

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПОЧВЕННО-ПОДСТИЛОЧНЫМ ТИПОМ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ НА ПРИМЕРЕ *PERELIA DIPLLOTETRATHECA* (*PEREL, 1967*) В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТОЧЕЧНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭМИССИИ

Резниченко И.С.

ФГБОУ ВО «Омский государственный педагогический университет», Омск, e-mail: biotech@omgru.ru

Проведен анализ взаимосвязи между накоплением тяжелых металлов в цепи: почвенно-подстилочный субстрат – почвенно-подстилочный морфотип дождевых червей на примере эндемика Среднего Урала *Perelia diplozetraheca*. Вблизи завода концентрация Cu в лесной подстилке в среднем в 65 раз выше по сравнению с фоновым уровнем, Pb – в 19, Cd – в 7 и Zn – в 3 раза, в гумусово-аккумулятивном горизонте – в 16, 3, 2,4 и 2 раза соответственно. Выявлено, что для меди, цинка и кадмия характерно прямое накопление в тканях люмбрицид. Чем выше их концентрация в почве, тем выше концентрация в тканях дождевых червей. Для накопления цинка показатель силы влияния оказался низким и не достоверным. С приближением к источнику эмиссии однофакторный дисперсионный анализ показал снижение силы влияния концентрации поллютантов на накопление, возможно, это говорит о границе накопления, за которой следует летальный исход червей. В накоплении цинка, кадмия, свинца существует достоверная разница ($p < 0,05$), зависящая от возраста особей. В ювенильных особях содержание металлов меньше, чем в половозрелых, что можно объяснить меньшим временем нахождения неполовозрелых люмбрицид в загрязненной зоне или более быстрым обменом веществ. В накоплении меди между половозрелыми и ювенильными особями разница не выявлена.

Ключевые слова: тяжелые металлы, источник эмиссии, дождевые черви, почва.

ACCUMULATION OF HEAVY METALS SOIL-LITTER TYPE OF EARTHWORMS ON EXAMPLE *PERELIA DIPLLOTETRATHECA* (*PEREL, 1967*) IN CONDITIONS A POLLUTED POINT SOURCE EMISSIONS

Reznichenko I.S.

Omsk state pedagogical University, Saratov, e-mail: kateha007@bk.ru

We have done the analysis of the relationship between the accumulation of heavy metals in a chain: soil-litter substrate – soil and litter morphotype earthworms on the example of endemic average Urals *Perelia diplozetraheca*. Near the Cu concentration in the plant litter on average 65 times higher than the background level, Pb – 19, Cd – 7 and Zn – 3 times, in the humus-accumulative horizon – 16, 3, 2.4 and 2 times, respectively. It was found that for copper, zinc and cadmium is characterized by the accumulation in the tissues directly lumbricid. The higher the concentration in the soil, the higher the concentration in the tissues of earthworms. For the accumulation of zinc, the effect of force figure was low and not significant. With the approach to the emission source, the ANOVA showed a decrease in the concentration of power of influence on the accumulation of pollutants may, it means the accumulation of the border, followed by the death of worms. The accumulation of zinc, cadmium, lead, there is a significant difference ($p < 0.05$), depending on the age of the individuals. The juveniles metal content is less than in the adult, which can be explained less time finding immature lumbricid in the contaminated zone or a faster metabolism. The accumulation of copper between sexually mature and juvenile individuals the difference was not found.

Keywords: heavy metal, a source of emissions, earthworms, soil.

При изучении кинетики тяжелых металлов находящихся в почве и почвенной подстилке, наилучшей модельной группой среди биоты считается мезофауна, которая составляет 68–85 % от совокупной зоомассы [4]. Кроме этого становится возможным изучить воздействие не только одного поллютанта на живые организмы, но и его накопление в сочетании с другими загрязняющими веществами, поскольку они могут усиливать действие друг друга [1].

Оценка влияния интегральной токсичности проводится с использованием дождевых

червей (семейство Lumbricidae), которая прописана в международных стандартах ISO 11268-1, ISO 11268-2, ISO 11268-3 (ISO, 1995; ISO, 1998; ISO, 1999). К тому же люмбрициды представляют наибольшую зоомассу среди мезофауны лесных и пастбищных угодий [3,10]. Дождевые черви перерабатывают органический субстрат почв, генерируя ее пористость и создавая, тем самым, благоприятные условия для микрофауны и растений [6]. Эколого-биологические свойства дождевых червей и их стресс-реакция на загрязнение субстрата, по мнению многих авторов, соответствуют требованиям международных стандартов к выбору биоиндикаторов [11].

Поведение тяжелых металлов, при передаче от почвенно-подстилочного субстрата к дождевым червям, зачастую, описывается аккумуляцией, то есть увеличением концентрации в тканях люмбрицид по сравнению со средой обитания (BAF=2–20). Также накопление тяжелых металлов может быть представлено индикацией – сохранением концентрации на том же уровне и элиминацией, когда наблюдается снижение концентрации тяжелых металлов [12]. При монозагрязнении тяжелых металлов наблюдались случаи аномальной аккумуляции кадмия, которые были описаны для дождевых червей (BAF=158), при этом авторы отмечали низкий уровень загрязнения почвы и подстилки [9].

Многими авторами установлено, что важную роль в скорости накопления металла играют его особенности, форма его соединений, взаимодействие с другими элементами, величина концентрации. Например, содержание физиологически необходимых металлов эффективно регулируется барьером на уровне желудочно-кишечного тракта, связыванием белками и экскрецией. Во-вторых, поступление металлов контролируют эдафические факторы, такие как кислотность почвы, содержание в ней органического вещества, глинистых частиц, емкость катионного обмена [7]. В-третьих, влияют особенности самих видов, их трофическая специализация и возраст.

Черви играют важную роль как звено в передаче тяжелых металлов от растений к животным, которые питаются ими. Так, для плотоядных мелких млекопитающих (кормовой базой которых являются преимущественно дождевые черви) показало большее накопление в организме хищников Cd, Pb. Причем отмечено, что черви, включенные в пищевую цепь, не принадлежат к определенному виду, но относятся к определенной экологической группе по типу вертикального распределения в субстрате [8]. Поэтому **цель** данного исследования заключается в анализе взаимосвязи между накоплением тяжелых металлов в цепи: почвенно-подстилочный субстрат – почвенно-подстилочный морфотип дождевых червей на примере эндемика Среднего Урала *Perelia diplotetratheca*.

Материал и методы исследования

Работы выполнены в районе действия Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ), расположенного около г. Ревды Свердловской области. Основные ингредиенты выбросов – SO₂ и полиметаллическая пыль, в которой преобладают Cu, Pb, Zn, Cd, As. Общий объем эмиссии в конце 1980-х составлял более 140 тыс. т/год, в том числе (в т/год): SO₂ – 134089, HF – 1016, Cu – 2610, Zn – 1754, As – 639, Pb – 564. С середины 1990-х отмечено снижение выбросов, объем которых в середине 2000-х составил менее 30 тыс. т/год [5].

Согласно физико-географическому районированию, территория относится к таежной географической зоне, к провинции низкогорной полосы Среднего Урала (абсолютные высоты – от 150 до 450 м над уровнем моря). Доминируют темнохвойные леса и производные от них хвойно-лиственные, березовые, осиновые и сосновые; почвы – бурые горно-лесные, темно-серые, серые, оподзоленные и глееватые.

В западном направлении от СУМЗа по результатам анализа загрязнения снега и почвы выделены импактная (до 3 км), буферная (3–7 км) и фоновая (далее 7 км) зоны загрязнения [2].

Для исследования был выбран вид *Perelia diplotetratheca* – эндемик Среднего Урала, доминирующий по численности и общей массе среди дождевых червей, обитающих на территории воздействия СУМЗа.

Данные по содержанию тяжелых металлов в почве и подстилке были предоставлены лабораторией экотоксикологии популяций и сообществ ИЭРиЖУрО РАН, в которой также проходил анализ дождевых червей на тяжелые металлы. Лаборатория аккредитована на техническую компетентность и зарегистрирована в государственном реестре РФ (аттестат РОСС.RU0001.515630).

Пробоподготовка осуществлялась по стандартной методике, анализ на тяжелые металлы производили с использованием навески 100 мг материала (навеску взвешивали с точностью 0.0001 г); образцы озоляли в тефлоновых сосудах в микроволновой печи MWS-2 (Berghof, Германия) в течение 80 мин после добавления 7 мл концентрированной HNO₃ и 1 мл деионизированной воды при максимальном давлении 900 кПа и максимальной температуре 155 °С. Концентрации металлов (Cu, Pb, Cd, Zn) в тканях измерялась на атомно-абсорбционном спектрометре AAS Vario 6 (Analytic Jena, Германия) с пламенным вариантом атомизации.

Статистический анализ. Значимость различий в концентрациях элементов между выборками оценивали при помощи дисперсионного анализа, значения предварительно логарифмированы; для множественных сравнений использован критерий Шеффе. Зависимость между концентрацией металла в печени (C_l) и в рационе (C_s) аппроксимирована уравнением $\text{Log}C_l = a \cdot \text{log}C_s + b$, где a, b – коэффициенты.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание загрязняющих веществ в почве и подстилке. За время функционирования Среднеуральского медеплавильного завода сформировалась обширная техногенная геохимическая аномалия: вблизи завода концентрация Cu в лесной подстилке в среднем в 65 раз выше по сравнению с фоновым уровнем, Pb – в 19, Cd – в 7 и Zn – в 3 раза, в гумусово-аккумулятивном горизонте – в 16, 3, 2,4 и 2 раза соответственно; в буферной зоне содержание металлов несколько ниже. В результате подкисления почвенного буферного раствора солей с находящимися в нем тяжелыми металлами, увеличивается доступность металлов для биоаккумуляции дождевыми червями.

В районе исследования обитает восемь видов дождевых червей, среди которых доминирует эпигейный вид, эндемичный для Урала – *P. diplotetratheca*. Концентрации Cu, Zn и Cd в особях этого вида (таб. 1) тождественны литературным данным по другим видам дождевых червей из загрязненных почв, тогда как концентрация Pb выше ожидаемой для имеющегося уровня загрязнения [1]. Поскольку концентрации тяжелых металлов, для данной территории, выше всего именно в дождевых червях, можно сделать вывод, что пищевые цепи с включением люмбрицид несут потенциальную угрозу при переходе на следующий трофический уровень.

Таблица 1

Содержание (мкг/г) тяжелых металлов в тканях дождевых червей на разном удалении от Среднеуральского медеплавильного завода [5]

| Элемент | Расстояние до источника выбросов, км | | | |
|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| | 30 [n=55] | 20 [n=47] | 7 [n=38] | 4–5 [n=57] |
| Cu | 7,5±0,1 {9,9} (5,6–10,3) | 7,9±0,2 {17,4} (5,3–11,1) | 23,7±1,7 {44,2}*** (11,9–71,7) | 28,5±1,9 {50,3}*** (10,3–75,4) |
| Pb | 9,2±0,7 {56,4} (1,0–26,7) | 14,1±1,5 {72,9} (3,1–62,6) | 112,5±13,6 {74,5}*** (18,3–359,5) | 228,3±25,1 {83,0}*** (8,6–1010,3) |
| Cd | 16,8±0,7 {30,9} (6,6–28,8) | 21,3±0,9 {29,0}** (9,7–35,8) | 67,7±3,8 {34,6}*** (24,8–131,9) | 91,9±4,8 {39,4}*** (28,3–193,3) |
| Zn | 299,6±10,1 {25,0} (143,6–439,6) | 356,8±14,8 {28,4} (193,6–705,9) | 617,8±36,3 {36,2}*** (230,2–1365,3) | 536,6±30,7 {43,2}*** (185,6–1152,4) |

Примечание: среднее ± ошибка, в круглых скобках – минимальное и максимальное значение, в фигурных скобках – коэффициент вариации, учетная единица – особь.

Уровень значимости различий с 30 км: * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$ (критерий Шеффе).

С целью упрощения интерпретации данных сравнительно воздействию загрязнителей на среду, применялся индекс токсичности K_i , который был рассчитан для тяжелых металлов Cu, Cd, Zn, Pb [2].

Как можно увидеть на рис. 1, индекс токсичности становится больше, чем меньше расстояние до Среднеуральского медеплавильного завода, наибольший показатель индекса токсичности наблюдается у свинца и кадмия ($p < 0,05$).



Рис. 1. Индекс токсичности в зависимости от расстояния от источника эмиссии

Как показано в таблице, для цинка, кадмия и меди характерно прямое накопление в тканях люмбрицид (Табл. 2). Чем выше концентрация этих элементов в почве, тем больше содержание в тканях дождевых червей. Для накопления цинка показатель силы влияния оказался низким и не достоверным. Со снижением расстояния до точечного источника эмиссии, ANOVA показал уменьшение силы влияния концентрации загрязнителей на накопление, возможно, данный факт свидетельствует о наличии барьера накопления тяжелых металлов, после которого следует массовая гибель дождевых червей.

Таблица 2

Зависимость накопления тяжелых металлов в тканях *P. diplotratheca* от концентрации тяжелых металлов в почве

| металл | $\bar{x} \pm m$ | F | k-n | A |
|--------|-----------------|-------|-------|------|
| Cu | 0,75±0,02 | 20.63 | 1; 62 | 0,05 |

| | | | | |
|----|-----------|--------|-------|------|
| Pb | 0,35±0,07 | 14.25 | 1; 62 | 0,01 |
| Cd | 0,55±0,05 | 16.25 | 1; 46 | 0,05 |
| Zn | 0,33±0,25 | (2.97) | 1; 46 | - |

Примечание: показатель силы влияния ± ошибка, F – достоверность по Фишеру, в круглых скобках – показатель $F < F_{таб}$, k-n – число степеней свободы, α – уровень значимости исследований

Для аккумуляции кадмия, свинца и цинка наблюдается достоверная разница ($p < 0,05$), которая зависит от возрастного состояния люмбрицид (Рис. 2). В ювенильных дождевых концентрация поллютантов меньше, чем в половозрелых, что объясняется меньшим временем пребывания неполовозрелых особей в загрязненной почве и подстилке и более быстрым, по сравнению с половозрелыми особями, обменом веществ. Разницы, зависящей от возрастного состояния дождевых червей, в аккумуляции меди установить не удалось.

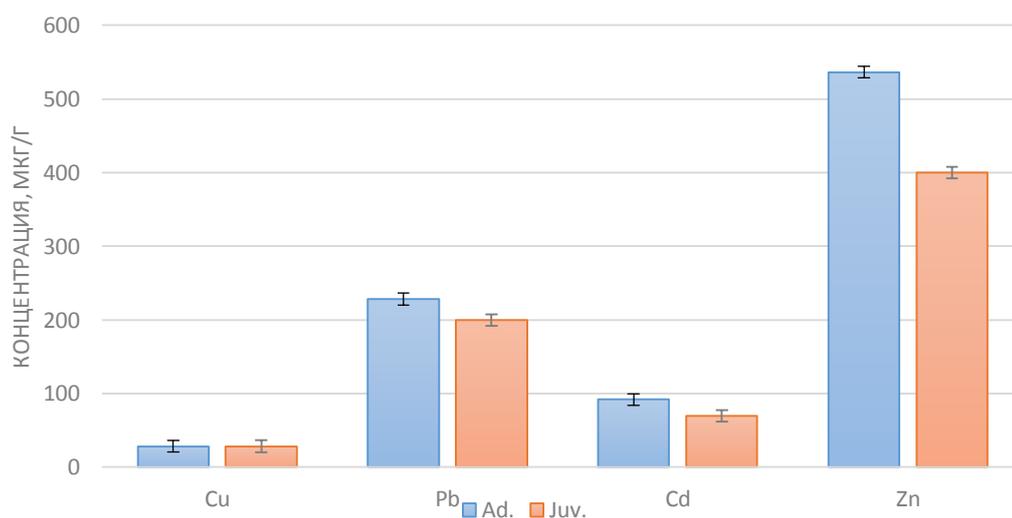


Рис. 2. Аккумуляция тяжелых металлов в тканях *P. diplotetratheca* в зависимости от возрастного состояния

Заключение

Таким образом, накопление цинка, меди и кадмия почвенно-подстилочным морфо-экологическим типом дождевых червей на примере *P. diplotetratheca* соответствует литературным данным, относящимся к данному морфотипу люмбрицид у других авторов, однако концентрация свинца оказалась выше прогнозируемой для данного уровня загрязнения. Сравнительный анализ с другими видами животных, обитающих в зоне воздействия Среднеуральского медеплавильного завода на окружающую среду, показал, что по накоплению тяжелых металлов дождевые черви занимают лидирующую роль, даже в сравнении с буферными концентрациями свинца и кадмия, сравниться с которыми могут только моллюски.

Данный факт доказывает утверждение о потенциальной опасности данных видов животных при переходе на следующий трофический уровень.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-34-00339 мол_а.

Список литературы

1. Водяницкий Ю.Н. Изучение тяжелых металлов в почвах. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2005. – 109 с.
2. Воробейчик Е.Л. Экологическое нормирование техногенных загрязнений / Е.Л. Воробейчик, О.Ф. Садыков, М.Г. Фарафонов. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 280 с.
3. Гиляров М.С. Почвенные беспозвоночные как показатели почвенного режима / М.С. Гиляров // Биологические методы оценки природной среды. – М.: Наука, 1978. – С. 78–90.
4. Гиляров М.С. Почвенные беспозвоночные как объект экологического мониторинга / М.С. Гиляров, А.Д. Покаржевский // Охраняемые природные территории. – М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1983. – С. 108–115.
5. Нестеркова Д.В. Тяжелые металлы в пищевой цепи “почва - дождевые черви - европейский крот” в условиях загрязнения среды выбросами медеплавильного завода / Д.В. Нестеркова, Е.Л. Воробейчик, И.С. Резниченко // Сибирский экологический журнал. – 2014. № 5 – С. 777–788.
6. Brown G.G. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains / G.G. Brown, I. Barois, P. Lavelle // European Journal of Soil Biology. – 2000. – Vol. 36. – P. 177–198.
7. Jones, C.G. Organisms as ecosystem engineers / C.G. Jones, J.H. Lawton, M. Shachak // Oikos. 1994. Vol. 69. P. 373–386.
8. Heikens, A. Bioaccumulation of heavy metals in terrestrial invertebrates / A. Heikens, W.J.G.M. Peijnenburg, A.J. Hendriks // Environ. Pollut. 2001. Vol. 113. P. 385–393.
9. Hsu M.J., Selvaraj K., Agoramoorthy G. Taiwan's industrial heavy metal pollution threatens terrestrial biota // Environ. Pollut. 2006. Vol. 143, No. 2. P. 327–334.
10. Lavelle, P. Earthworm activities and the soil system / P. Lavelle // Biology and Fertility of Soils. 1988. Vol. 6. P. 237–251.
11. Scott-Fordsmand, J.J. Importance of contamination history for understanding toxicity of copper to earthworm *Eisenia fetida* (Oligochaeta: Annelida), using neutral-red retention assay Environ/ J.J. Scott-Fordsmand, J.M. Weeks, S.P. Hopkin // Toxicol. Chem. 2000. Vol. 19. P. 1174–1780.

12. Nahmani, J. Effects of heavy metal soil pollution on earthworm communities in the north of France / J. Nahmani, P. Lavelle, E. Lapied, F. van Oort // *Pedobiologia*. 2004. Vol. 47. P. 663–669.