



003482458

На правах рукописи

Алсуф

Сущук Анна Алексеевна

**ПОЧВЕННЫЕ НЕМАТОДЫ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ
ЭКОСИСТЕМ КАРЕЛИИ**

03.00.16 – экология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

5 НОЯ 2009

Сыктывкар – 2009

Работа выполнена в лаборатории паразитологии животных и растений
Учреждения Российской академии наук Института биологии Карельского
научного центра РАН

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Евгений Павлович Иешко

Официальные оппоненты: чл.-корр. РАН
Белла Рафаиловна Стриганова
доктор биологических наук, профессор
Модест Михайлович Долгин

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Зоологический институт РАН
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «25» ноября 2009 г. в 14-30 час. на заседании дис-
сертационного совета Д 004.007.01 Учреждения Российской академии на-
ук Института биологии Коми НЦ УрО РАН по адресу: 167982, г. Сык-
тывкар, ул. Коммунистическая, 28.

факс: (8212)24-01-63
E-mail: dissovet@ib.komisc.ru
сайт: [http:// www.ib.komisc.ru](http://www.ib.komisc.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Коми научного
центра Уральского отделения РАН по адресу: 167982, г. Сыктывкар,
ул. Коммунистическая, 24.

Автореферат разослан «3» октября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.Г. Кудряшева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Нематоды образуют группу организмов, переживающих ярко выраженный биологический прогресс. Это проявляется в широком распространении и многообразной экологической дифференцировке группы (Парамонов, 1962). Почвенные нематоды имеют тесные трофические связи с бактериями, грибами, растениями; активно участвуют в процессе минерализации веществ и создании почвенного плодородия, выполняют регуляторную функцию через хищничество (Парамонов, 1962; 1964; 1970; Стриганова, 1980; Ferris et al., 2001; Griffiths et al., 2004; Ruess, Ferris, 2004; Ferris, 2007).

Среди множества экологических проблем, возникающих в связи с возрастающим антропогенным прессом на биосферу, проблема охраны почв должна рассматриваться в первую очередь (Гиляров, 1965; Лепнева, Обухов, 1987; Лазарева, 1992; Криволуцкий, 1994). Тяжелые металлы (ТМ) как вещества-загрязнители, попадая в почву, вовлекаются в биологический круговорот, передаются по трофическим цепям и могут вызывать целый ряд негативных последствий для растений, животных и человека (Федорен, Медведева, 2005).

Для оценки состояния почвы и мониторинга любых антропогенных изменений важнейшей задачей становится выявление видов-индикаторов состояния среды (Криволуцкий, 1994). Эврибионтность нематод позволяет рассматривать данную группу в качестве удобного биологического теста (Груздева и др., 1998, 2003; Матвеева и др., 2001; Bongers, 1990; Yeates et al., 1991, 1994; Ettema & Bongers, 1993; Yeates & Van der Meulen, 1996; Wasilewska, 1997; Bongers et al., 2001; Dmowska, Ilieva-Makulec, 2004; Boag et al., 2007; Okada, Harada, 2007).

Популяции нематод благодаря консервативным репродуктивным стратегиям довольно стабильны, поэтому изменения видовой структуры и численности отдельных систематических групп объясняются нарушениями в среде обитания. Короткое время генераций и большое разнообразие позволяют нематодному населению быстрее, в сравнении с макрофауной, реагировать на какие-либо изменения (Чесунов, 2006). Нематоды могут быть отобраны в почве любого региона, независимо от времени года. При этом не требуется больших по объему образцов и не происходит нарушения исследуемого биотопа (Груздева и др., 2003).

Для определения состояния сообществ нематод и их изменений при нарушении среды применяют показатели плотности популяций нематод, видового разнообразия фауны, эколого-трофической структуры, ряд экологических индексов (Bongers, 1990; Yeates, 1994; Bongers et al., 1997; Wasilewska, 1997; Ferris et al., 2001). Особую ценность для токсикологических исследований имеют культуры нематод, которые можно использовать в качестве модельных объектов для тестирования ситуаций с разной степе-

нию загрязнения среды (Коваленко, Матвеева, 1994; Коваленко и др., 1998; Чесунов, 2006; Kozłowska, 1981; Haight et al., 1982; Mudry et al., 1982; Donkin & Dusenbery, 1994; Höss, 2007).

Цель настоящего исследования состояла в изучении фауны, структуры сообществ и численности нематод в условиях техногенной трансформации почв и повышенного содержания тяжелых металлов.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать фауну и структуру сообществ нематод почвы с высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами (Pb, Cu, Cr, Mn, Zn) в зоне влияния промышленного предприятия.

2. Изучить фауну и структуру сообществ нематод промышленного отвала на участках с различным уровнем восстановления растительного покрова.

3. Исследовать фауну и структуру сообществ нематод луговых биоценозов с естественным повышенным фоном тяжелых металлов, обусловленным подстилающей породой.

4. Оценить чувствительность почвенных нематод к действию различных концентраций солей кадмия и свинца.

Научная новизна. Исследования фауны и структуры сообществ почвенных нематод как биоиндикаторов загрязнения среды тяжелыми металлами в условиях северных экосистем проведены впервые. Изучена антропогенная сукцессия сообществ почвенных нематод после полной деградации растительного и почвенного покрова. Нами показаны особенности индивидуальной чувствительности нематод различных систематических групп к свинцу и кадмию в экспериментальных условиях. Составлены ряды чувствительности нематод к ТМ. Установлено, что кадмий более токсичен для нематод, чем свинец. Выявлены роды-индикаторы загрязнения почвенной среды свинцом и кадмием. Обнаружен новый для Карелии вид фитопаразитических нематод из рода *Longidorus*, имеющий по литературным данным северную границу распространения по широте Вологды (широта 59°13' N, долгота 39°54' E).

Теоретическая и практическая значимость. Полученные данные вносят вклад в познание экологии почвенных нематод в антропогенно трансформированных биоценозах. Определены некоторые механизмы адаптации и поддержания стабильности сообществ почвенных нематод в условиях загрязнения среды тяжелыми металлами.

Показаны биоиндикационные возможности использования сообществ нематод для оценки состояния нарушенных экосистем и этапов естественного восстановления техногенного ландшафта. Выявлены роды почвенных нематод, чувствительные и устойчивые к воздействию свинца и кадмия, которые могут быть использованы в качестве индикаторов загрязнения почв тяжелыми металлами.

Апробация результатов. Результаты исследований представлялись на Международной научно-практической конференции «Роль молодых ученых в развитии науки» (Великие Луки, 2007), на VII Международном нематологическом симпозиуме «Нематоды естественных и трансформированных экосистем» (Петрозаводск, 2007), на экологическом конгрессе ELPIT 2007 (Тольятти, 2007), конференции молодых ученых и специалистов «Сбалансированное природопользование. Глубокая переработка минеральных ресурсов» (Апатиты, 2007), на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям» (Москва, 2008), на Всероссийской молодежной научной конференции «Актуальные проблемы экологии и биологии» (Сыктывкар, 2008), на 5-м Международном конгрессе по нематологии (Австралия, 2008), на Международной научно-практической конференции «Сохранение биологического разнообразия наземных и морских экосистем в условиях высоких широт» (Мурманск, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 1 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, выводов, заключения и содержит 28 рисунков, 6 таблиц, 9 приложений. Общий объем работы – 139 страниц. В списке литературы – 122 источника, в т. ч. 60 на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Литературный обзор

Обобщены литературные данные, касающиеся классификаций почвенных нематод, фауны почвенных нематод естественных биоценозов Карелии. Рассмотрены преимущества использования нематод в качестве организмов-биоиндикаторов различных нарушений среды, в том числе при загрязнении почвы тяжелыми металлами. Освещены результаты изучения изменений структуры сообществ почвенных нематод, происходящих под влиянием загрязнений промышленными выбросами, приведены сведения о чувствительности разных видов нематод к воздействию поллютангов.

Глава 2. Объекты и методы исследований

Объекты исследований: сообщества почвенных нематод, населяющих органогенный и минеральный горизонты естественных и антропогенно трансформированных почв, модельные виды нематод.

Полевые работы выполнены в период 2006-2008 гг. Почвенные образцы были отобраны по генетическим горизонтам в зоне влияния промышленных предприятий АО «ОТЗ» и АО «Петрозаводскмаш» с повышен-

ным содержанием Pb, Cu, Zn, Cd в почве; в луговых биоценозах острова Кижы, почва которого характеризуется естественным повышенным фоном тяжелых металлов, обусловленным подстилающей породой. Изучена динамика восстановления сообществ почвенных нематод после полной деградации почвы и напочвенного покрова на поверхности отвала промышленных отходов (окрестности г. Петрозаводска).

Сбор и обработку материала проводили по общепринятым методикам (Кирьянова, Кралль, 1969). Идентифицировали нематод на временных микроскопических препаратах. Всего определено 20063 нематоды. Каждый таксон нематод относили к определенной эколого-трофической группе (Yeates et al., 1993).

В лабораторных условиях проводили эксперименты по изучению чувствительности нематод к солям свинца и кадмия. В опытах использовали нематод, выделенных из незагрязненной ТМ почвы лесного биоценоза, и культуру нематод видов *Panagrolaimus rigidus* и *Aphelenchus avenae*, выращенных на питательных средах. Токсичность оценивали по доле погибших особей нематод.

Для статистической обработки результатов использовали пакеты программ Microsoft Excel 2003, Statistica 5.5. В качестве показателей, характеризующих фауну и структуру сообществ нематод, использовали плотность популяций нематод, видовое разнообразие фауны, эколого-трофическую структуру сообщества, степень зрелости сообществ нематод ΣMI (Bongers, 1990). Также применены индексы биоразнообразия Шеннона H' (Одум, 1986), доминирования Симпсона C (Simpson, 1949), индексы, характеризующие пищевую цепь CI , EI , SI (Ferris et al., 2001), рассчитана степень выровненности обилия животных в сообществе по Пилоу e (Pielou, 1966), степень биотопической приуроченности отдельных родов, видов нематод и участие местообитания в размещении видов F (Песенко, 1982). Определение степени сходства сообществ почвенных нематод исследованных биоценозов осуществляли на основе индекса Жаккара с построением дендрограмм сходства (Песенко, 1982).

Глава 3. Влияние утилизации промышленных отходов на фауну почвенных нематод

Глава посвящена исследованию фауны и структуры сообществ почвенных нематод биотопов с высоким содержанием тяжелых металлов (по данным 2000 г.) в окрестностях отвала промышленных отходов. Наибольшим накоплением свинца характеризовались участки, прилегающие к телу отвала: в восточном направлении его содержание составляло 4ПДК, к северу на удалении 10 м – 21 ПДК. В южном и западном направлениях концентрация свинца составляла 2-2,5 ПДК. Зона высокого загрязнения почв кадмием выявлена в 10 м к северу (2,5 ПДК) (Федорец, Медведева,

2005). Анализ почвенных образцов, отобранных в 2006-07 гг., показал, что содержание ТМ за 7 лет снизилось и не превышало ПДК.

Выявлено, что северная часть, наиболее близко (в 3 м) расположенная от отвала, максимально отличается ($I_j=0,2$) от других мест отбора. Южная и западная части имеют 50%-ное сходство ($I_j=0,5$), восточная и северная (250 м от отвала) – 55%-ное ($I_j=0,55$) (рис. 1).

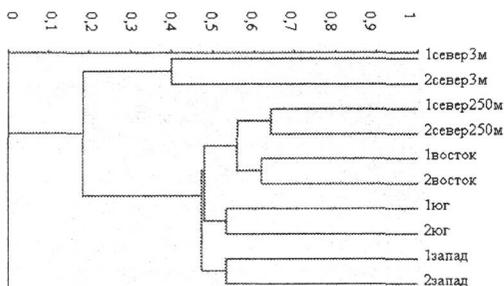


Рис. 1. Дендрограмма сходства биоценозов в зоне влияния отвала "Горелая земля" (2007 год)

Примечание: 1-лесная подстилка, 2-минеральный горизонт; север3м – расстояние от отвала – 3 м; север250м – расстояние от отвала – 250 м.

Самая загрязненная на период 2000 года – северная часть отвала с высоким содержанием Pb и Cd характеризуется значительными колебаниями плотности популяций (от 86 до 8337 экз./100 г почвы), показателей разнообразия фауны (H' от 1,1 до 3,4), зрелости сообществ нематод (ΣMI от 1,8 до 2,3). Среди нематод преобладают устойчивые к неблагоприятным условиям роды (*Panagrolaimus*, *Mesorhabditis*, *Rhabditis*, *Oigolaimella*, *Cuticularia*, *Cuticonema*, роды сем. *Diplogasteridae*) с низким значением (1) по с-р шкале Бонгерса. Характерной особенностью данного сообщества почвенных нематод является его неполночленность: в 2006-07 гг. нематоды представлены 2-3 эколого-трофическими группами из 6, в 2008 – 4-5 (появляются нематоды, облигатно или факультативно связанные с растениями) (рис. 2).



Рис. 2. Эколого-трофическое группирование нематод почвы биоценоза, удаленного в северном направлении на 3м от отвала промышленных отходов, минеральный горизонт

В структуре сообществ нематод наблюдается явление супердоминирования, что подтверждают высокие значения индекса Симпсона (до 0,55) и низкие индекса Пиелоу (до 1,2). Например, в 2007 г. на долю нематод р. *Butlerius* приходится 68,5%, в 2008 г. нематоды родов *Cuticonema* и *Mesorhabditis* составляют 62,8% от общего количества особей.

Таким образом, данное сообщество почвенных нематод, несмотря на снижение уровня тяжелых металлов в среде, находится в состоянии продолжающейся деградации, что подтверждается низким разнообразием фауны, резкими колебаниями плотности популяций, высоким уровнем монодоминирования нематод с однотипной трофикой, неполноценностью сообществ и низким значением индекса зрелости сообщества.

В восточной части отвала (Pb - 4 ПДК, Cd – в пределах ПДК в 2000 году) плотность популяций нематод в 2006 г. – 932,5 экз./100 г почвы, в 2007 г. – возросла в 4 раза (рис. 3). Повышаются значения индексов разнообразия фауны (H' до 4,1). В фауне нематод нет выраженного доминирования отдельных родов, что подтверждают низкие значения индекса Симпсона и высокая степень выровненности.

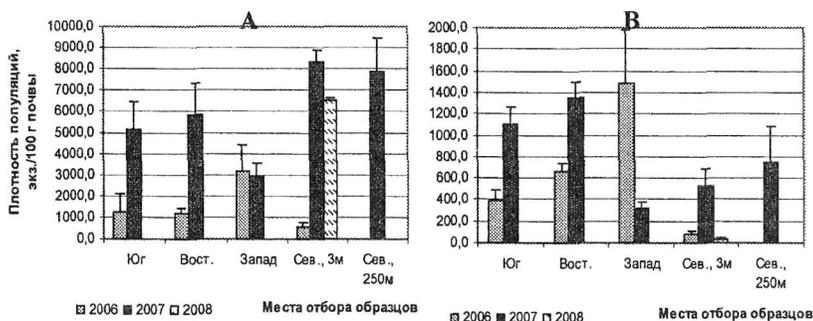


Рис. 3. Плотность популяций нематод (экз./100 г почвы) почв территорий, прилегающих к отвалу «Горелая земля». А – органогенный горизонт, В – минеральный горизонт

В 2007 г. происходит смена доминирующих таксонов, что приводит к возрастанию степени зрелости сообществ нематод ($\Sigma MI=2,5$ в 2007 г. против 2,25 в 2006 г.). Доминирующими становятся нематоды вида *Tylencholaimus stecki*, родов *Aphelenchoides*, *Coslenchus*, *Plectus*, имеющих значения 2-4 по с-р шкале Бонгера. Количество эколого-трофических групп в сообществе нематод варьирует по годам от 4 до 6.

Для сообщества почвенных нематод на востоке отмечена тенденция стабилизации его характеристик: более равномерная заселенность обоих горизонтов почвы, возрастание разнообразия фауны, индекса зрелости сообществ, усложнение их эколого-трофической структуры.

В западной части отвала плотность популяций нематод органогенного горизонта остается на постоянном уровне в течение 2-х лет (3183, 2903 экз./100 г почвы). В минеральном горизонте произошло снижение численности в 4,5 раза в 2007 году, что отмечено только в этом местообитании. Выявленное изменение может быть связано с направлением преобладающего стока из тела отвала на север и запад, и избыточным увлажнением в 2007 году, т. е. с возрастанием потока загрязняющих веществ.

Фауна характеризуется высоким разнообразием (от 27 до 31 рода), индекс доминирования небольшой (0,1-0,2) при высокой выровненности ($e = 2,0-2,4$). В структуре сообщества нематод представлены все 6 эколого-трофических групп: в фауне возрастает значимость нематод, связанных с растениями.

Таким образом, для сообщества почвенных нематод на западе отмечено некоторое увеличение разнообразия фауны и присутствие всех эколого-трофических групп. Несмотря на это, наблюдалась высокая численность нематод одного вида (*Paratylenchus straeleni*), что свидетельствует о продолжающемся процессе деградации почвенной экосистемы, вызванном западным направлением стока поллютантов и погодными особенностями в сроки отбора проб.

Плотность популяций нематод генетических горизонтов биоценоза, удаленного на 40 м от отвала в южном направлении возрастала на второй год наблюдений (рис. 3). Фауна нематод характеризуется высоким разнообразием, особенно в органогенном горизонте – 29 род. Индекс разнообразия Шеннона $H' = 4,28$, что является самым высоким показателем среди всех исследованных биоценозов в окрестностях отвала.

Доминирующими являются нематоды рода *Tylencholaimus* (21,4% в органогенном горизонте, 68,9% - в минеральном), относящиеся к микотрофам и питающиеся гифами грибов, что может быть показателем смежных путей разложения органического вещества.

В структуре сообщества нематод органогенного горизонта представлены все 6 эколого-трофических групп, минерального – 5 (отсутствуют паразиты растений).

Таким образом, в сообществе почвенных нематод биоценоза, удаленного на 40 м от отвала в южном направлении, выявлено увеличение разнообразия фауны и присутствие всех эколого-трофических групп в органогенном горизонте. В то же время в минеральном горизонте отмечено явление

супердоминирования нематод рода *Tylencholaimus* (68,9%). Это может свидетельствовать о грибном пути разложения органического вещества.

Анализ сообществ нематод в биотопах, расположенных на разном расстоянии от тела отвала в направлениях: север, восток, запад, юг показал, что наибольшие нарушения фауны нематод, структуры их сообществ отмечаются в северном направлении. Это связано с высоким уровнем загрязнения биотопа и направлением стоков, идущих из тела отвала. Несмотря на снижение уровня тяжелых металлов в почве отмечается их последствие на почвенную биоту, проявляющееся в малой заселенности нематодами нижних горизонтов почвы, всплесках численности в отдельные годы наблюдений, преобладанию в фауне устойчивых видов с быстрыми циклами развития, в явлении монодоминирования, коротких пищевых цепях. При меньшем уровне антропогенного воздействия (биотопы к западу и югу) сообщества нематод быстрее вступают в фазу стабилизации, что проявляется в увеличении разнообразия фауны, появлении видов нематод с разнообразной трофикой и более длинными циклами развития (К-стратегов), которые чувствительны к нарушениям среды обитания.

Глава 4. Восстановление сообществ почвенных нематод после полной деградации почвенного покрова

На территории отвала условно можно выделить 3 зоны с различным уровнем восстановления растительного покрова: в северной части отвала нет сформированного напочвенного покрова; центральная часть отвала имеет средний уровень восстановления растительности, происходивший в течение 4-5 лет; южная – высокий уровень восстановления растительного покрова, который формировался естественным путем в течение 8-10 лет.

Анализ фауны почвенных нематод в 2006-08 гг. показал присутствие единичных особей (5-30 экз./100 г почвы) в недавно отсыпанном грунте северной части.

Для сообщества почвенных нематод центральной зоны, формирующегося в течение 5 лет естественным путем после полной деградации почвы и напочвенного покрова, отмечаются сходные тенденции в течение 3-х лет исследований: резкие колебания численности нематод, супердоминирование отдельных таксонов, неполночленность сообщества, низкая доля в фауне и отсутствие в отдельные годы нематод, трофически связанных с растением.

Органогенный горизонт во все годы наблюдений был больше заселен нематодами, чем минеральный. Так, в 2006 году плотность популяций нематод в нем была в 4 раза выше, в 2007 г. – в 6,5 раз, в 2008 г. – в 1,5 раза (рис. 4). Данная территория характеризуется начальными этапами развития почвенного покрова. Более глубокий минеральный горизонт формируется позднее, характеризуется недостатком органического субстрата и беднее заселен микроорганизмами.

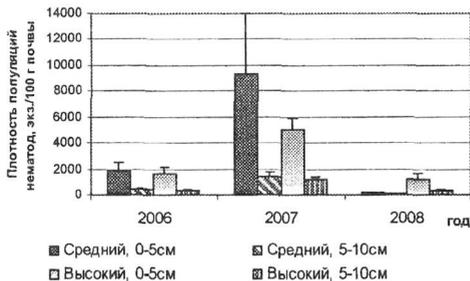


Рис. 4. Плотность популяций нематод в органогенном (0-5см) и минеральном (5-10см) горизонтах почвы при среднем и высоком уровне восстановления растительного покрова в зоне отвала

Доминирующей трофической группой были бактериотрофы (31,1-89,6 % от фауны). Наряду с типичными бактериотрофами, основным источником питания которых являются бактерии, в отдельные годы высокую численность имели представители, потребляющие в пищу кроме простейших, почвенных микроорганизмов, мицелий грибов, частицы растительной ткани – отходы живых корней. К таковым относятся нематоды р. *Prodesmodora* (Парамонов, 1962). В качестве субдоминантов выступали хищные нематоды, доминируя лишь в один год (до 59,4%).

В центральной зоне в 2007 г. отмечено явление супердоминирования вида *Panagrolaimus rigidus* (индекс доминирования Симпсона $C=0,41$), на долю которого приходится 63% фауны и свидетельствует о нестабильном состоянии сообщества. Вид *P. rigidus* устойчив к неблагоприятным условиям среды, имеет короткий (3-5 дней) цикл развития от яйца до половозрелого состояния. *P. rigidus* имеет высокую положительную степень относительной биотопической приуроченности в верхнем горизонте ($F = 0,96$).

В сообществах присутствуют нематоды 4-5 эколого-трофических групп (нет паразитов растений и ассоциированных с растением нематод). Отсутствие нематод, облигатно или факультативно связанных с растением, объясняется особенностями растительного покрова. Растительность образована случайной группировкой устойчивых к антропогенному воздействию видов – сорно-рудеральных и луговых. Нестабильность растительного сообщества не позволяет успешно развиваться видам нематод, питание и онтогенез которых зависит от растения-хозяина.

В южной части отвала с высоким уровнем восстановления растительности, как и в центральной, органогенный горизонт богаче населен нематодами, чем минеральный (в 2006-07 гг. - соотношение 4:1, в 2008 – 3:1). Индекс разнообразия Шеннона имеет стабильно высокие показатели $H' = 3,8-4,2$.

В трофической структуре сообществ почвенных нематод представлены все 6 групп, однако численность нематод в них изменялась по годам. Количество бактериотрофов снизилось, по сравнению с центральной частью

отвала, а количество хищных нематод, наоборот, возросло. Рядом исследователей также отмечено возрастание процента хищников в сообществах почвенных беспозвоночных под влиянием загрязнения среды (Хотько и др., 1982; Yeates et al., 1994; Wasilewska, 1997). В трофической структуре биоценоза присутствуют нематоды, питающиеся за счет живого растения (*Pr*), в 2007 году фитопаразиты становятся субдоминантами, составляя в минеральном горизонте 36% фауны (рис. 5). Наиболее высокую численность имел род *Pratylenchus* (до 29,5 %) - временный эндопаразит корней растений, широкоспецифичный в отношении растений-хозяев, поражающий злаки и другие травянистые виды (Рысс, 1988). Возрастание численности паразитических нематод в 2007 связано с благоприятными погодными условиями для нематод рода *Pratylenchus*.

В то же время, трофическая группа фитопаразитов является нестабильной: 5 место в 2006 г., субдоминант в 2007, отсутствие в 2008 г. (рис. 5).

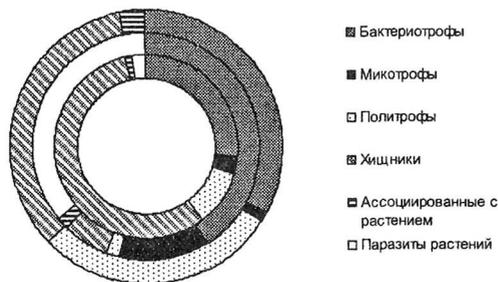


Рис. 5. Эколого-трофическое группирование нематод минерального горизонта почвы южной части отвала с высоким уровнем восстановления растительного покрова (внутренний круг - 2006 г., средний - 2007 г., наружный - 2008 г.)

Таким образом, сообщества почвенных нематод в южной части отвала с высоким уровнем восстановления растительного покрова характеризуются более стабильными показателями численности нематод, разнообразия фауны, доминирующих таксонов, наличием нематод с разными типами трофики, что свидетельствует о расширении и усложнении почвенной пищевой сети.

Существует точка зрения, что для формирования зрелой почвы на песках при их естественном зарастании необходимо 50-60 лет (Абакумов, 2008). Таким образом, нами исследованы начальные этапы восстановления почвенного покрова, чем объясняется нестабильность характеристик сообществ почвенных нематод.

Однако фауна нематод может быть индикатором происходящих почвенных процессов. Нами выявлено, что восстановление почвенного покрова после деградации начинается с заселения нематодами преимущественно верхнего почвенного горизонта. На ранних сроках доминируют ви-

ды, устойчивые к неблагоприятным условиям среды, на более поздних - увеличивается численность хищников и нематод, связанных с растениями, что является показателем процесса регенерации биоценоза. Использование параметров плотности популяций нематод, эколого-трофической структуры, экологических индексов (индекс разнообразия фауны Шеннона, доминирования таксонов Симпсона, индекса зрелости сообществ нематод), характеризующих популяции и сообщества почвообитающих нематод позволяет по нематодному тесту оценивать изменения, происходящие на начальных этапах преобразования техногенных земель.

Глава 5. Использование экологических индексов для оценки условий почвенных трофических цепей

Для оценки состояния почвенной экосистемы на различных этапах восстановления нарушенной территории после полной деградации почвенного покрова использованы индексы, предложенные Феррисом с соав. (Ferris et al., 2001) и основанные на анализе фауны нематод: структурный индекс (SI), индекс почвенного богатства (EI) и путей разложения органического вещества в пищевой цепи (CI).

Индекс почвенного богатства основан на чувствительности групп-оппортунистов к возрастанию доступности пищевого ресурса, при его определении учитываются бактериотрофы, имеющие значение 1 по с-р шкале Бонгера и микротрофы со значением 2. Структурный индекс отражает сложность пищевой цепи, которая определяется функциональными группами. Индекс CI является индикатором преобладающих путей разложения органического вещества (бактериального или грибного) в почвенной пищевой сети.

На основе рассчитанных индексов выявлено, что почвенная экосистема в зоне отвала с высоким уровнем восстановления растительного покрова характеризуется преобладанием бактериального пути разложения органики, более структурированной пищевой цепью и относительно высоким уровнем почвенного богатства (высокие индексы SI, EI) во все годы наблюдений, что является признаком стабильности среды (табл. 1).

В центральной части отвала со средним уровнем восстановления растительного покрова наблюдаются резкие колебания индекса почвенного плодородия, связанные с бактериальной активностью. Индекс CI также меняет свои значения на протяжении 3-х лет наблюдений (табл. 1). Это предполагает изменение путей разложения органического вещества: при активном участии грибов на начальном этапе до возрастания роли бактерий в последующие годы. Это говорит о нестабильности почвенных условий на начальных этапах формирования биоценоза на новом субстрате.

Таблица 1

Индексы, характеризующие сообщества почвенных нематод формирующегося биоценоза при различном уровне восстановления растительного покрова в 2006-08 гг.

Уровень восстановления растительности, год	SI, %	EI, %	CI, %	
Средний	2006	61,0	16,5	84,1
Высокий		85,4	52,6	9,9
Средний	2007	53,2	50,0	10,5
Высокий		63,5	62,1	13,9
Средний	2008	89,5	39,9	8,4
Высокий		90,1	59,9	7,1

Таким образом, экологические индексы, характеризующие условия трофических цепей почв, информативны и могут быть использованы для оценки этапов восстановления нарушенной почвенной экосистемы.

Глава 6. Почвенные нематоды в условиях повышенного содержания тяжелых металлов в среде

6.1. Почвенные нематоды в зоне влияния выбросов промышленного предприятия АО «ОТЗ»

Анализ почвенных образцов, отобранных в 2006-07 гг. в районе промышленного предприятия Онежский тракторный завод, выявил высокое содержание свинца, составляющее около 60 ПДК. Содержание цинка, кобальта и хрома превышает фоновые концентрации по Карелии.

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

- Высокими значениями плотности популяций нематод, особенно для органогенного горизонта: 9299 экз. в 2006 г., 35733 экз./100 г почвы – в 2007 г. В естественных биоценозах численность в среднем 2-3 тыс. экз./100 г. в зависимости от типа почвы.

- 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 высокая численность нематод, связанных с живыми растениями: рода *Tylenchus* (70,6% от общего количества нематод) в органогенном горизонте и рода *Paratylenchus* (34,3-66,4%) в минеральном горизонте почвы.

- Доминированием паразитических нематод в трофической структуре данного сообщества, на их долю приходится от 54,2 до 71,2% фауны. Устойчивость видов отряда *Tylenchida*, по-видимому, связана с низкой проницаемостью кутикулы (Парамонов, 1962).

- Низкими показателями индекса зрелости сообществ нематод, основанном на экологических характеристиках таксонов. В исследованном нами биоценозе индекс $\Sigma MI=2,1-2,4$, в ненарушенных луговых биоценозах – 2,8-3.

Нами выявлено, что сообщество почвенных нематод в условиях сильного загрязнения ТМ характеризуется аномально высокими значениями численности нематод, низким индексом зрелости, высокой долей паразитов растений и явлением супердоминирования отдельных родов отряда *Tylenchida*.

6.2. Почвенные нематоды луговых биоценозов и агроценозов о. Киж

В некоторых районах Карелии, имеющих особенности геологического строения подстилающих пород, в почве обнаружено повышенное содержание ТМ. Примером может служить о. Киж. 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 острова Киж, сформировавшихся на озовых грядах имеет некоторые особенности. Она характеризуется богатым таксономическим разнообразием (отмечены представители 25-31 родов), более высокой зрелостью нематодных сообществ ($\Sigma MI=2,5-3,1$). Однако, как и в почве нарушенного биоценоза (зона воздействия промышленного предприятия), в сообществах нематод отмечена высокая доля паразитических видов (23,7 – 31,4%). Доминируют нематоды родов *Helicotylenchus*, *Tylenchorhynchus*, которые характерны для луговых биоценозов. В почве луга с фоновым содержанием ТМ структура сообщества нематод иная: высока доля бактериотрофов, а численность паразитов небольшая (рис. 6).

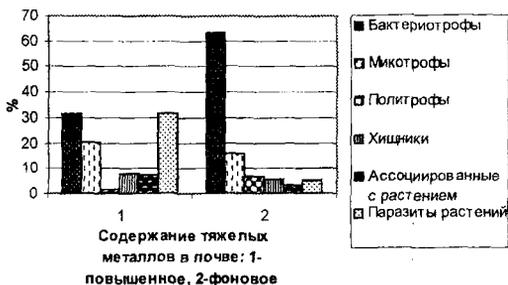


Рис. 6. Эколого-трофическая структура сообществ нематод луговых биоценозов с повышенным содержанием тяжелых металлов

В агроценозах острова Кижы сохраняется тенденция возрастания численности паразитических нематод при повышенном содержании тяжелых металлов в пахотных почвах. Это подтверждают данные о зараженности почвы узкоспециализированным паразитом – картофельной цистообразующей нематодой (КЦН). Степень зараженности почвы КЦН колебалась от 10 цист/100 г почвы при фоновых для Карелии концентрациях ТМ до 214 цист/100 г почвы при повышенном содержании Cd, Zn, Mn, Ni (Груздева, Сушук, 2008).

Глава 7. Экспериментальное изучение действия солей тяжелых металлов на почвенных нематод на примере свинца и кадмия

7.1. Действие солей тяжелых металлов на фауну почвенных нематод

Свободноживущих нематод выделяли из почвы незагрязненного ТМ биотопа и помещали в растворы солей Cd и Pb различной концентрации. Исследовано 26 таксонов нематод.

В контрольных условиях (дистиллированной воде) смертность большинства таксонов нематод наступает через 16 дней (рис. 7А). Первыми (7-11 сутки) теряли жизнеспособность нематоды р. *Eudorylaimus*, на 14 сутки - представители р. *Aphelenchoides*, *Lelenchus*. К концу опыта (16 суток) выжили только нематоды р. *Cephalobus*, которые в дальнейшем (наблюдения проводились до 50 суток) сохранили способность к размножению.

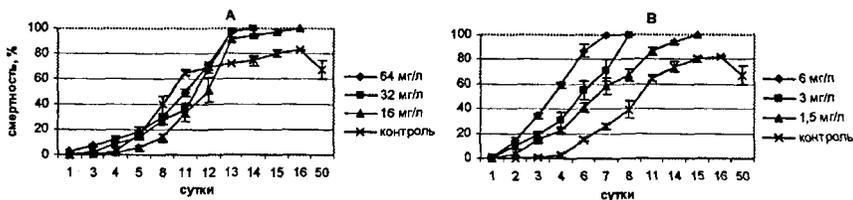


Рис. 7. Смертность нематод (%) при различных концентрациях PbSO₄(А) и CdSO₄(В)

При воздействии свинца на фауну нематод дозой ниже ПДК (16 мг/л) 100% смертность наступила на 16 сутки, в варианте опыта с концентрацией Pb 64 и 32 мг/л – на 14 (рис. 7А).

Нематоды в порядке убывания чувствительности к свинцу расположились следующим образом: р. *Metateratocephalus*, *Teratocephalus*, *Eudorylaimus* (реагировали первыми) → р. *Eucephalobus*, *Cervidellus*, *Malenchus*, *Ditylenchus*, *Paratylenchus* → р. *Rhabditis*, *Aphelenchoides*, *Cephalobus*, *Acrobeloides* (наиболее устойчивы). В течение первых 10 суток отмечена единичная гибель нематод, массовая смертность максимального спектра родов (13-17) зафиксирована на 12-13 день опыта для низкой дозы, и на 11 день – для высоких концентраций Pb.

Воздействие соли кадмия отличалось от результатов, полученных со свинцом по срокам наступления 100%-ной смертности особей и реакции различных систематических групп нематод. Смертность 100% особей при дозе $CdSO_4$, меньшей ПДК (1,5 мг/л), отмечена на 15 день; для дозы $CdSO_4$, соответствующей ПДК, зафиксирована на 8 день; для концентрации 2ПДК – на 1 сутки раньше (7 день) (рис. 7В). Исследованные таксоны нематод располагаются по мере убывания чувствительности к кадмию следующим образом: р. *Plectus*, *Eudorylaimus*, *Tylencholaimus* → р. *Metateratocephalus*, *Teratocephalus*, *Cephalobus* → сем. *Aphelenchoididae*, *Tylenchidae*, *Neotylenchidae* → р. *Rhabditis* и *Acrobeloides*.

Результаты эксперимента показали, что почвенные нематоды чувствительны к воздействию солей кадмия и свинца. Соли Cd обладали более высокой токсичностью, по сравнению с солями Pb для популяций нематод. Это проявлялось в ранних сроках (7-8 сутки для Cd, 14 - для Pb) 100%-ой смертности нематод, участвующих в эксперименте. Выявлена специфичность реакции некоторых систематических групп нематод к Cd: высокая устойчивость отмечена у нематод из родов *Rhabditis* и *Acrobeloides*, первыми реагировали представители родов с высокими значениями (4-5) по с-р шкале Бонгера, но чувствительным к кадмию оказался и р. *Plectus* со значением 2, который может использоваться в качестве индикатора загрязнения почвы кадмием.

Воздействие Pb на популяции нематод было менее выраженным: четкой временной реакции отдельных систематических групп не выявлено. В течение первых 10 суток отмечена единичная смертность нематод различных родов, массовая гибель зафиксирована на 11-13 сутки, данный период можно выделить как пороговый для всех исследованных концентраций Pb. Негативное действие свинца на численность нематод в более отдаленные сроки отмечено ранее в полевом опыте (Груздева и др., 2003). Возможно, это связано с накоплением свинца, который блокирует процессы жизнедеятельности в организме нематод.

7.2. Действие солей тяжелых металлов на модельные виды нематод

В экспериментальных условиях на культуре нематод вида *Panagrolaimus rigidus*, относящегося к трофической группе бактериотрофов, нами выявлена обратная зависимость выживаемости особей от концентрации соли Cd. При максимальной исследованной концентрации Cd (4 ПДК) 100%-ая смертность зафиксирована на 8 сутки, в контроле к этому периоду погибло 58% нематод (рис. 8А).

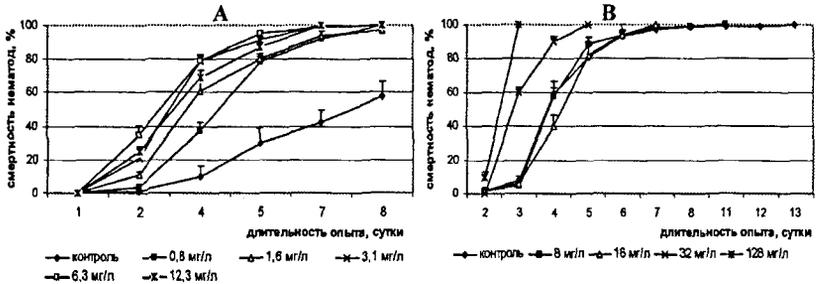


Рис. 8. Смертность нематод *Panagrolaimus rigidus* при воздействии различных концентраций соли кадмия CdSO₄ (А), соли свинца PbSO₄ (В) и в контроле (дист. вода)

Кривые смертности нематод при воздействии соли свинца отличались своей направленностью. Воздействие низких доз Pb на популяцию нематод *Panagrolaimus rigidus* было менее выраженным и мало отличалось от контроля (рис. 8В). Высокие концентрации свинца (ПДК, 4ПДК) были более токсичны для модельного вида. Это проявляется в раннем наступлении сроков 100%-ой смертности (3-5 сутки).

В экспериментальных условиях на нематодах-микофагах вида *Aphelenchus avenae* нами выявлена зависимость темпа гибели особей от концентрации соли Pb. Так, смертность 50% особей для дозы PbSO₄, соответствующей 4ПДК, отмечена на 4 день; для ПДК – на 5 день, в контроле – на 10 день. При максимальной исследованной концентрации Pb 100%-ая смертность зафиксирована на 11 сутки. В контроле к этому периоду погибло 79% нематод, часть популяции афеленхов сохраняла жизнеспособность на протяжении 32 суток.

Выявлена зависимость смертности нематод *Panagrolaimus rigidus* от концентрации соли Cd и Pb. Все исследованные дозы Cd ускорили смертность нематод по сравнению с контролем. Наиболее токсичными оказались дозы 6,3 и 12,3 мг/л CdSO₄. Воздействие соли Pb на нематод р. *Panagrolaimus* проявлялось иначе: темпы гибели нематод при воздействии низких доз PbSO₄ были аналогичны контрольным. Высокие дозы PbSO₄ ускорили наступление 100%-ой смертности нематод, она наблюдалась на 3-5 сутки от начала эксперимента.

Нематоды *Aphelenchus avenae* проявили большую устойчивость к высоким концентрациям PbSO₄. При дозах соли свинца 32 и 128 мг/л 100%-ая смертность нематод отмечена на 11 сутки.

Выводы

1. Повышенное содержание тяжелых металлов в почве, связанное с естественными причинами (особенности геологического строения подстилающих пород), или обусловленное промышленным загрязнением среды, вызывает сходные структурные перестройки в сообществах нематод, проявляющиеся в возрастании численности паразитических видов. В почве трансформированного биоценоза фитопаразитические нематоды составляют до 71% фауны, доминанты - нематоды р. *Paratylenchus*. В луговых биоценозах острова Кизи доля паразитов на уровне 31,4% и преобладали другие таксоны (*Helicotylenchus*, *Tylenchorhynchus*).

2. Сообщества почвенных нематод в биоценозах с высокой степенью загрязнения тяжелыми металлами характеризуется высокими значениями численности, превышающими таковые в незагрязненных районах в 3-10 раз.

3. При естественном восстановлении почвенного покрова полигона складирования промышленных отходов происходит сукцессионная смена родов нематод: на ранних сроках доминируют устойчивые к неблагоприятным условиям среды роды, имеющие низкие значения по с-р шкале Бонгера (бактериотрофы), на более поздних - увеличивается численность хищников и нематод, связанных с растениями, что является показателем процесса регенерации биоценоза. После 8 лет самозаращения полигона сообщество почвенных нематод по-прежнему характеризуется нестабильностью показателей численности, разнообразия фауны, экологотрофической структуры, экологических индексов, что свидетельствует о начальных этапах восстановления почвенной экосистемы.

4. Почвенные нематоды чувствительны к воздействию солей кадмия и свинца. Соли кадмия обладали более высокой токсичностью, по сравнению с солями свинца, для популяций нематод. Это проявлялось в ранних сроках (7-8 сутки для Cd, 14 - для Pb) 100%-ой смертности нематод, участвующих в эксперименте. Выявлена специфичность реакции некоторых систематических групп нематод к Cd: высокой чувствительностью обладали представители р. *Plectus* и нематоды с высокими значениями (3-5) по с-р шкале Бонгера, тогда как р. *Rhabditis* и *Acrobeloides* демонстрировали максимальную устойчивость.

5. Воздействие свинца на популяции нематод было менее выраженным: четкой временной реакции отдельных систематических групп не выявлено. В течение первых 10 суток отмечена единичная гибель нематод различных родов. Массовая смертность зафиксирована на 11-13 сутки, данный период можно выделить как пороговый для всех исследованных концентраций Pb.

6. В лабораторных исследованиях на нематодах модельных видов *Panagrolaimus rigidus* и *Aphelenchus avenae* выявлена зависимость смертности особей от концентраций солей Cd и Pb. Полученные данные дают возможность использовать нематод в качестве объектов для оценки уровня загрязнения почвы тяжелыми металлами.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

Груздева Л. И., Сушук А. А. Влияние степени зараженности почвы картофельной цистообразующей нематодой на структуру сообществ почвенных нематод // Паразитология. Т. 42. № 6. 2008. С. 510-516.

В прочих изданиях:

Груздева Л. И., Сушук А. А. Исследование зараженности почв и растений фитонематодами агроценозов о. Кизи // Бюлл. экологических исследований на территории музея-заповедника «Кизи». Петрозаводск. 2007. С. 14-16.

Сушук А. А., Груздева Л. И. Структура сообществ почвенных нематод различных агроценозов острова Кизи // Сборник материалов II научно-практической конференции «Роль молодых ученых в развитии науки». Великие Луки: РИО ВГСХА. 2007. С. 113-118.

Сушук А. А. Фауна нематод техногенного ландшафта // Нематоды естественных и трансформированных экосистем. Сборник научных статей. Петрозаводск: Издательский дом «ПИН». 2007. С. 98-100.

Сушук А. А., Груздева Л. И. Особенности действия солей тяжелых металлов на почвенных нематод ландшафта // Нематоды естественных и трансформированных экосистем. Сборник научных статей. Петрозаводск: Издательский дом «ПИН». 2007. С. 100-103.

Сушук А. А. Почвенные нематоды как индикаторы промышленного загрязнения среды // Сборник трудов молодых ученых первого международного экологического конгресса «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛПИТ 2007». Тольятти: ТГУ. 2007. Т. II. С. 303-307.

Сушук А. А. Влияние техногенной нагрузки на сообщества почвенных нематод // Сборник материалов IV школы молодых ученых «Сбалансированное природопользование» (6-8 ноября 2007 г.). Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2008. С. 206-212.

Сушук А. А., Груздева Л. И. Почвенные нематоды как индикаторы восстановления техногенного ландшафта // Тезисы докладов I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям». М.: МАКС Пресс. 2008. С. 272-273.

Сушук А. А. Сообщества почвенных нематод на начальных этапах восстановления техногенного ландшафта // Материалы докладов I Всероссийской молодежной научной конференции «Молодежь и наука на Севере». Т. III. XV Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы биологии и экологии». Сыктывкар: Институт биологии Коми НЦ Уро РАН. 2008. С. 289-290.

Сушук А. А., Груздева Л. И., Иешко Е. П. Воздействие тяжелых металлов на фитопаразитических нематод // Труды Карельского научного центра РАН. Биогеография. Современные проблемы паразитологии. Вып. 13. Петрозаводск. 2008. С. 84-88.

Матвеева Е. М., Груздева Л. И., Коваленко Т. Е., Сушук А. А. Почвенные нематоды как биоиндикаторы техногенного загрязнения таежных экосистем // Труды Карельского научного центра РАН. Вып. 14. Петрозаводск. 2008. С. 63-75.

Сушук А. А., Груздева Л. И., Иешко Е. П. Влияние утилизации промышленных отходов на сообщества почвенных нематод // Труды Карельского научного центра РАН. Вып. 14. Петрозаводск. 2008. С.121-128.

Груздева Л. И., Сушук А. А. Влияние промышленных загрязнений на сообщества почвенных нематод района Костомукши // Материалы Международной научно-практической конференции «Сохранение биологического разнообразия наземных и морских экосистем в условиях высоких широт». Мурманск: МГПУ. 2009. С. 54-57.

Suschuk A. A., Gruzdeva L. I. Particularities of heavy metal salt effect on soil nematodes // Russ. Journ. of Nematology. Moscow. Vol. 15. № 2. 2007. P. 176-177.

Suschuk A. A. Soil nematodes fauna in industrial landscape // Russ. Journ. of Nematology. Moscow. Vol. 15. № 2. 2007. P. 176.

Suschuk A. A., Gruzdeva L. I., Matveeva E. M. Effect of cadmium and lead salts on soil nematodes // Abstracts of 5st International Congress of Nematology. Brisbane, Australia. 2008. P. 268-269.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура «Times».
Уч.-изд. л. 1,0. Усл. печ. л. 1,0. Подписано в печать 21.10.09.
Тираж 100 экз. Изд. № 63. Заказ № 828.

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50