

УДК 504.5:631.4::581.55+631.467.2

## СОСТОЯНИЕ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И СООБЩЕСТВ ПОЧВЕННЫХ НЕМАТОД В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Г. Ф. Лайдинен, Л. И. Груздева, А. Ф. Титов, Н. М. Казнина,  
Ю. В. Батова, А. А. Сущук

Институт биологии Карельского научного центра РАН

Изучено влияние промышленного загрязнения на состояние травянистой растительности и сообществ почвенных нематод в зависимости от расстояния до Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК). Установлено, что с приближением к источнику загрязнения в травянистых сообществах заметно уменьшается общее количество видов сосудистых растений, и в большей степени – растений группы разнотравья, снижается продуктивность надземной фитомассы, но увеличивается проективное покрытие ряда видов семейств *Poaceae* и *Fabaceae*. В исследуемых биотопах выявлены также признаки воздействия выбросов ГОК на фауну почвенных нематод, которые наиболее отчетливо проявились на участке в 0,5 км от него. В частности, наблюдается обеднение фауны, снижение индекса степени зрелости сообщества нематод, исчезновение видов трофической группы политрофов, но возрастает общая численность нематод за счет представителей фитотрофов. При этом доминирующее положение занимает *Paratylenchus nanus* – паразит луговых трав.

К л ю ч е в ы е с л о в а: травянистая растительность, почвенные нематоды, промышленное загрязнение, тяжелые металлы.

**G. F. Laidinen, L. I. Gruzdeva, A. F. Titov, N. M. Kaznina, Y. V. Batova,  
A. A. Sushchuk. THE STATE OF HERBACEOUS VEGETATION AND  
NEMATODE COMMUNITIES UNDER INDUSTRIAL POLLUTION**

The effect of industrial pollution on the state of herbaceous vegetation and soil nematode communities depending on the distance from the Kostomuksha Mining and Concentration Plant (MCP) was studied. The number of vascular species (most significantly forbs) and the aboveground biomass of herbaceous communities decreased towards the MCP. At the same time the percent cover of some species of the families *Poaceae* and *Fabaceae* increased closer to the enterprise. Emissions from the MCP have also impacted the soil nematode fauna in the biotopes under study. The greatest changes in the nematode community structure were observed at a distance of 0.5 km from the plant. We observed a decrease in the fauna taxonomic diversity and maturity index, and the absence of omnivorous nematodes in this area. However, the total nematode abundance increased due to a rise in the number of nematodes obligatorily or facultatively connected with plants. The meadow herbs parasite *Paratylenchus nanus* was found to dominate in the fauna.

Key words: herbaceous vegetation, soil nematodes, industrial pollution, heavy metals.

## Введение

Основными источниками загрязнения окружающей среды различными химическими веществами являются крупные промышленные предприятия, особенно связанные с добычей и переработкой полезных ископаемых [Merrington, Alloway, 1994; Sanità di Toppi, Gabbrielli, 1999]. Разработка месторождения железных руд на севере Карелии и введение в строй более 25 лет назад Костомукшского горно-обогатительного комбината (ГОК) привели к возникновению одного из главных очагов экологической напряженности на территории республики. Так, в 2007–2009 гг. доля выбросов загрязняющих веществ ГОК составила 40–52 % от общего количества выбросов промышленных предприятий Карелии [Государственный доклад..., 2009, 2010]. Основными компонентами загрязняющих веществ комбината являются диоксид серы и полиметаллическая пыль, содержащая такие тяжелые металлы, как Fe, Ni, Co, Cu, Zn, значительная часть которых выпадает в радиусе 0,5–5 (10) км от него [Лазарева, 1992; Шильцова, Ласточкина, 2004].

Попадая в почву, тяжелые металлы сравнительно легко вовлекаются в биологический круговорот и оказывают негативное воздействие на растения и почвенную биоту, что приводит к нарушению биоценозов, а в отдельных случаях – даже к их деградации [Загуральская, 1992; Жиров и др., 2007; Алексеев, 2008]. Известно, что в природных биоценозах взаимоотношения растений с почвенно-зоологическим комплексом оказывают существенное влияние на жизнедеятельность растений и состояние растительных сообществ. В почвах Карелии нематоды являются самой многочисленной и разнообразной группой среди почвенной мезо- и микрофауны, имеющей трофические связи с бактериями, грибами и растениями [Соловьева, 1972, 1986]. К настоящему времени в литературе имеются сведения о влиянии промышленного загрязнения, обусловленного выбросами Костомукшского ГОК, на растительность [Лазарева и др., 1992; Литинский, 1996; Сазонова и др., 2001] и почвенную биоту [Медведева, 2001; Матвеева и др., 2008] лесных биоценозов. Однако взаимосвязь нематод с растительным покровом в условиях промышленного загрязнения исследована слабо. В связи с этим целью нашей работы было изучение влияния промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на состояние травянистой растительности и сообществ почвенных нематод на участках, расположенных в районе Костомукшского ГОК.

## Материалы и методы

Исследования проводили на участках, расположенных на расстоянии 0,5; 4 и 8 км к северо-востоку от Костомукшского ГОК по направлению господствующих ветров [Методические рекомендации..., 1981; Атлас..., 1989]. Пробные площади заложены на участках с вторичным растительным покровом в луговидных сообществах, сформировавшихся на месте северотаежных хвойных лесов на иллювиально-гумусово-железистых подзолах. Сосновые леса на подзолах доминируют в этом районе [Щербаков и др., 1977; Лазарева, 1992]. Наибольшее распространение в районе имеют подзолы иллювиально-гумусово-железистые [Лазарева, 1992]. Отбор почвенных образцов проводился на пробных площадях на глубину до 10 см. На каждой пробной площадке из пяти индивидуальных почвенных проб составляли один смешанный образец [Методические рекомендации..., 1981], который использовали для химического анализа. Содержание тяжелых металлов в почве определяли атомно-абсорбционным методом с использованием спектрофотометра AA-6800 (Shimadzu, Япония).

Влияние промышленного загрязнения на состояние травянистой растительности оценивали по таким показателям, как флористический состав, проективное покрытие, продуктивность надземной фитомассы. В соответствии с общепринятой методикой [Шенников, 1964] на пробных площадях (10 x 10 м) выполнены геоботанические описания с определением проективного покрытия всех видов. Проведены также флористический и экобиоморфный анализ флоры [Серебряков, 1962; Раменская, 1983; Горышина, 1991]. Латинские названия растений даны в соответствии со сводкой С. К. Черепанова [1995]. Продуктивность сырой надземной фитомассы ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) учитывали на площадках (0,5 x 0,5 м) в 5-кратной повторности.

О состоянии сообществ нематод судили по изменению их видового состава, численности, соотношения эколого-трофических групп, индекса зрелости [Bongers, 1990; Ferris et al., 2001]. Нематод выделяли из почвенных образцов (навеска 30 г) по методу Бермана и фиксировали по общепринятым методикам. Систематическую принадлежность нематод (не менее 100 особей из пробы) определяли на временных глицериновых препаратах с помощью светового микроскопа. Половозрелых нематод идентифицировали до вида, личинок – до рода. Численность нематод рассчитывали на 100 г почвы. Каждый таксон относили к одной из шести эколого-трофических групп: бактериотрофы, мико-

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в почве участков в зависимости от расстояния до источника загрязнения (мг/кг почвы)

Расстояние до ГОК, км	Металлы						
	Марганец	Цинк	Никель	Медь	Свинец	Кобальт	Хром
0,5	464 ± 116	43,7 ± 7,0	17,8 ± 4,7	15,2 ± 3,8	15,8 ± 1,6	5,2 ± 1,3	50,1 ± 12,5
4,0	471 ± 117	42,1 ± 6,8	12,8 ± 3,2	16,3 ± 4,1	9,6 ± 1,0	8,7 ± 2,2	43,1 ± 10,8
8,0	468 ± 117	22,7 ± 3,6	9,0 ± 2,3	9,2 ± 2,3	7,4 ± 0,7	3,9 ± 1,0	35,4 ± 8,8
Фон*	74	19,2	3,6	9,1	5,9	2,0	18,0

Примечание. \* – фон для почв северной Карелии, по [Федорец и др., 2008].

трофы, политрофы, хищники, нематоды-фитотрофы – паразиты растений и ассоциирующие с растением [Yeates et al., 1993]. Индекс зрелости сообщества нематод рассчитывали по формуле:  $\sum MI = \sum_{i=1}^n v_{(i)} \times f_{(i)}$ , где  $n$  – количество таксонов,  $v_{(i)}$  – значение  $i$ -го таксона,  $f_{(i)}$  – частота этого таксона. Подсчитывали количество родов нематод в пробе. Каждый таксон имел значение от 1 до 5 по шкале с-р Бонгерса [Bongers, 1990]. Суммировали значения всех родов и рассчитывали индекс зрелости.

Наряду с этим вычисляли индексы, характеризующие почвенную трофическую сеть: индекс обогащения (Enrichment index, EI), индекс структурирования (Structure index, SI), индекс пути разложения органического вещества (Channel index, CI) в почве [Ferris et al., 2001]. Индексы вычисляли на основе плотности популяций, состава трофических групп и функциональных комплексов нематод. Условия почвенной трофической сети изображали в двумерном пространстве, в котором значения индексов SI и EI откладывали по осям абсцисс и ординат соответственно. Полученный фаунистический профиль состоит из четырех квадратов, характеризующих высоконарушенную почвенную экосистему (квадрат А), низкий/средний уровень нарушенности (В), ненарушенную (С) и экосистему в условиях стресса (D).

## Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что в почве всех обследованных участков тяжелые металлы по их валовому содержанию образуют следующий ряд (в порядке убывания):  $Mn > Cr \geq Zn > Ni \geq Cu > Pb > Co$ . Причем в почве участков, расположенных в 0,5 и 4 км от ГОК, концентрация указанных металлов была в 1,7–4,4 раза выше фоновых для Карелии значений, тогда как в 8 км от него лишь содержание Ni, Cr, Co превышало фон в 2–2,5 раза (табл. 1).

В ходе промышленного освоения Костомукшского месторождения железных руд и строительства ГОК происходило частичное или полное уничтожение естественного почвенно-

растительного покрова и образование новых для региона вторичных местообитаний, на которых сформировались изученные нами травянистые луговидные сообщества.

Анализ флоры в изученных растительных сообществах показал, что в них произрастают 50 видов сосудистых растений, относящихся к 47 родам и 19 семействам (табл. 2). Наибольшее количество видов принадлежит семействам *Poaceae* (12 видов), *Asteraceae* (10 видов) и *Fabaceae* (7 видов). Причем на участке, удаленном на расстояние 8 км от ГОК, произрастали растения, относящиеся к 17 семействам, тогда как в 4 и 0,5 км от него – лишь к 10 и 8 семействам соответственно. При этом виды семи семейств – *Poaceae*, *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Caryophyllaceae*, *Onagraceae*, *Polygonaceae* и *Equisetaceae* – выявлены на всех изученных участках. Представители семейств *Scrophulariaceae* и *Ranunculaceae* обнаружены в 4 и 8 км от ГОК, а виды остальных семейств – только на участке, удаленном на расстояние 8 км от комбината.

Наибольшим видовым разнообразием (34 вида) характеризовались сообщества, расположенные в 8 км от комбината. При приближении к источнику загрязнения отмечено уменьшение общего числа видов (до 24), причем в большей степени – за счет представителей группы разнотравья (см. табл. 2).

Анализ экобиоморфной структуры флоры не выявил значительных различий между изученными участками: преобладающей жизненной формой во всех сообществах были многолетние травы. Большинство из них относится к мезофитам и мезотрофам (табл. 3).

Общее проективное покрытие оказалось довольно высоким на всех участках (70–83 %) и не зависело от расстояния до источника загрязнения. Тем не менее встречаемость и проективное покрытие отдельных видов в сообществах несколько различались. Так, только 12 видов из общего списка сосудистых растений присутствовали во всех сообществах, 12 видов – лишь на участке в 8 км от ГОК, 7 видов – в 4 км и 3 вида – только в 0,5 км.

Таблица 2. Проективное покрытие (%) видов в травянистых сообществах, расположенных на разном расстоянии до источника загрязнения

Семейство	Вид	Расстояние до ГОК, км		
		0,5	4,0	8,0
Poaceae	<i>Agrostis capillaris</i> L.	+	3	5
	<i>Alopecurus pratensis</i> L.	–	–	+
	<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth.	+	5	–
	<i>Dactylis glomerata</i> L.	+	+	15
	<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) Beauv.	20	15	3
	<i>Digraphis arundinacea</i> (L.) Trin.	–	–	+
	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	–	3	+
	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	–	+	–
	<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench	+	–	–
	<i>Phleum pratense</i> L.	5	10	5
	<i>Poa pratensis</i> L.	15	3	–
<i>Schedonorus arundinaceus</i> (Schreb.) Dumort.	–	+	–	
Fabaceae	<i>Amoria repens</i> (L.) C. Presl	+	5	+
	<i>Lathyrus pratensis</i> L.	–	+	5
	<i>Lathyrus tuberosus</i> L.	–	+	–
	<i>Lotus corniculatus</i> L.	30	–	–
	<i>Melilotus albus</i> Medik.	+	–	–
	<i>Trifolium pratense</i> L.	+	10	+
Asteraceae	<i>Vicia cracca</i> L.	+	+	+
	<i>Achillea millefolium</i> L.	+	+	+
	<i>Cirsium setosum</i> (Willd.) Bess.	–	3	3
	<i>Hieracium umbellatum</i> L.	+	+	–
	<i>Hieracium vulgatum</i> Fries	–	–	+
	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	+	+	+
	<i>Solidago virgaurea</i> L.	+	–	+
	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	+	+	–
	<i>Taraxacum officinale</i> Wigg. s. l.	+	+	+
	<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch. Bip.	–	+	–
Scrophulariaceae	<i>Tussilago farfara</i> L.	3	5	10
	<i>Euphrasia brevipila</i> Burn. et Gremli	–	3	+
	<i>Linaria vulgaris</i> Mill.	–	–	+
Caryophyllaceae	<i>Rhinanthus minor</i> L.	–	+	–
	<i>Cerastium holosteoides</i> Fries	–	+	–
Onagraceae	<i>Stellaria graminea</i> L.	+	–	+
	<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	+	–	10
Polygonaceae	<i>Epilobium adenocaulon</i> Hausskn.	–	+	–
	<i>Rumex acetosa</i> L.	+	–	+
Apiaceae	<i>Rumex confertus</i> Willd.	–	+	+
	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	–	–	3
Boraginaceae	<i>Echium vulgare</i> L.	–	–	+
Equisetaceae	<i>Equisetum arvense</i> L.	+	5	+
Geraniaceae	<i>Geranium pratense</i> L.	–	–	5
Lamiaceae	<i>Prunella vulgaris</i> L.	–	–	5
Parnassiaceae	<i>Parnassia palustris</i> L.	–	–	+
Plantaginaceae	<i>Plantago major</i> L.	–	+	–
Polemoniaceae	<i>Polemonium caeruleum</i> L.	+	–	–
Ranunculaceae	<i>Ranunculus acris</i> L.	–	+	3
Rosaceae	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	–	–	1
Rubiaceae	<i>Galium album</i> Mill.	–	–	10
Urticaceae	<i>Urtica dioica</i> L.	–	–	+

Примечание. «–» – отсутствие вида; «+» – проективное покрытие менее 1 %.

На участках, расположенных в 8 км от комбината, содоминантами являлись *Dactylis glomerata* L. и виды, относящиеся к группе разнотравья, – *Tussilago farfara* L., *Chamaenerion angustifolium* L. и *Galium album* Mill. В формировании сообществ, находящихся на расстоянии 0,5 и 4 км от предприятия, значительную роль играли только представители двух семейств –

*Poaceae* и *Fabaceae*. В частности, на участках, расположенных в 0,5 км от комбината, доминирующее положение занимал *Lotus corniculatus* L., а содоминантами являлись *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv. и *Poa pratensis* L. В сообществах, удаленных на расстояние 4 км от предприятия, содоминировали следующие виды: *Deschampsia cespitosa*, *Phleum pratense* L. и *Trifolium pratense* L.

В целом при приближении к ГОК в изученных сообществах проективное покрытие растений групп злаков и бобовых увеличивалось (от 28 до 40 % и от 5 до 30 % соответственно), а разнотравья, напротив, снижалось (от 50 до 5 %).

Таблица 3. Экобиоморфная характеристика флоры (% от общего числа видов) в зависимости от расстояния до источника загрязнения

Группа растений	Расстояние до ГОК, км		
	0,5	4,0	8,0
Биоморфы:			
многолетние травы	95	96	97
однолетние травы	5	4	3
По отношению к воде:			
гигромезофиты	0	4	6
мезофиты	91	89	84
мезоксерофиты	0	4	4
ксеромезофиты	9	3	6
По трофности:			
олиготрофы	4	3	3
олигомезотрофы	14	19	18
мезотрофы	82	78	79

Уменьшение числа видов сосудистых растений в травянистых сообществах с приближением к источнику загрязнения было обнаружено и другими авторами [Мордвина и др., 2005; Жуйкова, 2009]. При этом в списках видов, обнаруженных вблизи промышленных предприятий, оказались виды, выполняющие одинаковую роль в формировании растительных сообществ. В частности, такие как *Agrostis capillaris* L., *Deschampsia cespitosa*, *Trifolium pratense*, *Vicia cracca* L., *Taraxacum officinale* Wigg. s. l. и *Tussilago farfara* L., характеризовались также высокой встречаемостью, а виды семейств *Poaceae* (*Agrostis capillaris*, *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., *Deschampsia cespitosa*, *Poa pratensis* L.) и *Fabaceae* (*Amorpha repens* (L.) C. Presl, *Trifolium pratense*) являлись содоминантами в сообществах на территориях вокруг промышленных предприятий в окрестностях г. Ревды и г. Нижнего Тагила [Уманова, 2000; Жуйкова и др., 2002, 2008]. Авторы полагают, что на загрязненных территориях произрастают виды растений с широкой экологической амплитудой, характеризующиеся высокой интенсивностью вегетативного и семенного возобновления, конкурентоспособностью, устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды. При этом способность ряда видов семейства *Poaceae* (*Agrostis capillaris*, *Deschampsia cespitosa*, *Phleum pratense*) расти в непосредственной близости от промышленных предприятий, в выбросах которых содержатся Cu, Zn, Cd и Pb, обусловлена их высокой металлоустойчивостью [Парибок, 1983; Atabaeva, Sarsenbaev, 2004; Титов и др., 2007].

Накопление надземной биомассы растениями служит одним из важных показателей состояния фитоценоза при воздействии неблагоприятных факторов внешней среды. Нами выявлено, что по мере приближения к ГОК существенно снижается продуктивность надземной фитомассы изученных сообществ (рис. 1), что согласуется с результатами исследований других авторов, полученными для луговых фитоценозов, находящихся в условиях промышленного загрязнения [Жуйкова и др., 2002; Мордвина и др., 2005]. Уменьшение надземной биомассы обусловлено в определенной мере как изменением видового состава, так и уменьшением размеров растений, слагающих фитоценоз. В частности, в условиях промышленного загрязнения почв тяжелыми металлами у растений *Plantago major* L., *Phleum pratense*., *Taraxacum officinale* выявлено уменьшение высоты побега и размеров листовой пластинки [Максимова и др., 2007; Казнина и др., 2009; Жуйкова, 2009].

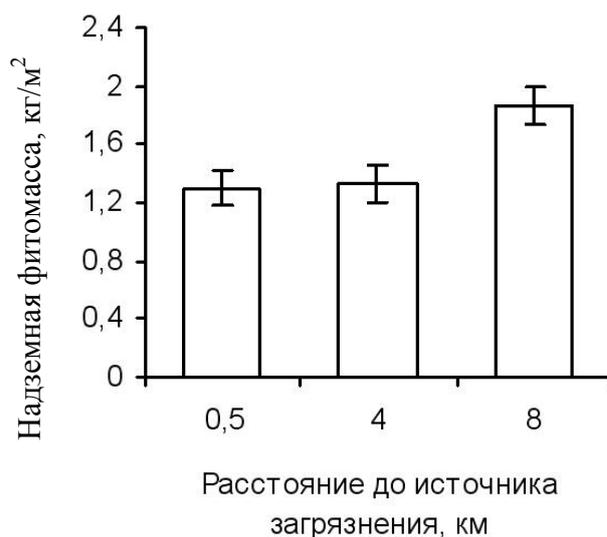


Рис. 1. Надземная фитомасса травянистых сообществ в зависимости от расстояния до источника загрязнения

**Характеристика сообществ почвенных нематод.** Известно, что растения составляют основу трофической системы в биоценозах, поэтому взаимоотношения растений с почвенными организмами особенно значимы для них. Важные позиции в качестве прямых и опосредованных потребителей в почвенных пищевых цепях занимают нематоды. Они участвуют в минерализации веществ и создании почвенного плодородия [Стриганова, 1980; Ferris et al., 2001; Griffiths et al., 2004; Ruess, Ferris, 2004].

Проведенные исследования показали, что фауна почвенных нематод изученных участков

довольно разнообразна и включает представителей 38 видов, относящихся к 32 родам. С приближением к источнику загрязнения их видовое разнообразие снижалось с 35 (в 8 км) до 23 и 19 видов (в 4 и 0,5 км соответственно). Общая же численность нематод на участке вблизи ГОК, наоборот, увеличивалась в 3,8 и 2,9 раза по сравнению с участками, удаленными от него на 4 и 8 км соответственно (рис. 2). Кроме того, на участках, расположенных в 0,5 км от комбината, сообщества нематод имели самые низкие показатели индекса зрелости (2,1 против 2,5 и 2,7 на более отдаленных участках). В почве данного биотопа обитали нематоды, имеющие низкие значения (1, 2, 3) по с-р шкале Бонгера. Они составляли 95 % от общего количества выявленных особей. Это менее специализированные, но более устойчивые к неблагоприятным условиям среды виды с коротким жизненным циклом [Bongers, 1990; Yeates et al., 1993]. В фауне близко расположенного к ГОК участка на долю нематод со значением 4 по шкале Бонгера приходилось 5 %, а нематоды со значением 5 отсутствовали. В фауне участков, удаленных на 4 и 8 км от предприятия, нематоды с высоким значением по шкале Бонгера (4 и 5) составляли 20–26 %. Данные таксоны считаются К-стратегиями, их численность сокращается или они вообще исчезают при стрессовых ситуациях [Bongers, 1990; Ferris et al., 2001]. В целом в почве участка, загрязненного тяжелыми металлами, сообщество нематод является менее разнообразным и стабильным, но более многочисленным, чем в почве других участков, что согласуется с данными, полученными в этом отношении для лесных биоценозов [Матвеева и др., 2008].

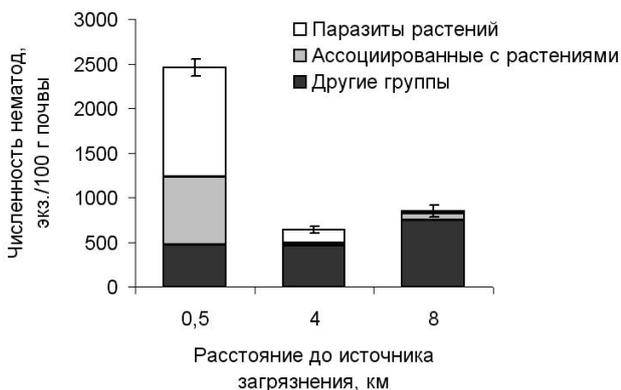


Рис. 2. Общая численность нематод и численность нематод, связанных с растениями, в зависимости от расстояния до источника загрязнения

Выявлены также изменения в эколого-трофической структуре сообществ нематод. На-

пример, на участке, расположенном в 8 км от ГОК, среди нематод доминировала группа бактериотрофов, субдоминантами выступали микотрофы и политрофы (табл. 4), что характерно для фоновых травянистых сообществ на данной широте. В непосредственной близости от комбината в почвенной фауне господствовали нематоды, трофически связанные с живыми растениями (см. рис. 2). Их численность была в 10,7 и 19,3 раза выше по сравнению с удаленными участками. Причем доминирующей становится группа фитопаразитов (49,7 % от общего количества нематод), в основном за счет увеличения численности одного вида – *Paratylenchus nanus* (Cobb 1923), являющегося паразитом луговых трав.

Таблица 4. Характеристика сообществ нематод в зависимости от расстояния до источника загрязнения

Показатель	Расстояние до ГОК, км		
	0,5	4,0	8,0
Количество родов	19	19	30
Индекс зрелости	2,1	2,7	2,5
Экологические индексы:			
CI	18,6	11,0	35,4
SI	36,8	94,2	75,4
EI	70,5	69,5	48,4
Трофическая структура (экз./100 г почвы):			
Бактериотрофы	310	152	457
Микотрофы	144	26	140
Политрофы	0	234	127
Хищные	11	43	23
Нематоды, ассоциирующие с растением	767	30	73
Паразиты растений	1233	155	30

Обнаруженное нами увеличение численности паразитов растений отмечалось также при внесении в почву азотных удобрений, химической мелиорации почв [Соловьева и др., 1989; Wasilewska, 1997], а также при промышленном загрязнении почвы тяжелыми металлами [Yeates et al., 1994; Pen-Mouratov et al., 2008].

Следует отметить, что в большинстве случаев промышленное загрязнение почвы тяжелыми металлами действует не непосредственно на почвенную биоту, а косвенно, нарушая среду их обитания, а также через изменения режима трофики [Хотько и др., 1982], что в определенной мере обусловлено составом растительных сообществ. Нами показано, что на участке, удаленном на расстояние 8 км от ГОК, растительные сообщества характеризуются наибольшим видовым разнообразием. При этом злаки доминируют с представителями разнотравья. Данные сообщества также характеризуются наибольшим разнообразием нематод, представленных основными эколого-трофическими группами. При приближении к источнику загряз-

нения наблюдается снижение видового разнообразия растительных сообществ и параллельно происходят преобразования в сообществах почвообитающих нематод. Причем наиболее значительны эти изменения на участке, расположенном в 0,5 км от ГОК. Возникает предположение о неслучайности данного явления. На это указывает факт возрастания численности в сообществе нематод загрязненной зоны представителей группы, трофически связанной с живыми растениями. При этом доминантом является *Paratylenchus nanus* – паразит луговых трав. Резкое повышение численности нематод-фитопаразитов, в том числе рода *Paratylenchus*, может быть связано с увеличением проективного покрытия злаков и бобовых в непосредственной близости от ГОК, поскольку нематоды семейства *Paratylenchidae* более тесно связаны со злаками и бобовыми [Соловьева и др., 1989]. Как известно, злаки часто являются хозяевами паразитических видов нематод [Курт и др., 1980; Соловьева, 1986; Волкова, 1998; Буторина и др., 2007]. Кроме того, преобладание фитопаразита *Paratylenchus nanus* выявлено в почве луговых экосистем, подверженной влиянию выбросов промышленных предприятий [Хотько и др., 1982; Wasilewska, 1997].

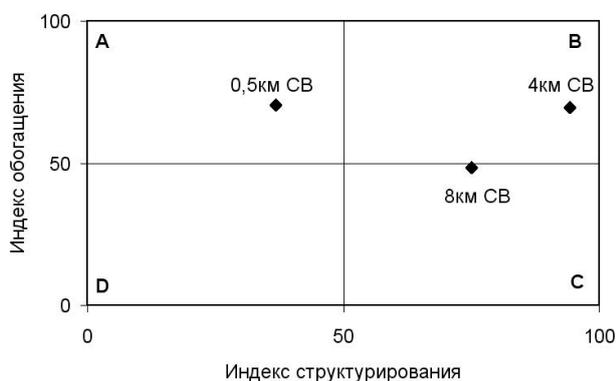


Рис. 3. Фаунистический профиль, характеризующий почвенную трофическую сеть травянистых биоценозов в зоне воздействия Костомукшского ГОК:

A – высоконарушенная почвенная экосистема, B – низкий/средний уровень нарушенности, C – ненарушенная, D – экосистема в условиях стресса (по [Ferris et al., 2001])

С другой стороны, питаясь на корнях растений, нематоды-фитопаразиты ослабляют и повреждают растения, что приводит к снижению биомассы их подземных и надземных органов [Соловьева, 1972; Груздева, Харин, 1997]. Увеличение численности нематод могло явиться также одной из причин отмеченного нами уменьшения продуктивности надземной фитомассы сообщества вблизи ГОК. Следовательно, в данном случае прослеживается опосре-

дованное влияние тяжелых металлов на растительность через изменение трофических связей в сообществах почвенных нематод.

Расчет экологических индексов [Ferris et al., 2001] показал, что на участке, расположенном на расстоянии 0,5 км от комбината, высокое значение имеет индекс EI, характеризующий чувствительность нематод R-стратегов к возрастанию доступности пищевого ресурса, тогда как индекс структурирования пищевой сети SI, напротив, был низким (см. табл. 4). Участки, расположенные в 4 и 8 км от комбината, характеризуются усложнением и большей зрелостью почвенной пищевой сети. На основе этих показателей изученные биотопы располагаются в разных квадратах фаунистического профиля (рис. 3). Так, почвенная трофическая сеть биотопа, расположенного в 0,5 км от ГОК, рассматривается как нарушенная, а в 4 и 8 км от него – средненарушенной и ненарушенной соответственно. В целом рассчитанные на основе плотности популяций состава трофических групп и функциональных комплексов нематод экологические индексы подтверждают, что биотоп, расположенный в 0,5-километровой зоне, прилегающей к ГОК, испытывает наибольшее негативное воздействие со стороны промышленного предприятия.

## Заключение

На основании проведенного исследования установлено, что в районе промышленного загрязнения, обусловленного выбросами Костомукшского ГОК, формируются вторичные травянистые сообщества. Они характеризуются довольно сходной экобиоморфной структурой и высоким общим проективным покрытием. При приближении к комбинату уменьшается количество видов в сообществах, главным образом за счет видов растений группы разнотравья, снижается накопление надземной биомассы. При этом ведущая роль в формировании сообществ, расположенных в 0,5 и 4 км от ГОК, принадлежит представителям семейств *Poaceae* и *Fabaceae*.

В изученных сообществах выявлены также признаки воздействия выбросов комбината на почвенную фауну нематод, которые наиболее отчетливо проявились на участке в 0,5 км от него. Наблюдается обеднение фауны, снижение индекса степени зрелости сообщества, исчезновение видов отдельных эколого-трофических групп, но увеличивается общая численность нематод за счет представителей фитотрофов. При этом доминирующее положение занимает *Paratylenchus nanus* – паразит луговых трав.

Полученные результаты позволяют также предположить, что в условиях промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами уменьшение продуктивности наземной фитомассы травянистых сообществ связано как с прямым ингибирующим действием металлов на растения, так и с опосредованным влиянием на растения через трофические цепи – увеличением численности нематод-фитофагов в сообществе почвенных нематод.

Рассчитанные на основе плотности популяций, состава трофических групп и функциональных комплексов нематод экологические индексы подтверждают, что биотоп, расположенный в 0,5-километровой зоне вокруг ГОК, испытывает наибольшее отрицательное воздействие со стороны промышленного предприятия.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития» (подпрограмма «Биоразнообразие: состояние и динамика»), Программы фундаментальных исследований ОБН РАН «Биологические ресурсы России: динамика в условиях глобальных климатических и антропогенных воздействий» (№ 01201262102), гранта РГНФ № 13-06-00414.*

## Литература

- Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
- Атлас Карельской АССР. М.: ГУГК СССР. 1989. 40 с.
- Буторина Н. Н., Чижов В. Н., Уразбахтин З. М., Андреев С. Изучение фауны корневых эктопаразитов газонных трав // Нематоды естественных и трансформированных экосистем. Петрозаводск: Издательский дом «ПИН». 2007. С. 28.
- Волкова Т. В. Фитопаразитические нематоды луговых ценозов, кормовых трав и пастбищ, их трофические связи с растениями-хозяевами // Взаимоотношения паразита и хозяина: тезисы докл. Всерос. научн. конф. (Москва, 8–10 декабря 1998 г.). М., 1998. С. 13.
- Горышина Т. К. Экология растений. Л.: Изд-во ЛГУ. 1991. 189 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2008 году / Мин-во сельского, рыбного хозяйства и экологии РК. Петрозаводск: Издательский дом «Карелия», 2009. 288 с.
- Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2009 году / Мин-во сельского, рыбного хозяйства и экологии РК. Петрозаводск: Издательский дом «Карелия», 2010. 296 с.
- Груздева Л. И., Харин В. Н. Влияние фосфатного режима низинных торфяных почв на сообщества нематод // Почвоведение. 1997. № 6. С. 717–722.
- Жиров В. К., Голубева Е. И., Говорова А. Ф., Хаибатаев А. Х. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере. М.: Наука, 2007. 166 с.
- Жуйкова Т. В. Реакция ценопопуляций и травянистых сообществ на химическое загрязнение среды: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Екатеринбург, 2009. 40 с.
- Жуйкова Т. В., Мордвина Е. С., Баймашева А. О., Фриз О. А. Фитоиндикация и промышленный регион // Биота горных территорий: история и современное состояние: материалы конф. молодых ученых (Екатеринбург, 15–19 апреля 2002 г.). Екатеринбург, 2002. С. 53–65.
- Жуйкова Т. В., Мелинг Э. В., Безель В. С. Реакция луговых сообществ на токсическое действие среды // Урбоэкосистемы. Проблемы и перспективы развития: материалы III междунар. науч.-практ. конф. (Ишим, 21–22 марта 2008 г.). Ишим, 2008. С. 51–55.
- Загуральская Л. М. Использование биохимических показателей для оценки степени техногенной деградации почв // Почвенные ресурсы Карелии, их рациональное использование и охрана (экологические проблемы). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С. 132–142.
- Казнина Н. М., Титов А. Ф., Лайдинен Г. Ф., Батова Ю. В. Влияние промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на морфологические признаки растений *Phleum pratense* L. // Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Экспериментальная биология». Петрозаводск. 2009. № 3. С. 50–55.
- Курт Л. А., Чижов В. Н., Зотова З. Я., Иноземцев В. В. Нематоды луговых и пастбищных трав // Сельское хозяйство за рубежом. 1980. № 9. С. 25–29.
- Лазарева И. П. К вопросу о химическом загрязнении почв // Почвенные ресурсы Карелии, их рациональное использование и охрана (экологические проблемы). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С. 102–131.
- Лазарева И. П., Кучко А. А., Кравченко А. В., Габукова В. В., Литинский П. Ю., Поташева М. А., Калинин Н. М. Влияние аэротехногенного загрязнения на состояние сосновых лесов Северной Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. 52 с.
- Литинский П. Ю. Оценка динамики деградации лесов в зоне воздействия выбросов Костомукшского ГОКа дистанционными методами // Проблемы антропогенной трансформации лесных биогеоценозов Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1996. С. 182–192.
- Максимова Е. В., Косицина А. А., Макурина О. Н. Влияние антропогенных факторов химической природы на некоторые эколого-биохимические характеристики растений // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. 2007. № 8 (58). С. 146–152.
- Матвеева Е. М., Груздева Л. И., Коваленко Т. Е., Суцук А. А. Почвенные нематоды как биоиндикаторы техногенного загрязнения таежных экосистем // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография. Вып. 14. Петрозаводск, 2008. С. 63–75.

Медведева М. В. Биологическая диагностика аэротехногенного загрязнения почв северо-таежной подзоны Карелии (на примере Костомукшского ГОКа): автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 25 с.

Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. М.: Гидрометеиздат, 1981. 109 с.

Мордвина Е. С., Жуйкова Т. В., Арефьев Ю. В. Травянистые сообщества в условиях промышленного города // Экология: от генов до экосистем: матер. конф. молодых ученых (Екатеринбург, 25–29 апреля 2005 г.). Екатеринбург, 2005. С. 174–175.

Парибок Т. А. Загрязнение растений металлами и его эколого-физиологические последствия // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л.: Наука, 1983. С. 82–99.

Раменская М. Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л.: Наука, 1983. 216 с.

Сазонова Т. А., Терехова Е. Н., Галибина Н. А., Таланова Т. Ю., Шредерс С. М., Чиненова Л. А., Канючкова Г. К. Оценка функционального состояния *Pinus sylvestris* L. в условиях слабого загрязнения // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем северо-запада России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2001. С. 157–174.

Серебряков И. Г. Экологическая морфология растений. М.: Высшая школа, 1962. 277 с.

Соловьева Г. И. Паразитические нематоды древесных и травянистых растений. Обзор рода *Paratylenchus* Micoletzky, 1922 (*Nematoda: Criconeematidae*). Л.: Наука, 1972. 103 с.

Соловьева Г. И. Экология почвенных нематод. Л.: Наука, 1986. 247 с.

Соловьева Г. И., Груздева Л. И., Козловская Я. Влияние минеральных удобрений на сообщества почвенных нематод. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1989. 136 с.

Стриганова Б. Р. Питание почвенных сапрофагов. М.: Наука, 1980. 244 с.

Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 172 с.

Уманова Н. Е. Особенности горизонтальной структуры луговых сообществ под влиянием выбросов медеплавильного завода // Биосфера и человечество: материалы конф. молодых ученых (Екатеринбург, 24–28 апреля, 2000 г.). Екатеринбург, 2000. С. 280–283.

Федорец, Н. Г., Бахмет О. Н., Солодовников А. Н., Морозов А. К. Почвы Карелии. Геохимический атлас. М.: Наука. 2008. 47 с.

Хотько Э. И., Ветрова С. Н., Матвеев А. А., Чумаков Л. С. Почвенные беспозвоночные и промышленное загрязнение. Минск: Наука и техника, 1982. 264 с.

Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья, 1995. 990 с.

Шенников А. П. Введение в геоботанику. Л., 1964. 426 с.

Щербаков Н. М., Зябченко С. С., Рябинин Н. И. Природные особенности лесов // Биологические ресурсы района Костомукши, пути освоения и охраны. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1977. С. 90–100

Шильцова Г. В., Ласточкина В. Г. Химический состав атмосферных выпадений в зоне влияния Костомукшского железорудного горно-обогатительного производства (Северная Карелия). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 59 с.

Atabaeva S. D., Sarsenbayev B. A. Contamination of soils and plants by heavy metals around metallurgical enterprises in east Kazakhstan // Проблемы физиологии растений Севера: тезисы докл. Междунар. конф. (Петрозаводск, 15–18 июня 2004 г.). Петрозаводск, 2004. С. 218.

Bongers T. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition // Oecologia. 1990. Vol. 83. P. 14–19.

Ferris H., Bongers T., de Goede R. G. M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept // Applied Soil Ecology. 2001. Vol. 18. P. 13–29.

Griffiths B. S., Van Der Putten W. H., De Ruiter P. C. The structure and function of food webs in soil // Nematology Monographs & Perspectives. 2004. Vol. 2. P. 515–527.

Merrington G., Alloway B. J. The flux of Cd, Cu, Pb and Zn in mining polluted soils // Water Air Soil Pollut. 1994. Vol. 73. P. 333–344.

Pen-Mouratov S., Shukurov N., Steinberger Y. Influence of industrial heavy metal pollution on soil free-living nematode population // Environ. Pollut. 2008. Vol. 152. P. 172–183.

Ruess L., Ferris H. Decomposition pathways and successional changes // Nematology Monographs & Perspectives. 2004. Vol. 2. P. 547–556.

Sanità di Toppi L., Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. // Environ. Exp. Bot. 1999. Vol. 41. P. 105–130.

Wasilewska L. Soil invertebrates as bioindicators, with special reference to soil-inhabiting nematodes // Russian Journal of Nematology. 1997. Vol. 5, № 2. P. 113–126.

Yeates G. W., Bongers T., de Goede R. G. M., Freckman D. W. & Georgieva S. S. Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists // J. of Nematology. 1993. Vol. 25, N 3. P. 315–331.

Yeates G. W., Orchard V. A., Speir T. W., Hunt J. L., Hermans M. C. C. Impact of pasture contamination by copper, chromium, arsenic timber preservative on soil biological activity // Biol. Fertil. Soils. 1994. Vol. 18. P. 200–208.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Лайдинен Галина Федоровна**

старший научный сотрудник, к. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: Laidinen@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 762706

### **Груздева Людмила Ивановна**

ведущий научный сотрудник, к. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: gruzdeva@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 762706

### **Титов Александр Федорович**

председатель КарНЦ РАН, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф.  
руководитель лаб. экологической физиологии растений  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,  
Россия, 185910  
эл. почта: titov@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 769710

### **Казнина Наталья Мстиславовна**

старший научный сотрудник, к. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: kaznina@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 762706

### **Батова Юлия Валерьевна**

научный сотрудник, к. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: batova@krc.karelia.ru  
тел.: (8142) 762706

### **Сушук Анна Алексеевна**

младший научный сотрудник, к. б. н.  
Институт биологии Карельского научного центра РАН  
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск,  
Республика Карелия, Россия, 185910  
эл. почта: anna\_sushchuk@mail.ru  
тел.: (8142) 762706

### **Laidinen, Galina**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: laidinen@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 762706

### **Gruzdeva, Ludmila**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: gruzdeva@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 762706

### **Titov, Alexandr**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: titov@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 769710

### **Kaznina, Natalia**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: kaznina@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 762706

### **Batova, Yulia**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: batova@krc.karelia.ru  
tel.: (8142) 762706

### **Sushchuk, Anna**

Institute of Biology, Karelian Research Centre,  
Russian Academy of Sciences  
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,  
Karelia, Russia  
e-mail: anna\_sushchuk@mail.ru  
tel.: (8142) 762706