раза (табл. 3). Аналогичные изменения происходили в видовом составе мезофауны: максимальное число видов (26) зарегистрировано в фоновом ельнике (50,0 км), по мере приближения к источнику эмиссии наблюдалось снижение числа видов в составе мезофауны, однако в ельнике (3,5 км) отмечалось большее видовое богатство, чем в зоне значительного воздействия выбросов (участки 4,3 и 5,3 км).

Доминирующие позиции на фоновом участке (50,0 км) занимали: многочисленный в загрязненных ельниках *Monotarsobius curtipes* (30,8%), повышающий свое относительное обилие на участке в 3,5 км от СЛПК *Geostiba circellaris* (5,6%), снижающий обилие в районе выбросов СЛПК *Xantholinus tricolor* (6,8%). *Calathus micropterus* – массовый вид в ненарушенных хвойных лесах [33], – на фоновом участке (50,0 км) оказался малочисленным. По обилию в еловых лесах преобладали подстилочно-почвенные формы крупных беспозвоночных. В фоновом ельнике (50,0 км) высоко участие поверхностно-подстилочных видов (40% от числа видов и 30% от численности), число и обилие которых снижались при приближении к СЛПК [23].

Комплексы почвенных беспозвоночных в сосняках черничных

Значительное снижение численности орибатид отмечено в сосняке в 1,3 км от СЛПК. Сосняки, расположенные от него в 5,0 и 6,5 км мало отличались друг от друга по этому показателю (табл. 1). Численность орибатид в фоновом сосняке (49,0 км) составляла 24,0–130,0 тыс. экз./м². Зарегистрировано снижение таксономического разнообразия орибатид на уровне видов, родов и семейств в ближнем к предприятию сосняке (1,3 км) по сравнению с более удаленными участками (5,0 и 6,5 км) и фоновым сосняком (49,0 км). По мере удаления от источника загрязнения в сосняках уменьшалось суммарное обилие доминантов, увеличивалось число субдоминирующих видов, что определяло более равномерное распределение обилий видов и, следовательно, высокое разнообразие орибатид в зоне значительного воздействия выбросов СЛПК (участки 5,0 и 6,5 км) по сравнению с импактным сосняком (1,3 км). Первым по обилию на всех участках в районе выбросов СЛПК был эвритопный вид *Oppiella nova*. Доминантами также являлись: *Dissorhina ornata* – в сосняках (1,3 км и 5,0 км), *Tectocephus velatus* – на участке (5,0 км), *Moritzoppia neerlandica* – в сосняке (6,5 км). В фоновом сосняке (49,0 км) к числу наиболее многочисленных относились виды *Moritzoppia neerlandica*, *Dissorhina ornata*, *Tectocephus velatus*, *Suctobelbella sp.*, *Nanhermannia sellnicki*, *Heminothrus peltifer*, *Chamobates borealis*. В импактном сосняке (1,3 км) отмечено резкое снижение численности *Ceratozetes sellnicki*, входящего в ядро доминантов в среднетаёжных хвойных лесах с развитым гумусовым горизонтом [30]. При

Таблица 2

Характеристика комплекса коллембол в градиенте промышленного загрязнения черничных типов ельников и сосняков

Показатели	Ельники					Сосняки		
	10,0 км	5,3 км	4,3 км	3,5 км	6,5 км	5,0 км	1,3 км	
Доля доминантов, %								
<i>Folsomia quadriculata</i> (Tullberg, 1871)	38,8	30,8	20,1	31,4	11,9	12,1	1,7	
<i>Isotomiella minor</i> (Sch ffer, 1896)	14,2	20,9	7,4	4,5	31,0	51,4	33,7	
<i>Parisotoma notabilis</i> (Sch ffer, 1896)	0,9	7,0	10,1	7,3	4,2	4,8	22,3	
<i>Protaphorura boedvarssoni</i> Pomorski, 1993	5,0	6,6	4,5	10,5	4,6	6,1	4,3	
<i>Isotoma viridis</i> Bourlet, 1839	2,2	5,7	5,0	16,8	0,1	0,6	7,6	
<i>Desoria hiemalis</i> (Sch tt, 1893)	2,2	5,3	2,2	12,9	3,8	4,7	14,6	
Доля жизненных форм, %								
поверхностно-обитающих	33,5	27,8	52,2	38,5	16,8	8,5	25,1	
гемиэдафических	44,0	40,7	33,2	48,8	31,4	21,7	34,3	
эуэдафических	22,5	31,5	14,6	12,7	51,8	69,8	40,6	
Средняя численность (тыс. экз./м ²)	31,0±2,5	30,7±3,0	63,4±13,3	27,0±3,0	78,3±30,8	41,3±4,5	25,8±3,3	
Число видов	31	36	33	31	28	28	25	
Всего экземпляров	3330	2945	6147	3176	3133	1868	1163	

Таблица 3
Характеристика мезофауны в градиенте промышленного загрязнения черничных типов ельников и сосняков

Показатели	Ельники				Сосняки		
	10 км	5,3 км	4,3 км	3,5 км	6,5 км	5,0 км	1,3 км
Доля доминантов, %							
<i>Monolarsobius curtipes</i> (C.L. Koch, 1847)	56,7	93,8	78,1	52,6	12,2	18,2	16,4
<i>Pterostichus melanarius</i> (Illiger, 1798)	1,6	0,1	0,1	–	–	6,5	0,2
<i>Pterostichus oblongopunctatus</i> (Fabricius, 1787)	0,2	0,1	0,2	0,1	–	12,0	6,5
<i>Calathus micropterus</i> (Duftschmid, 1812)	6,7	0,1	0,1	0,2	2,9	1,5	3,0
<i>Zyras humeralis</i> (Gravenhorst, 1802)	5,8	4,2	0,1	1,2	75,4	48,0	6,5
<i>Geostiba circellaris</i> (Gravenhorst, 1806)	0,1	–	3,3	6,9	0,1	–	–
<i>Philonthus rotundicollis</i> (Menetries, 1832)	–	–	–	–	0,1	–	24,2
<i>Philonthus cyanipennis</i> (Fabricius, 1792)	–	–	–	–	–	–	24,2
<i>Tachinus pallipes</i> Gravenhorst, 1806	0,1	–	–	–	2,9	1,5	9,4
Доля жизненных форм, %							
поверхностно-подстильных	2,6	5,9	11,4	6,8	2,4	18,8	37,8
подстильных	6,2	4,9	22,9	16,5	47,6	28,2	2,2
подстильно-почвенных	91,2	89,2	65,7	76,7	50,0	53,0	60,0
Средняя численность (экз./м ²)	110,2±10,5	101,0±16,2	116,6±22,4	201,8±48,2	33,7±2,6	53,2±4,6	83,4±6,4
Число видов	13	7	9	19	16	16	22
Всего экземпляров	482	221	510	883	59	93	146

Примечание: «–» – вид не зарегистрирован на этом участке.

приближении к источнику эмиссии в сосняках зарегистрировано значительное сокращение числа обитателей поверхности почвы и толщи подстилки (табл. 1). Смены доминирующих жизненных форм панцирных клещей не происходило, преобладающей по обилию на участках 1,3, 5,0 и 6,5 км оставалась жизненная форма обитателей мелких почвенных скважин, как и в фоновом сосняке (49,0 км).

Численность коллембол в сосняках черничных вне зоны аэротехногенного воздействия существенно ниже, чем в аналогичных ельниках: 1,2–67,5 тыс. экз./м². Таксоцены коллембол насчитывают 18–34 вида [34, 35] и характеризуются доминированием *Isotomiella minor* и *Parisotoma notabilis*, преобладанием почвенных жизненных форм. В сосняках, испытывающих воздействие выбросов СЛПК, размах колебаний численности коллембол гораздо шире – 20,7–167,0 тыс. экз./м², а число видов меньше – 13–28. По мере приближения к СЛПК численность коллембол сокращалась в 1,5 раза по сравнению с фоновым сосняком (49,0 км), видовое богатство также уменьшалось. Особенно заметно в ряду сосняков менялось соотношение доминирующих видов коллембол (табл. 2). По характеру этих изменений выделились две группы видов: у первых – *Folsomia quadrioculata*, *Micraptorura absoloni*, – численность популяций снижалась, у вторых – *Parisotoma notabilis*, *Isotoma viridis*, *Desoria hiemalis*, – численность, напротив, увеличивалась с ростом загрязнения. В сосняках, расположенных в районе действия выбросов СЛПК, преобладали почвенные виды, однако в импактном сосняке (1,3 км) отмечено некоторое увеличение доли поверхностно-обитающих видов.

Средняя численность мезофауны, составившая в фоновом сосняке 102,4±8,4 экз./м², снижалась в 2–3 раза на участках 6,5 и 5,0 км, несколько возрастая в импактном сосняке (1,3 км). Видовое богатство крупных почвенных беспозвоночных на фоновом участке (49,0 км) оказалось ниже (14 видов), чем в сосняках, расположенных в районе выбросов СЛПК (табл. 3). В сосняках (6,5 и 5,0 км) высоким обилием характеризовались виды *Monotarsobius curtipes*, *Calathus micropterus*, *Zyras humeralis*, которые являются типичными доминантами ненарушенных сосновых лесов, в том числе фонового участка. В импактном сосняке (1,3 км) произошла смена доминантов. Здесь лидирующие позиции заняли *Philonthus rotundicollis* и *Ph. cyanipennis*, считающиеся лесными видами, но в начале

лета зарегистрирован лет этих жуков в биотопах с хорошо выраженным травостоем [25]. В нарушенных сосняках преобладала группа подстильно-почвенных форм, что характерно и для фонового сосняка (45,4% приходится на эту группу). По мере приближения к СЛПК наблюдалось сокращение доли подстилочных (36,0% – в фоновом сосняке) и увеличение доли поверхностно-подстилочных форм (18,6% – в фоновом сосняке).

Изменения комплексов почвенных беспозвоночных хвойных лесов в районе выбросов Сыктывкарского лесопромышленного комплекса

Важной характеристикой почвенного населения хвойных лесов является систематическая монотонность группировок на уровне семейств, родов, видов [30]. Таксономическая структура почвенной фауны хвойных лесов, расположенных в районе действия выбросов СЛПК, существенно не отличалась от фонового района и не претерпевала значительных изменений за годы наблюдений. Тем не менее, таксономическое разнообразие орибатид снижалось в ельниках и сосняках по мере приближения к источнику эмиссии, что характерно для промышленных загрязнений разного рода [36, 37]. В почве еловых насаждений отмечено увеличение разнообразия группировок коллембол при среднем уровне загрязнения, обнаруженное и другими авторами [9, 38, 39]. Это подтверждает гипотезу «промежуточного нарушения», по которой максимальное разнообразие наблюдается при средней интенсивности воздействия нарушающих факторов [40]. В почве сосновых насаждений отмечено уменьшение видового разнообразия ногохвосток, что, по-видимому, связано с изменениями растительного покрова и сокращением мощности подстилки. Ранее вблизи металлургических предприятий зарегистрировано сокращение видового разнообразия коллембол на 18–42% по сравнению с контролем [39]. В целом, для коллембол не выявлено существенных изменений видового состава в градиенте хронического воздействия выбросами СЛПК. Для крупных почвенных беспозвоночных отмечено уменьшение видового разнообразия, как в сосняках, так и в ельниках по среднему градиенту загрязнения. Однако на импактных участках елового (3,5 км) и соснового (1,3 км) лесов, рассматриваемое в почвах разнообразие мезофауны, возрастает и соответствует таковому на фоновых участках.

Это происходит за счет появления здесь представителей кальцефильных групп беспозвоночных (*Gastropoda*, *Lumbricidae*, *Diplopoda*). Такие же изменения наблюдаются при пылевых загрязнениях, особенно при накоплении кальция в почвах с высокой естественной кислотностью [14, 41].

Зарегистрированные изменения численности почвенной фауны не имеют одинаковых тенденций для рассмотренных таксономических групп. Численность орибатид по мере приближения к СЛПК закономерно снижалась в ельниках и сосняках черничных. Эта тенденция подтверждается предыдущими исследованиями [42, 43], хотя возможно и повышение численности орибатид вблизи промышленных предприятий [18]. Численность коллембол в ельниках увеличивалась по среднему градиенту, а в сосняках снижалась при приближении к источнику эмиссии. Аналогичная картина показана для населения ногохвосток елово-пихтовых лесов в окрестностях Среднеуральского медеплавильного завода, когда максимальная численность отмечалась в буферной зоне [39]. В загрязненных промышленными выбросами сосняках южной тайги и лесостепи общая численность коллембол падала в 2–3 раза по сравнению с контролем [35]. Уменьшение численности почвенной мезофауны не только не наблюдалось в еловых лесах, расположенных в зонах умеренного и значительного действия выбросов СЛПК, но этот показатель даже вырос в зоне сильного воздействия выбросов предприятия. В сосняках численность мезофауны сокращалась в зонах умеренного и значительного действия выбросов СЛПК, вырастая на импактном участке (1,3 км). Такие тенденции соответствуют зоне нестабильности сообществ мезофауны в середине градиента загрязнения [23, 25].

Перестройки в структуре населения почвенных беспозвоночных касаются структуры доминирования и спектра жизненных форм, в зависимости от экологических особенностей рассмотренных таксономических групп они имеют разнонаправленный характер. Для орибатид характерно большое число субдоминирующих видов в ненарушенных еловых и сосновых лесах. По мере приближения к предприятию часть таких видов снижала свою численность или полностью выпадала из состава группировок панцирных клещей. В результате наблюдалось перераспределение обилия оставшихся видов, которые и становились доминантами на участках, расположенных в районе выбросов СЛПК. Отмечено также сни-

жение обилия обитателей поверхности почвы и верхних горизонтов подстилки в хвойных лесах при приближении к источнику эмиссии, что подтверждает тот факт, что под влиянием промышленных загрязнений разного рода происходит обеднение населения поверхностных обитателей [36, 44 – 46]. В группировках коллембол черничных ельников по мере приближения к предприятию происходила замена одних доминантных видов другими. В черничных сосняках вид *Parisotoma notabilis*, доминирующий на фоновом участке, увеличивал свою численность с ростом загрязнения. Известно, что лишь при очень сильной антропогенной нагрузке количество потенциальных видов коллембол с высоким обилием вновь падает [1]. Нами не выявлено каких-либо существенных изменений обилия другого доминанта (*Isotomiella minor*) в фоновом сосняке при приближении к СЛПК, хотя в сосновых лесах вблизи Череповецкого металлургического комбината и Тольяттинских химических заводов происходит сокращение численности популяций *Isotomiella minor* [35]. Вероятно, противоречивые сведения о влиянии промышленных выбросов производств разного типа на группировки коллембол связаны с различными типами поллютантов. Для коллембол отмечена иная, чем для орибатид, тенденция увеличения доли поверхностно-обитающих и снижения участия почвенных форм коллембол при среднем уровне загрязнения в еловых лесах и при сильном уровне загрязнения – в сосновых лесах. Это свидетельствует о том, что виды поверхностно-обитающей и эуэдафической жизненных форм имеют селективное преимущество в загрязненных почвах [39]. В отличие от микроартропод, среди крупных почвенных беспозвоночных не выявлено смены доминантов в градиенте загрязнения черничных ельников. Однако для мезофауны этих типов сообществ, расположенных в районе выбросов СЛПК, характерно монодоминирование *Monotarsobius curtipes*. В сосняках черничных по среднему градиенту загрязнения смены доминантов не происходило, но в импактном сосняке (1,3 км) из-за смены растительного покрова произошла замена типичных доминантов ненарушенных хвойных лесов видами *Philonthus rotundicollis* и *Ph. cyanipennis*. Разные тенденции отмечены и в изменении спектра жизненных форм крупных почвенных беспозвоночных в еловых и сосновых лесах в районе выбросов СЛПК. В ельниках черничных (50,0 и 10,0 км) высоко участие поверхностно-подстилочных форм крупных

беспозвоночных, доля которых снижается при приближении к предприятию, что характерно и для орибатид при увеличении антропогенной нагрузки на экосистемы. Аналогичные изменения проявляются для мезофауны сосновых лесов по среднему градиенту загрязнения, тогда как в импактном сосняке (1,3 км) наблюдается снижение участия подстилочных и увеличение доли поверхностно-подстилочных форм.

По сути, все явления, происходящие в ходе антропогенной трансформации еловых и сосновых лесов в районе выбросов СЛПК, отражают два ключевых процесса: утрату структурной стабильности и специализированности почвенной фауны. При этом, воздействие выбросов СЛПК отрицательнее сказывается на орибатидах, у которых при приближении к предприятию существенно снижались видовое разнообразие и численность, происходило изменение структуры доминирования и наблюдалось обеднение населения поверхностных обитателей. Группировки коллембол оказались более устойчивыми к хроническому воздействию выбросов СЛПК, что проявилось в отсутствии значимых изменений их видового состава и численности в хвойных лесах. Однако структурная стабильность сообществ ногохвосток нарушена, о чем свидетельствовали изменения спектра жизненных форм и соотношения доминантов. При этом в еловых лесах структурные изменения группировок коллембол происходили при среднем уровне загрязнения. Зона нестабильности сообществ почвенной мезофауны также выявлена в середине градиента загрязнения рассматриваемых лесов выбросами СЛПК, на импактных участках наблюдалось повышение разнообразия и численности крупных почвенных беспозвоночных при изменении структурных параметров. Различные типы реакций рассмотренных групп почвенных беспозвоночных не только свидетельствуют о том, что воздействие выбросов СЛПК влияет на почвенную фауну, но и подтверждают тот факт, что любое химическое воздействие вызывает перестройки в структурной организации комплексов почвенных беспозвоночных [1, 47].

Заключение

В хвойных лесах, расположенных в зоне воздействия СЛПК, проявилась общая тенденция снижения таксономического разнообразия и численности орибатид по мере приближения к источнику эмиссии. Наименьшие значения этих показателей отмечены в

импактных сообществах (1,3 и 3,5 км). Более выраженным негативное воздействие выбросов СЛПК оказалось в сосняках черничных. В ельниках черничных в районе выбросов предприятия существенных изменений в структуре группировок орибатид не зарегистрировано. В сосняках увеличивается суммарное обилие доминантов, распределение обилий видов становится менее равномерным, сокращается число видов – представителей жизненной формы обитателей поверхности почвы и верхних горизонтов подстилки.

Загрязнение черничных ельников и сосняков выбросами СЛПК проявляется на сообществах коллембол по-разному. Для населения коллембол ельников характерно увеличение видового разнообразия и численности при среднем уровне загрязнения; сокращение плотности популяции многочисленного в восточноевропейских хвойных лесах вида *Isotomiella minor* с ростом загрязнения. Для сообществ коллембол сосняков очевидны структурные изменения, проявляющиеся в сокращении численности и видового разнообразия, росте или уменьшении плотности доминантных видов, изменении соотношения жизненных форм по мере приближения к предприятию.

Для сообществ почвенной мезофауны в хвойных лесах характерно снижение видового разнообразия и численности по среднему градиенту загрязнения выбросами СЛПК и возрастание этих показателей до фоновых значений на импактных участках (1,3 и 3,5 км). Структурные изменения комплексов крупных почвенных беспозвоночных проявляются в зонах значительного и сильного воздействия выбросов предприятия.

Таким образом, воздействие выбросов СЛПК сказывается на комплексах почвенных беспозвоночных опосредованно через нарушение их структурной организации.

Исследования проведены в рамках Программы Отделения биологических наук РАН «Биологические ресурсы России, оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга», проекты № 09-Т-4-1003 и 12-Т-4-1001.

Литература

1. Кузнецова Н.А. Организация почвенных сообществ и ее роль в биоиндикации // Антропогенная динамика экосистем: Материалы IX конф. М.: МНЭПУ, 2003. С. 39–91. (Научн. Тр. МНЭПУ. Вып. 2. Сер.: «Реймерсовские чтения»).

2. Schaefer M. Waldschaden und die Tierwelt des Bodens // *Allg. Forstz.* 1985. V. 40. № 27. S. 676-679.
3. Артемьева Т.И. Комплексы почвенных животных и вопросы рекультивации техногенных территорий. М: Наука, 1989. 112 с.
4. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург. 1994. 280 с.
5. Sterzynska M., Pilipiuk I. Distribution of heavy metals in Warsaw soils as a factor affecting the soil biota // *Memorabilia Zool.* 1994. V. 49. P. 187-195.
6. Rusek J. Soil invertebrate species diversity in natural and disturbed environments // *Webmasters in regional and global contexts* / Ed. by D.C. Coleman, P.F. Hendrix. CAB International. 2000. P. 233-252.
7. Rusek J., Marshall V.G. Impacts of airborne pollutants on soil fauna // *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2000. V. 31. P. 395-423.
8. Хотько Э.И., Ветрова С.Н., Матвеев А.А., Чумаков Л.С. Почвенные беспозвоночные и промышленные загрязнения. М. 1982. 264 с.
9. Кузнецова Н.А., Потапов М.Б. Изменение структуры сообществ почвообитающих коллембол (*Hexapoda, Collembola*) при промышленном загрязнении южно-таежных сосняков – черничников // *Экология.* 1997. Вып. 6. С. 435-441.
10. Штернбергс М.Т. Воздействие выбросов цементного завода на дождевых червей (*Lumbricidae*) березняков-кисличников // *Загрязнение природной среды кальцийсодержащей пылью.* Рига. 1985а. С. 96-100.
11. Штернбергс М.Т. Воздействие выбросов цементного завода на пауков (*Aranei*) подстилки леса // *Загрязнение природной среды кальцийсодержащей пылью.* Рига. 1985б. С. 101-109.
12. Saldiva P.H.N., Bohm G.M. Animal indicators of adverse effects associated with air pollution // *Ecosystem Health.* 1998. V. 4. P. 230-235.
13. Cortet J., Gomot-De Vaufleury A., Poinsot-Balaguer N., Gomot L., Texier C., Cluzeau D. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects // *Eur. J. Soil Biol.* 1999. V. 35. № 3. P. 115-134.
14. Deleporte S., Tillier P. Long-term effects of mineral amendments on soil fauna and humus in an acid beech forest floor // *Forest Ecology and Management.* 1999. V. 118. P. 245-252.
15. Биодинамика процессов трансформации органического вещества в почвах Северной Фенноскандии. Апатиты. 2002. 152 с.
16. Почва и почвенная биота в условиях загрязнения фтором. Апатиты. 2005. 155 с.
17. Hodkinson I.D., Jackson J.K. Terrestrial and aquatic invertebrates as bioindicators for environmental monitoring, with particular reference to mountain ecosystems // *Environmental Management.* 2005. V. 35. №. 5. P. 649-666.
18. Zaitsev A.S., Van Straalen N.M. Species diversity and metal accumulation in oribatid mites of forests affected by a metallurgical plant // *Pedobiologia.* 2001. V. 45. P. 467-479.
19. Блинников В.И., Тяпкина А.П. Влияние пыли отвалов Мценского завода алюминиевого литья на микроартропод луговых почв // *Экологическое разнообразие биоты и биопродуктивность почв: Материалы докл. IV (XIV) Всерос. совещ. по почвенной зоологии.* Тюмень. 2005. С. 39-40.
20. Мелецис В.П. Биоиндикационное значение коллембол (*Collembola*) при загрязнении почвы березняка – кисличника индустриальной кальцийсодержащей пылью // *Загрязнение природной среды кальцийсодержащей пылью.* Рига. 1985. С. 149-209.
21. Бобкова К.С., Паутов Ю.А., Терещук Н.А. Состояние лесов в зоне влияния Сыктывкарского лесопромышленного комплекса // *Лесн. журн.* 1997. № 5. С. 84-88.
22. Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. Влияние поллютантов на хвойные фитоценозы (на примере Сыктывкарского лесопромышленного комплекса). Екатеринбург. 2003. 65 с.
23. Колесникова А.А., Конакова Т.Н., Долгин М.М. Мезофауна еловых лесов Республики Коми в зоне воздействия лесопромышленного комплекса // *Бюлл. МОИП. Отд. Биол.* 2011. Т. 116. Вып. 1. С. 10-20.
24. Торлопова Н.В., Робакидзе Е.А. Биоразнообразие и состояние лесных экосистем под влиянием загрязнения воздуха ЦБП // *Экология арктических и приарктических территорий: материалы докл. междунар. симп.* Архангельск. 2010. С. 401-402.
25. Конакова Т.Н., Колесникова А.А., Долгин М.М. Мезофауна сосновых лесов Республики Коми в районе действия выбросов лесопромышленного комплекса // *Вестник Поморского университета. Сер. «Естественные науки».* 2009. № 3. С. 55-63.
26. Беклемишев В.Н. Биоценологические основы сравнительной паразитологии. М. 1970. 502 с.
27. Поспелов Л.Е., Солнцева Е.Л., Чугунова М.Н. Комплексы микроартропод в разных типах леса в подзоне северной тайги Европейской части СССР // *Проблемы почвенной зоологии.* Минск: Наука и техника, 1978. С. 189-190.
28. Смоленцева Н.Л. Роль почвенных животных и микроорганизмов в разложении опада сосново-евого насаждения средней тайги // *Экология роста и развития сосны и ели на Северо-Востоке европейской части СССР.* Сыктывкар. 1979. С. 104-116. (Тр. Коми филиала АН СССР, № 44).
28. Панцирные клещи: Морфология, развитие, филогения, экология, методы исследования, характеристика модельного вида *Nothrus palustris* C.L. Koch, 1839. / Криволицкий Д.А., Лебрен Ф., Кунст М. и др. М.: Наука, 1995. 224 с.
29. Биопродукционный процесс в лесных экосистемах Севера. СПб.: Наука, 2001. 278 с.

30. Таскаева А.А., Долгин М.М. Микростациональное распределение коллембол в еловых лесах // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 2008. Т. 113. Вып. 5. С. 16–22.
31. Таскаева А.А. Изменения населения коллембол (*Collembola*) при антропогенной трансформации еловых лесов (на примере лесов Монди Бизнес Пейпа Сыктывкарский ЛПК) // Беспозвоночные европейского Северо-Востока России. Сыктывкар. 2007. С. 92–113. (Тр. Коми НЦ УрО РАН, № 183).
32. Конакова Т.Н., Колесникова А.А., Долгин М.М. Разнообразие и экология жужелиц (*Coleoptera: Carabidae*) в среднетаежных лесах Республики Коми // Бюлл. МОИП. Отд. Биол. 2010. Т. 115. Вып. 2. С. 9–16.
33. Таскаева А.А. Изменение фауны коллембол под влиянием промышленных выбросов // Современные проблемы биоиндикации и биомониторинга: Тез. докл. Сыктывкар, 2001. С. 184–185.
34. Кузнецова Н.А. Организация сообществ почвообитающих коллембол. М.: ГНО «Прометей» МПГУ, 2005. 244 с.
35. Криволицкий Д.А. Почвенная фауна – биоиндикатор радиоактивных загрязнений // Радиоэкология почвенных животных. М.: Наука, 1985. С. 5–25.
36. Артемьева Т.Н., Жеребцов А.К., Кибардин В.М. Влияние нефтяного загрязнения на педобионтов разных природно-климатических зон // Проблемы почвенной зоологии: Тез. докл. М.: Изд-во КМК, 1999. С. 249.
37. Bengtsson G., Rundgren S. The Gusum case: a brass mill and the distribution of soil *Collembola* // *Can. J. Zool.* 1988. V. 66. P. 1518–1526.
38. Кузнецова Н.А. Население почвообитающих коллембол в градиенте загрязнения хвойных лесов выбросами Среднеуральского медеплавильного завода // Экология. 2009. № 6. С. 439–448.
39. Connell J. H. Diversity in tropical rainforests and coral reefs // *Science.* 1978. V. 199. P. 1302–1310.
40. Kalisz P.J., Powell J.E. Effect of calcareous road dust on land snails (*Gastropoda: Pulmonata*) and millipedes (*Diplopoda*) in acid forest soils of the Daniel Boone National Forest of Kentucky, USA // *Forest Ecology and Management.* 2003. V. 186. P. 177–183.
41. Бутовский Р.О. Устойчивость комплексов почвообитающих членистоногих к антропогенным воздействиям. Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. Москва. 2000. 47 с.
42. Vanek J. Zmeny vyvolane priemyslovymi imisemi ve spolecenstvech pancimiku (*Acarina, Oribatoidea*) pud smrkovych lesu // *Probl. Biol. Kraoiny.* 1974. P. 33–116.
43. Криволицкий Д.А. Почвенная фауна в экологическом контроле. М.: Наука, 1994. 269 с.
44. Мелехина Е.Н., Криволицкий Д.А. Многолетняя динамика населения микроартропод эпифитных лишайников в районе Чернобыльской АЭС // Радиоэкологические исследования в 30-километровой зоне аварии на Чернобыльской АЭС. Сыктывкар. 1993. С. 60–72. (Тр. Коми науч. центра УрО РАН; №127).
45. Мелехина Е.Н., Бязров Л.Г. Многолетние изменения биоразнообразия панцирных клещей в эпифитных лишайниках Подмосквы // Динамика биоразнообразия животного мира: Сб. докл. совещ. Москва. 1997. С. 120–123.
46. Стриганова Б.Р. Питание почвенных сапрофагов. М. 1980. 220 с.