

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ФИТОПАРАЗИТИЧЕСКИХ НЕМАТОД

А. А. СУЩУК, Л. И. ГРУЗДЕВА, Е. П. ИЕШКО

Институт биологии Карельского научного центра РАН

Анализировали фауну нематод в техногенно нарушенных и естественных биогеоценозах. Выявлено, что при загрязнении почвы тяжелыми металлами происходят изменения в плотности популяций, таксономическом разнообразии фауны, трофической структуре сообществ нематод. Увеличивается доля паразитических видов. Экспериментально на модельном объекте – картофельной цистообразующей нематоды *Globodera rostochiensis* показано влияние солей *Cd* и *Pb* различной концентрации на процесс размножения глободеры.

A. A. SUSCHUK, L. I. GRUZDEVA, E. P. IESHKO. EFFECT OF HEAVY METALS ON PLANT-PARASITIC NEMATODES

Nematode fauna in disturbed and natural biogeocenoses was analyzed. Heavy metal contamination of soil resulted in changes of population density, species diversity, trophic structure of nematode communities. Part of parasitic species in the fauna increased. Effect of different concentrations of cadmium and lead salts on reproduction of potato golden cyst-nematode *Globodera rostochiensis* Woll. was observed under laboratory conditions.

Ключевые слова: тяжелые металлы, фитопаразитические нематоды, структура сообществ нематод.

Анализ отечественных и зарубежных научных работ показал, что для характеристики почв, загрязненных химическими веществами, в том числе тяжелыми металлами, необходимо учитывать ответную реакцию населяющих почву живых организмов (Наплекова, 1982; Груздева и др., 2003; Haight et al., 1982; Bongers, 1990). Промышленные водные загрязнения, дизельное топливо, фумиганты оказывают токсический эффект на почвенных нематод. Он проявлялся в уменьшении общего количества нематод уже через 1 неделю после обработки почвы, а затем последующем увеличении численности популяций устойчивых видов с короткими циклами развития (Jovicic, 1990; Kappers, Manger, 1990; Yeates, Bamforth, 1990; Voag et al., 1997). Имеются данные, что при загрязнении почвы пастбища тяжелыми металлами (*Cu*, *Cr*, *As*) нематоды были более многочисленны при низком уровне загрязнения (Yeates et al., 1994). При анализе почвенных показателей на

территории г. Петрозаводска были выявлены участки с повышенным содержанием тяжелых металлов (*Pb*, *Cu*, *Zn*, *Co*, *Cr*). В основном это земли, расположенные вблизи промышленных предприятий (Федорец, Медведева, 2005). Кроме того, в некоторых районах Карелии, имеющих особенности геологического строения подстилающих пород, в почве обнаружено повышенное содержание ТМ. Примером может служить о. Кижы.

Цель настоящего исследования – изучение влияния повышенного содержания тяжелых металлов в почве на сообщества нематод в естественных биогеоценозах, при техногенной нагрузке и эксперименте с модельным объектом – картофельной цистообразующей нематодой.

Материал и методы

Почвенные образцы для изучения фауны нематод были отобраны в зоне влияния промыш-

ленного предприятия АО «Онежский тракторный завод» (г. Петрозаводск) и в луговых биоценозах о. Кижы.

Нематод выделяли по модифицированному методу Бермана из навесок почвы в 30 г, экспозиция выделения – 48 часов. Фиксатор – ТАФ (триэтанолламин + формалин + вода, в соотношении 2:7:91). Численность нематод рассчитывали на 100 г почвы. Идентификацию нематод до рода (для половозрелых особей – до вида) проводили на временных микроскопических препаратах. Устанавливали систематическую принадлежность 100 особей из пробы. Все обнаруженные нами нематоды в соответствии с их трофикой были объединены в шесть эколого-трофических групп. Это бактериотрофы (Б), микотрофы (М), политрофы (П), хищники (Х), нематоды, облигатно или факультативно связанные с живыми растениями – паразиты растений (Пр) и ассоциирующие с растениями (Аср) (Yeates et al., 1993).

Для оценки состояния сообщества нематод использованы следующие параметры: плотность популяций нематод (кол-во экз./100 г почвы); разнообразие фауны (индекс Шеннона H'), доминирование таксонов (индекс Симпсона C), выровненность обилия животных в сообществе (индекс Пиелу e) (Одум, 1986); эколого-трофическую структуру, индекс зрелости сообществ нематод (ΣMI) (Bongers, 1990).

Индекс зрелости сообществ нематод ΣMI рассчитывается по формуле:

$$\Sigma MI = \sum_{i=1}^n v_{(i)} \times f_{(i)},$$

где n – количество таксонов, $v_{(i)}$ – значение i -го таксона, $f_{(i)}$ – частота этого таксона. Подсчитывается количество родов нематод в пробе. Каждый таксон имеет значение от 1 до 5 по $s-p$ шкале Бонгерса (Bongers, 1990). Суммируются значения всех родов и рассчитывается индекс зрелости сообщества нематод.

Экспериментальное изучение влияния солей свинца и кадмия на размножение картофельной цистообразующей нематоды (*KЦН*) *Globodera rostochiensis* проводили в закрытых сосудах. В каждый сосуд помещали 200 г сухого стерильного песка, клубень картофеля и 30 мл дистиллированной воды (контроль) или растворы солей тяжелых металлов ($CdSO_4$ в концентрациях 1,5; 3,0; 6,0 мг/л; $PbSO_4$ – 16,

32, 64 мг/л), уровень инвазии – 10 цист. Для каждой исследованной дозы была 10-кратная повторность. ПДК для свинца – 32 мг/л, для кадмия – 3 мг/л. Длительность эксперимента – 4 месяца. По окончании опыта подсчитывали количество вновь образовавшихся самок нематоды.

Определение тяжелых металлов в почвенных образцах выполнялось в аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН (зав. лабораторией А. К. Морозов).

Результаты и обсуждение

1. Трансформированный биоценоз в зоне воздействия промышленного предприятия

В течение двух лет исследовалась фауна и структура сообществ нематод почвы с высоким уровнем накопления тяжелых металлов (ТМ). Биоценоз расположен на расстоянии 50 м от источника загрязнения, характеризуется повышенным содержанием Pb , Cu , Zn , Co , Cr , Mn в почве (табл. 1, № 4, 5).

В России нормативы установлены «Перечнем предельно-допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве» (Фомин, Фомин, 2001). Степень накопления тяжелых металлов оценивается как отношение содержания веществ-загрязнителей в почве к величинам предельно допустимых концентраций (ПДК), ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) или к фоновым показателям (Федорец, Медведева, 2005). За фоновое принято состояние природных экосистем на обширных неурбанизированных территориях, испытывающих умеренное антропогенное воздействие за счет загрязняющих веществ, поступающих от ближних и дальних источников эмиссий (Государственный доклад..., 1998).

Республика Карелия является малозагрязненным регионом, фоновые концентрации для большинства ТМ меньше, чем предельно допустимые. В почве в районе ОТЗ содержание Co , Cr , Mn превышает фоновое, концентрации Pb , Cu , Zn выше, чем фоновые и предельно допустимые. Особенно высоко накопление свинца, составляющее 56–58 ПДК (табл. 1).

Фауна и структура сообществ нематод территории, расположенной в зоне влияния промышленного предприятия, характеризуется:

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в почве трансформированных (в зоне влияния завода) и луговых биоценозов о. Кижы, мг/кг

№ биотопа	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	Mn
1 Кижы	1,08	17,6	46,7	85,2	50,5	13,6	35,2	641
2	0,23	14,3	111	84,2	108	23,2	45,7	519
3	1,01	12,3	52,7	82,1	60,4	20,2	38,7	757
4 ОТЗ	0,24	1780	123	94,0	27,0	2,60	39,5	920
5	0,30	1850	241	84,0	15,9	7,21	15,8	1300
ПДК	3,0	32,0	100,0	300,0	50,0	50,0	100,0	1500
Карелия, фоновое содержание	0,54	26,6	63,4	83,0	72	2,0	10,0	403,1

Примечание. 1–3 – разнотравные луга на озах, 4–5 – биоценоз в зоне влияния промышленного предприятия АО «ОТЗ» (4 – органогенный, 5 – минеральный горизонт). ПДК по: Федорец, Медведева, 2005.

– Аномально высокими значениями плотности популяций нематод, особенно для органо-генного горизонта: 9299 экз. в 2006 г., 35733 экз./100 г почвы – в 2007 г. В естественных биоценозах плотность популяций в среднем 2–3 тыс. экз./100 г в зависимости от типа почвы. Увеличение численности нематод при загрязнении среды тяжелыми металлами отмечалось ранее рядом авторов (Weiss, Larink, 1991; Yeates et al., 1994; Georgieva et al., 2002).

– Малым таксономическим разнообразием фауны: 21 род нематод в минеральном горизонте, в луговых (фоновых) биоценозах этот показатель может достигать 45 родов. Индекс разнообразия Шеннона имеет низкие значения ($H' = 2,7-3,3$). Отмечена высокая степень доминирования таксонов в фауне (C до 0,32) и низкая степень выровненности обилия животных в сообществе (e до 1,85). Эти показатели свидетельствуют о явлении супердоминирования отдельных видов и родов. В зоне, постоянно подвергающейся выбросам литейного цеха, нами обнаружена в органо-генном горизонте высокая численность нематод рода *Tylenchus* (70,6% от общего количества нематод) и рода *Paratylenchus* (34,3–66,4%) в минеральном горизонте почвы (рис. 1). Представители данных родов тесно связаны с живыми растениями: нематоды р. *Tylenchus* – свободноживущие участники биоценозов ризосферы, факультативные эктопаразиты корневой системы, р. *Paratylenchus* – эктопаразитические перфораторы (Парамонов, 1970).

Паразитические нематоды являются доминирующей трофической группой данного сообщества, на их долю приходится от 54,2 до 71,2% фауны (табл. 2).

По мнению ряда исследователей, увеличение численности облигатных паразитов растений связано с процессами деградации окружающей среды и отмечалось в результате чрезмерного внесения минеральных азотных удобрений, интенсификации аграрных мероприятий, загрязнения кислотными дождями и мелиорации торфяных почв болот. Супердоминирование

Таблица 2. Эколого-трофические группы нематод (%) в луговых биоценозах о. Кижы и трансформированных биоценозах (г. Петрозаводск) в 2006 г.

№ био-топа	Б	М	Асп	П	Х	Пр
1 Кижы	30,3	50,3	5,8	7,2	1,5	4,9
2	37,8	15,5	15	6,4	1,6	23,7
3	31,4	20,3	7,3	1,6	8	31,4
4 ОТЗ	30,4	13,8	0,6	0	1	54,2
5	20,8	10,3	1,4	0,1	0	67,4
6	63,2	15,9	3,2	6,6	5,9	5,2

Примечание. 1–3 – разнотравные луга на озах, 4–5 – биоценоз в зоне влияния промышленного предприятия АО «ОТЗ» (4 – органо-генный, 5 – минеральный горизонт), 6 – луг-овсянничник с фоновым содержанием ТМ. Эколого-трофические группы: Б – бактериотрофы, М – микотрофы, Асп – нематоды, ассоциированные с растениями, Пр – паразиты растений, П – политрофы, Х – хищники.

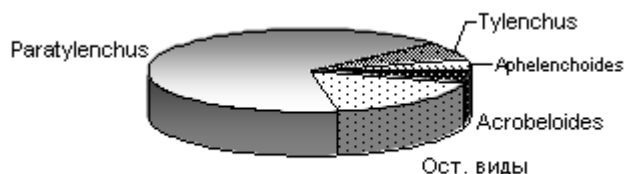


Рис. 1. Процентное соотношение доминирующих родов нематод в почве минерального горизонта на расстоянии 50 м от промышленного предприятия (ОТЗ) в 2007 г.

видов р. *Paratylenchus* выявлено в условиях луговых экосистем, подвергающихся трансформации (Wasilewska, 1997). Преобладание фитогельминтов специфического патогенного эффекта (виды родов *Tylenchorhynchus*, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus*, *Paratylenchus*) наблюдалось в почве, подверженной влиянию выбросов металлургического комплекса (Ветрова, 1982). Это объясняется низкой проницаемостью кутикулы у видов отряда *Tylenchida* (Парамонов, 1962). В нашем исследовании обнаружено повышенное содержание паразитов растений при загрязнении почвы ТМ. Супердоминирование нематод р. *Paratylenchus* является индикатором нарушенности почв.

Для почв, загрязненных ТМ, характерны низкие показатели зрелости сообществ нематод. В исследованном нами биоценозе $\Sigma MI = 2,1-2,4$. Индекс зрелости (ΣMI) основан на экологических характеристиках таксонов нематод. Каждый род нематод имеет значения от 1 до 5 по шкале с-р (первые буквы от названий – колонизаторы – персисторы). Типичные колонизаторы обладают короткими жизненными циклами, высокой устойчивостью к токсикантам и могут выживать при неблагоприятных условиях среды. По шкале с-р они имеют значения 1, 2. Персисторы обладают низкой репродуктивной способностью, повышенной чувствительностью к условиям среды и сокращают численность при стрессовых ситуациях. По шкале с-р они имеют значения 4, 5. Чем больше видов нематод со значениями 1, 2, тем меньше зрелость их нематодного сообщества. В ненарушенных луговых биоценозах индекс $\Sigma MI = 2,8-3$.

Таким образом, сообщество почвенных нематод в условиях сильного загрязнения характеризуется аномально высокими значениями плотности популяций, низким индексом зрелости, явлением супердоминирования родов отряда *Tylenchida*.

II. Луговые биоценозы о. Кижы с повышенным содержанием ТМ в почве, вызванным естественными причинами

В некоторых районах Карелии, имеющих особенности геологического строения подстилающих пород, в почве обнаружено повышенное содержание ТМ. Примером может служить о. Кижы. Остров сформирован на шунгитовой морене и флювиогляциальных отложениях

(озовые гряды), которые благодаря присутствию шунгитов и диабазов обогащены *Co*, *Ni*, *Cd*, *Cr*, *Zn*, *Pb*, *Cu* и другими микроэлементами.

Фауна почвенных нематод исследованных луговых биоценозов о. Кижы, сформировавшихся на озовых грядах, имеет некоторые особенности. Она характеризуется богатым видовым разнообразием (отмечены представители 25–31 родов), высокими значениями индекса Шеннона $H' = 3,9–4,1$ (против 2,7–3,2 в зонах промышленного загрязнения), низким уровнем доминирования таксонов ($C = 0,08–0,1$), более высокой зрелостью нематодных сообществ ($\Sigma MI = 2,5–3,1$). Как и в почве нарушенного биоценоза (зона воздействия промышленного предприятия), в сообществах нематод отмечена высокая доля паразитических видов (до 31,4%) (табл. 2). Однако наблюдается смена доминирующих родов нематод. Ими выступают представители родов *Helicotylenchus*, *Tylenchorhynchus*, которые поражают корни травянистых растений и характерны для луговых биоценозов. В почве луга с фоновым содержанием ТМ структура сообщества нематод иная: высока доля бактериотрофов, а численность паразитов небольшая (рис. 2).

III. Экспериментальные исследования воздействия ТМ на картофельную цистообразующую нематоду

Для исследования влияния различных концентраций солей *Cd* и *Pb* был проведен эксперимент на модельном объекте – картофельной цистообразующей нематоды (КЦН). Это паразит картофеля, распространенный в агроценозах Карелии и снижающий урожайность культуры до 30–50%. В опыте была использована низкая инвазионная нагрузка – 10 цист на растении (табл. 3).

Выявлено, что внесение *Cd* и *Pb* в дозе 0,5 ПДК слабо подавляет размножение КЦН. По количеству образовавшихся цист (самок) нового поколения различия между контролем и опытными вариантами оказались статистически незначимы (рис. 3). Воздействие высокой дозы кадмия вызывало достоверное снижение количества цист по отношению к контролю и вари-

Таблица 3. Количество цист картофельной цистообразующей нематоды *Globodera rostochiensis*, образовавшихся при воздействии различных концентраций свинца и кадмия

	Количество цист, шт.
Контроль	17,9 ± 1,5 *
Pb, 16 мг/л	17,4 ± 7,5
Pb, 32 мг/л	14,6 ± 1,0 **
Pb, 64 мг/л	14,7 ± 0,9 **
Cd, 1,5 мг/л	18,8 ± 1,6 *
Cd, 3,0 мг/л	16,7 ± 1,0
Cd, 6,0 мг/л	14,2 ± 0,8

Примечание. * – различия значимы по отношению к высокой дозе Cd (6 мг/л), ** – различия значимы по отношению к низкой дозе Pb (16 мг/л) ($P < 0,05$).

анту с низкой дозой ($P < 0,05$). Для свинца отмечена та же тенденция, но различия между вариантами незначимы.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости продолжения экспериментальных исследований для изучения вопроса: взаимодействуют ли между собой уровень инвазионной нагрузки паразитической нематоды на растение и характер влияния различных концентраций тяжелых металлов на процесс образования самок картофельной нематоды.

Выводы

1. Почвенные нематоды являются организмами, чувствительными к загрязнению среды тяжелыми металлами.
2. Повышение содержания тяжелых металлов в почве приводит к снижению индексов разнообразия фауны, выровненности обилия животных, возрастанию значения индекса доминирования таксонов.
3. В условиях загрязнения почвы ТМ отмечены аномально высокие значения плотности популяций нематод, особенно для органогенного горизонта почвы.
4. В биотопах с повышенным содержанием поллютантов снижается степень зрелости сообществ нематод (ΣMI).
5. Изменяется структура сообществ нематод: доминирующей трофической группой



Рис. 2. Эколого-трофическая структура сообществ нематод луговых биоценозов с естественным повышенным содержанием тяжелых металлов в почве

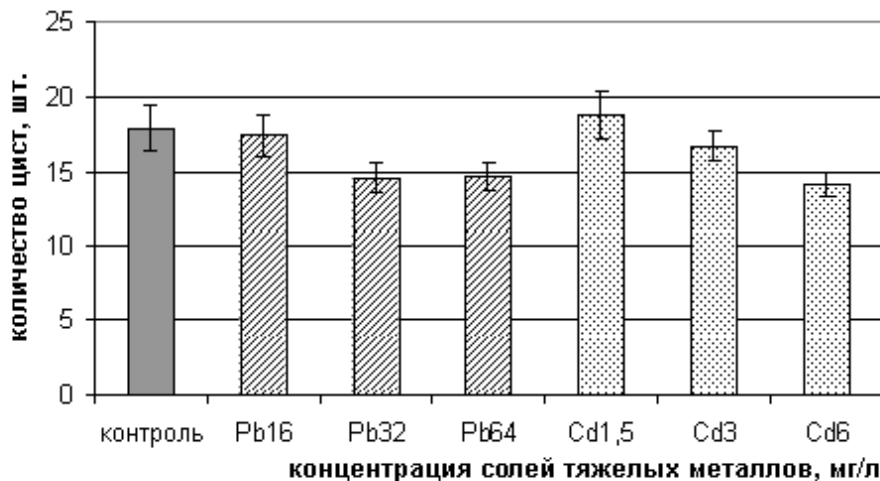


Рис. 3. Влияние солей свинца и кадмия на размножение паразитической нематоды *Globodera rostochiensis*

становятся облигатные паразиты растений, что связано с процессами деградации окружающей среды.

6. Результаты лабораторных экспериментов показывают возможность использования паразитических видов нематод в качестве модельных объектов для оценки уровня загрязнения почвы тяжелыми металлами.

Литература

- Ветрова С. Н., 1982. Почвенные беспозвоночные и промышленное загрязнение / Ред. Л. Г. Максимова. Мн.: Наука и техника. С. 14, 190–191.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 1997 году, 1998 / Государственный комитет охраны окружающей среды по Республике Карелия. Петрозаводск. 220 с.
- Груздева Л. И., Матвеева Е. М., Коваленко Т. Е., 2003. Влияние солей тяжелых металлов на сообщества почвообитающих нематод // Почвоведение. № 5. С. 596–606.
- Наплекова Н. Н., 1982. Влияние солей некоторых тяжелых металлов на физиологическую активность целлюлозоразрушающих микроорганизмов // Изв. Сиб. отд. АН СССР. Сер. биол. наук. Вып. 2, № 10. С. 79–85.
- Одум Ю., 1986. Экология: В 2-х т. Т. 2 / Пер. с англ. М.: Мир. С. 133.
- Парамонов А. А., 1962, 1970. Основы фитогельминтологии. М.: Наука. Т. 1. 446 с.; Т. 3. 255 с.
- Федорец Н. Г., Медведева М. В., 2005. Эколого-микробиологическая оценка состояния почв города Петрозаводска. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН. 96 с.
- Фомин Г. С., Фомин А. Г., 2001. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам: Справочник. М.: «Протектор». 304 с.
- Boag B., Jefferies R. A., Vettraino L. M., 1997. Impact of diesel pollution on soil inhabiting nematodes // Abstr. II Intern. Nematol. Symp. of the Russ. Soc. of Nematol. P. 4.
- Bongers T., 1990. The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition // Ecologia. Vol. 83. P. 14–19.
- Georgieva S. S., McGrath S. P., Hooper D. J., Chambers B. S., 2002. Nematode communities under stress: the long-term effects of heavy metals in soil treated with sewage sludge // Applied Soil Ecology. Vol. 20. P. 27–42.
- Haight M., Mudry T., Pasternak J., 1982. Toxicity of seven heavy metals on *Panagrellus silusial*: the efficacy of the free-living nematode as an in vivo toxicological bioassay // Nematologica. Vol. 28. P. 1–11.
- Jovicic D., 1990. Effects of industrial water pollution on soil nematodes // Nematologica. Vol. 36, N 4. P. 363.
- Kappers F. I., Manger R., 1990. Population dynamics of free-living nematodes in oil contaminated soil during the clean-up with a microbiological restoration technique // Nematologica. Vol. 36, N 4. P. 363.
- Wasilewska L., 1997. Soil invertebrates as bioindicators, with special reference to soil-inhabiting nematodes // Russian Journal of Nematology. Vol. 5, N 2. P. 113–126.
- Weiss B., Larink O., 1991. Influence of sewage sludge and heavy metals on nematodes in an arable soil // Biol. Fertil. Soils. Vol. 12. P. 5–9.
- Yeates G., Bamforth S. S., 1990. Recolonization by nematodes of methyl bromide sterilized soil in forest and pasture // Nematologica. Vol. 36, N 4. P. 402–403.
- Yeates G. W., Bongers T., de Goede R. G. M. et al., 1993. Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists // J. of Nematology. Vol. 25, N 3. P. 315–331.
- Yeates G. W., Orchard V. A., Speir T. W. et al., 1994. Impact of pasture contamination by copper, chromium, arsenic timber preservative on soil biological activity // Biol. Fertil. Soils. Vol. 18. P. 200–208.