

УДК 599.323.43-13+504.5:699.2/.8

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В СИСТЕМЕ МАТЬ–ПЛАЦЕНТА–ПЛОД У РЫЖЕЙ ПОЛЕВКИ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО КОМБИНАТА

© 2015 г. С. В. Мухачева, В. С. Безель

Институт экологии растений и животных УрО РАН

620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

e-mail: msv@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 20.11.2014 г.

Аккумуляция тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) в системе мать–плацента–плод исследована у мелких млекопитающих (на примере рыжей полевки), обитающих в условиях загрязнения среды выбросами медеплавильного производства (Средний Урал). Оценена роль гастроинтестинального и плацентарного барьеров в транслокации исследованных элементов от рационов беременных самок до эмбрионов. Показано, что при существующих уровнях загрязнения среды поступление токсикантов в организм материнских особей не обязательно приводит к значительным эмбриональным потерям в течение беременности, но может сказываться на качестве потомства и его жизнеспособности в ранний постнатальный период.

Ключевые слова: мелкие млекопитающие, промышленное загрязнение, тяжелые металлы, эмбрион, плацента, медеплавильный завод, Средний Урал.

DOI: 10.7868/S0367059715060128

Необходимым условием устойчивого функционирования природных популяций любого вида считается их способность поддерживать высокий уровень обилия при неблагоприятных изменениях среды, в том числе при интенсивном антропогенном воздействии. Это в полной мере относится к мелким млекопитающим (мышевидным грызунам и мелким насекомоядным), обитающим в условиях загрязнения среды различными поллютантами (тяжелые металлы, радиоактивные элементы, органические соединения) и часто используемым в качестве модельных объектов как в популяционной экологии (Шварц, 1980), так и в экотоксикологии (Talmage, Walton, 1991).

Большинство авторов связывает наблюдаемые токсические эффекты с последствиями прямого воздействия загрязнителей на репродукцию (Динерман, 1980; Москвитина и др., 2011; Domingo, 1994; Thompson, Bannigan, 2008). Если в лабораторном эксперименте возможна точная оценка токсического эффекта в зависимости от дозовой нагрузки, то при изучении природных популяций необходимо учитывать множество дополнительных факторов: мозаичность полей загрязнения, изменчивость рационов, пространственное перемещение животных в градиенте загрязнения и т.д. В этих условиях оценить вклад прямого воздей-

ствия поллютантов можно, оперируя величинами поступления с кормом и накопления токсических элементов в организме. При этом необходимо учитывать наличие в организме эффективных гистогематических барьеров, благодаря которым реализуется интенсивный селективный транспорт и обеспечивается защита потомства от действия разнообразных химических факторов.

Исследования, посвященные транслокации химических элементов в цепочке рацион–материнский организм–плацента–плод, при хроническом воздействии токсикантов на животных в условиях эксперимента крайне немногочисленны, а для природных популяций практически отсутствуют. Цель настоящей работы – оценить роль гастроинтестинального и плацентарного барьеров в транслокации тяжелых металлов в системе мать–плацента–плод у мелких млекопитающих (на примере рыжей полевки), обитающих в условиях загрязнения среды выбросами медеплавильного производства. Проверяемая нами гипотеза заключается в предположении, что при существующих уровнях загрязнения среды поступление токсикантов в организм материнских особей не обязательно приводит к значительным эмбриональным потерям в течение беременности, но мо-

Таблица 1. Объем исследованного материала

Период, годы	Отработано ловушко-суток	Добыто самок ¹	Количество образцов для измерения концентрации тяжелых металлов				Оценка массы эмбриона ³
			рацион ²	печень	плацента	эмбрион ³	
1990–1994	23365	144	82	101	0	7 (2)	34 (6)
1995–2000	18115	135	134	70	52	63 (9)	68 (13)
2003–2007	13725	190	61 ⁴	26	80	92 (18)	198 (28)
Итого	55205	469	216	197	132	162 (29)	300 (47)

Примечание: 1 – приведено общее количество размножающихся самок в отловах; 2 – для оценивания концентрации элементов в рационе использовали содержимое желудка самок; 3 – количество проанализированных эмбрионов, в круглых скобках – число выводков; 4 – для оценки долговременных изменений приведены данные за 2012–2014 г.

жет сказываться на качестве потомства и его жизнеспособности в ранний постнатальный период.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы материалы, полученные в ходе многолетних (1990–2007 гг.) исследований сообществ мелких млекопитающих, населяющих территории в зоне действия Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ) и фоновые участки. Комбинат, расположенный в 50 км к западу от г. Екатеринбурга, в течение многих десятилетий (с 1940 г.) являлся крупнейшим источником атмосферного загрязнения. Основные ингредиенты выбросов – газообразные соединения S, F и N, а также пылевые частицы с сорбированными металлами (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Hg и др.) и металлоидами (As). Несмотря на существенное снижение объема атмосферных выбросов в последние десятилетия (1989 г. – 141 тыс. т/год, 2005 г. – 25 тыс. т/год, с 2010 г. – менее 5 тыс. т/год), содержание тяжелых металлов в почве (Трубина и др., 2014) и кормовых объектах рыжих полевок (с 1990 по 2014 г., наши данные) изменялось незначительно, что позволило нам в дальнейшем рассматривать объединенные выборки.

Участки исследования расположены в западном направлении от источника эмиссии в зоне действия комбината (в 1–2 и 4–6 км) и на значительном удалении от него (20–30 км). На основании анализа содержания тяжелых металлов в природных депонирующих средах (почве, лесной подстилке, снежном покрове) участки были отнесены соответственно к загрязненной (Imp) или фоновой (Bg) зонам. Подробная характеристика участков приведена ранее (Воробейчик и др., 1994; Мухачева, 2007).

В качестве модельного объекта использовали рыжую полевку (*Clethrionomys (Myodes) glareolus* Schreber, 1780) – вид, доминирующий в сообществах мелких млекопитающих сравнимых территорий. Животных отлавливали линиями лову-

шек-плашек (25 шт. через 5–7 м, которые экспонировали в течение 4–5 сут с ежедневной однократной проверкой) в течение периода массового размножения (с мая по август) одновременно на всех участках. Отработано более 55000 ловушко-суток, добыто 469 размножающихся самок рыжей полевки (табл. 1).

Стадию развития эмбрионов определяли по методике Н.В. Тупиковой (1964). Эмбрионы и соответствующие им плаценты освобождали от плодных оболочек, удаляли амниотическую жидкость, взвешивали на электронных весах Tanita (с точностью до 0.001 г) и высушивали при температуре 65°C для химического анализа. Для оценки изменения массы эмбрионов в течение беременности (от 12 до 20 дней) использовали данные по 300 эмбрионам из 47 выводков.

Содержание приоритетных в районе исследования поллютантов (Cu, Zn, Cd, Pb) изучали в рационе (содержимом желудка) и организме (печень) беременных рыжих полевок, плацентах и эмбрионах на поздних сроках беременности. Индивидуальные уровни накопления анализировали в 216 образцах содержимого желудков, 197 – печени, 162 – эмбрионах и 132 – плацентах. Для оценки барьерной функции желудочно-кишечного тракта и плаценты использовали только “парные” субстраты, т.е. содержимое желудка и печень одних и тех же самок ($n = 140$), эмбрионы с соответствующими плацентами ($n = 132$).

Образцы измельчали, взвешивали (около 0.1 г) на аналитических весах KERN-770 с точностью 0.00001 г, озоляли в микроволновой печи MWS-2 (Berghof, Германия) методом мокрой минерализации в 65%-ной азотной кислоте. Концентрацию элементов (мкг/г сухой массы) определяли методом атомной абсорбции на спектрометре AAS 3 Vario (Analytik Jena AG, Германия) с использованием пламенного (для Cu, Zn) или электротермического (Cd, Pb) вариантов атомизации. Анализы выполнены в лаборатории экотоксикологии популяций и сообществ ИЭРиЖ УрО РАН, аккредито-

Таблица 2. Концентрации тяжелых металлов (мкг/г сухой массы) в рационе, печени, эмбрионах и плаценте беременных рыжих полевок, обитающих на фоновой (Bg) и загрязненной (Imp) территориях

Субстрат	Зона отлова	Концентрация элемента, мкг/г сухой массы			
		Cu	Zn	Cd	Pb
Содержимое желудка	Bg	$\frac{16.37 [73]}{5.08-83.20}$	$\frac{89.24 [72]}{19.06-452.91}$	$\frac{0.91 [73]}{0.01-9.38}$	$\frac{7.67 [70]}{0.01-59.47}$
	Imp	$\frac{148.30 [140]}{11.85-087.12}$	$\frac{191.53 [139]}{22.98-1516.78}$	$\frac{4.27 [143]}{0.10-17.30}$	$\frac{38.37 [135]}{0.12-287.38}$
Печень	Bg	$\frac{11.71 [84]}{3.78-26.51}$	$\frac{94.73 [83]}{21.31-187.45}$	$\frac{1.55 [84]}{0.01-8.08}$	$\frac{1.57 [69]}{0.01-10.86}$
	Imp	$\frac{13.55 [111]}{4.32-63.62}$	$\frac{100.92 [112]}{25.70-154.53}$	$\frac{8.75 [111]}{0.49-54.82}$	$\frac{3.57 [97]}{0.22-19.65}$
Плацента	Bg	$\frac{12.12 [99]}{2.51-32.13}$	$\frac{84.70 [99]}{16.11-395.77}$	$\frac{0.12 [99]}{0.01-0.94}$	$\frac{0.65 [46]}{0.10-3.72}$
	Imp	$\frac{14.90 [33]}{2.04-38.22}$	$\frac{80.50 [33]}{36.27-164.57}$	$\frac{0.70 [33]}{0.25-1.17}$	$\frac{0.41 [11]}{0.09-1.30}$
Эмбрион	Bg	$\frac{6.88 [113]}{1.39-19.56}$	$\frac{90.04 [112]}{68.39-296.80}$	$\frac{0.04 [98]}{0.01-0.75}$	$\frac{1.13 [47]}{0.11-6.11}$
	Imp	$\frac{8.07 [50]}{1.60-17.11}$	$\frac{86.84 [50]}{39.53-311.19}$	$\frac{0.06 [41]}{0.01-1.22}$	$\frac{4.32 [19]}{1.13-9.49}$

Примечание: в числителе приведены медиана и объем выборки (в квадратных скобках), в знаменателе – минимальное и максимальное значения.

ванной на техническую компетентность (аттестат аккредитации № РОСС. RU0001.515630). Качество измерений оценивали по международному стандартному образцу CRM 185R (бычья печень). Проанализировано 707 образцов (см. табл. 1), выполнено около 2600 элементоопределений.

Статистический анализ осуществляли в пакете Statistica v.8.0. Для оценки различий в содержании элементов использовали непараметрический тест Манна–Уитни (U), для выявления связей между концентрациями элементов в субстратах, а также массы эмбрионов с концентрациями тяжелых металлов в них – коэффициент корреляции Спирмена. Множественные сравнения выполнили по критерию Тьюки, значимыми считали различия при $p < 0.05$. Для оценки изменчивости массы жизнеспособных эмбрионов (без признаков резорбции) внутри одного выводка использовали коэффициент вариации CV.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Долговременные изменения содержания тяжелых металлов в кормовых объектах рыжей полевки оценивали на основании данных по содержанию желудка животных, наиболее адекватно отражающему рацион зверьков на конкретной территории

(Мухачева, Безель, 1995; Безель и др., 2007). Множественные сравнения показали, что в рационе полевок, отловленных в пределах одной зоны в разные периоды, концентрации Zn, Cd и Pb не имели значимых отличий. Например, концентрация Cd в корме полевок с фонового участка в 1990–1994 гг. составляла 1.34 ± 0.30 мкг/г сухой массы, в 1995–2000 гг. – 1.97 ± 0.22 ; в 2012–2014 гг. – 1.70 ± 0.16 ; на загрязненной территории соответственно 4.34 ± 0.39 , 5.72 ± 0.42 , 3.45 ± 0.67 . И только в корме самок с загрязненного участка концентрация Cu за время исследований снизилась в 3 раза: с 198.9 ± 22.2 мкг/г сухой массы в 1990–1994 гг. до 64.4 ± 8.7 в 2012–2014 гг. Однако существенного влияния на аккумуляцию меди в организме это не оказало, так как ее содержание эффективно регулируется гомеостатическими механизмами.

Концентрации тяжелых металлов в рассматриваемых субстратах приведены в табл. 2. Определяемые по содержанию желудков *рационы* размножающихся самок с загрязненных участков содержали все элементы в количествах, превышающих фоновые: Cu – в 9 раз ($U_{Cu} = 288$, $p < 0.0001$), Pb – в 5 раз ($U_{Pb} = 1661$, $p < 0.0001$), Cd – в 4.6 раза ($U_{Cd} = 1606$, $p < 0.0001$), Zn – в 2 раза ($U_{Zn} = 1929$, $p < 0.0001$). Концентрации всех элементов положи-

тельно коррелировали друг с другом ($r = 0.51–0.77, p < 0.05$).

Сходная тенденция обнаружена и для аккумуляции тяжелых металлов *в организме материнских особей (печень)*, однако интенсивность накопления физиологически необходимых (Cu и Zn) и токсических (Cd и Pb) элементов различалась. При приближении к источнику эмиссии концентрации Zn и Cu увеличились лишь на 7–15% от фоновых значений ($U_{Zn} = 3598, p = 0.007; U_{Cu} = 3242, p < 0.0003$), тогда как Cd – в 5.6 раза ($U_{Cd} = 710, p < 0.0001$), Pb – в 2.3 раза ($U_{Pb} = 1885, p < 0.0001$). Содержание большинства тяжелых металлов в печени и корме тесно связано ($r_{Cu} = 0.57, r_{Cd} = 0.50, r_{Pb} = 0.49, p < 0.05$), за исключением Zn, концентрация которого в печени не зависела от его количества в рационе ($r = 0.22$).

Содержание большинства исследованных элементов *в плаценте* не зависело от уровня загрязнения территории. Исключение составлял Cd ($U_{Cd} = 158, p < 0.0001$), концентрация которого в плаценте на загрязненных участках почти в 6 раз превышала фоновые значения. Между уровнями токсичных элементов (Cd и Pb) в плаценте отмечена отрицательная корреляция ($r = -0.52, n = 189, p < 0.05$), для эссенциальных (Cu и Zn) – положительная ($r = 0.32, n = 262, p < 0.05$).

Концентрации Cd и Pb *в эмбрионах* с загрязненных участков в 2–4 раза превышали соответствующие значения для фоновых территорий ($U_{Cd} = 1505, p = 0.019; U_{Pb} = 132, p < 0.0001$) и положительно коррелировали между собой ($r = 0.29, n = 205, p < 0.05$). Независимо от участка концентрация Cd в эмбрионе всегда была ниже, чем в соответствующей плаценте; для Pb отмечена обратная зависимость. Уровни накопления в эмбрионе Cu и Zn варьировали незначительно и увеличивались пропорционально их изменению в плацентах. Отмечены также отрицательные корреляции в парах Cd–Cu ($r = -0.29, n = 302, p < 0.05$) и Pb–Zn ($r = -0.36, n = 228, p < 0.05$).

Масса эмбриона. В ходе беременности у полевок с загрязненной территории отмечали относительное (в сравнении с фоновым) снижение массы потомства, достигающее к окончанию внутриутробного развития 6–10%, а в отдельных выводах – 20% (рис. 1). Множественные сравнения показали, что значимыми ($p = 0.013$) различия становятся лишь на завершающем этапе беременности (18–20 дней): на фоновой территории в расчете на сырую массу эмбрион весит в среднем 1.27 ± 0.05 г ($n = 123$), на загрязненной – 1.05 ± 0.06 г ($n = 53$).

Увеличение концентраций токсикантов (Cd и Pb) в эмбрионах сопровождалось относительным снижением их массы во второй половине беременности (рис. 2). Однако из-за большой изменчивости массы отдельных эмбрионов (как между

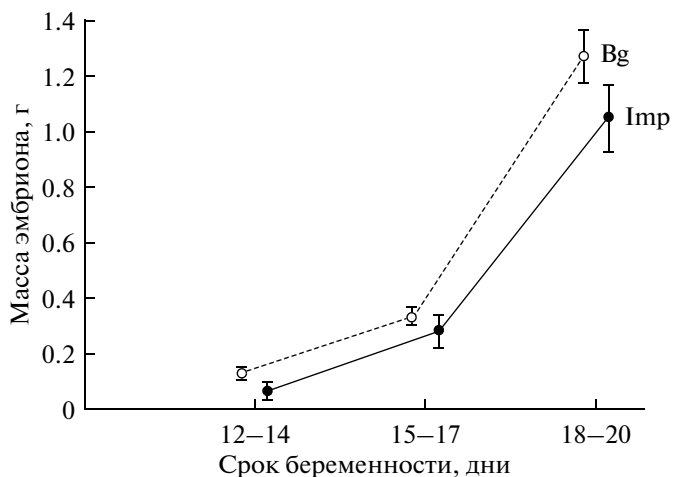


Рис. 1. Изменение массы эмбриона (среднее и 95% ДИ) у рыжих полевок, населяющих фоновые (Bg) и загрязненные участки (Imp), во второй половине беременности.

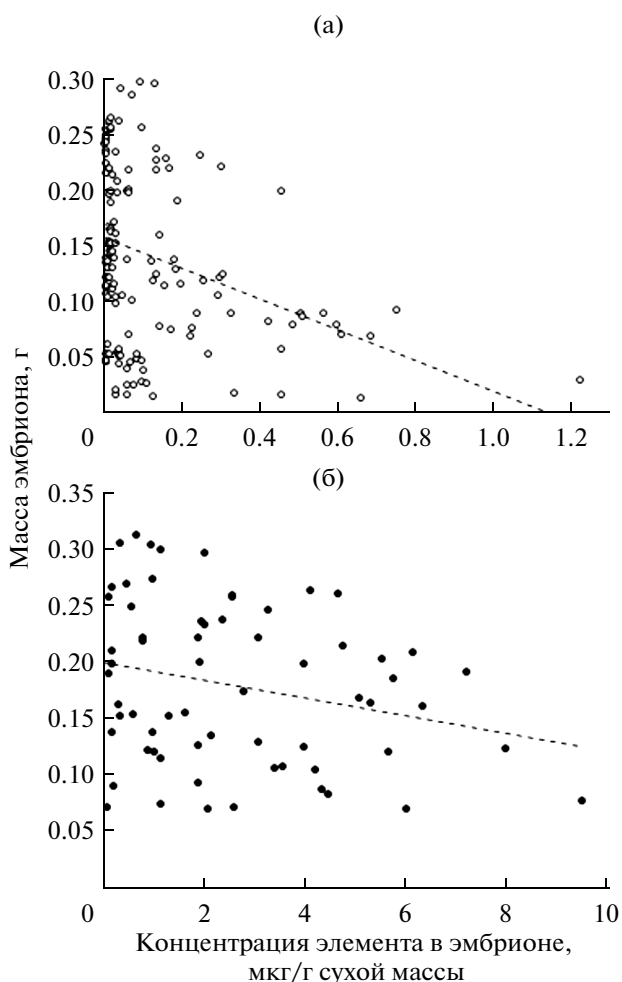


Рис. 2. Изменение массы эмбрионов рыжей полевки во второй половине беременности в зависимости от концентрации в них Cd (а) и Pb (б).

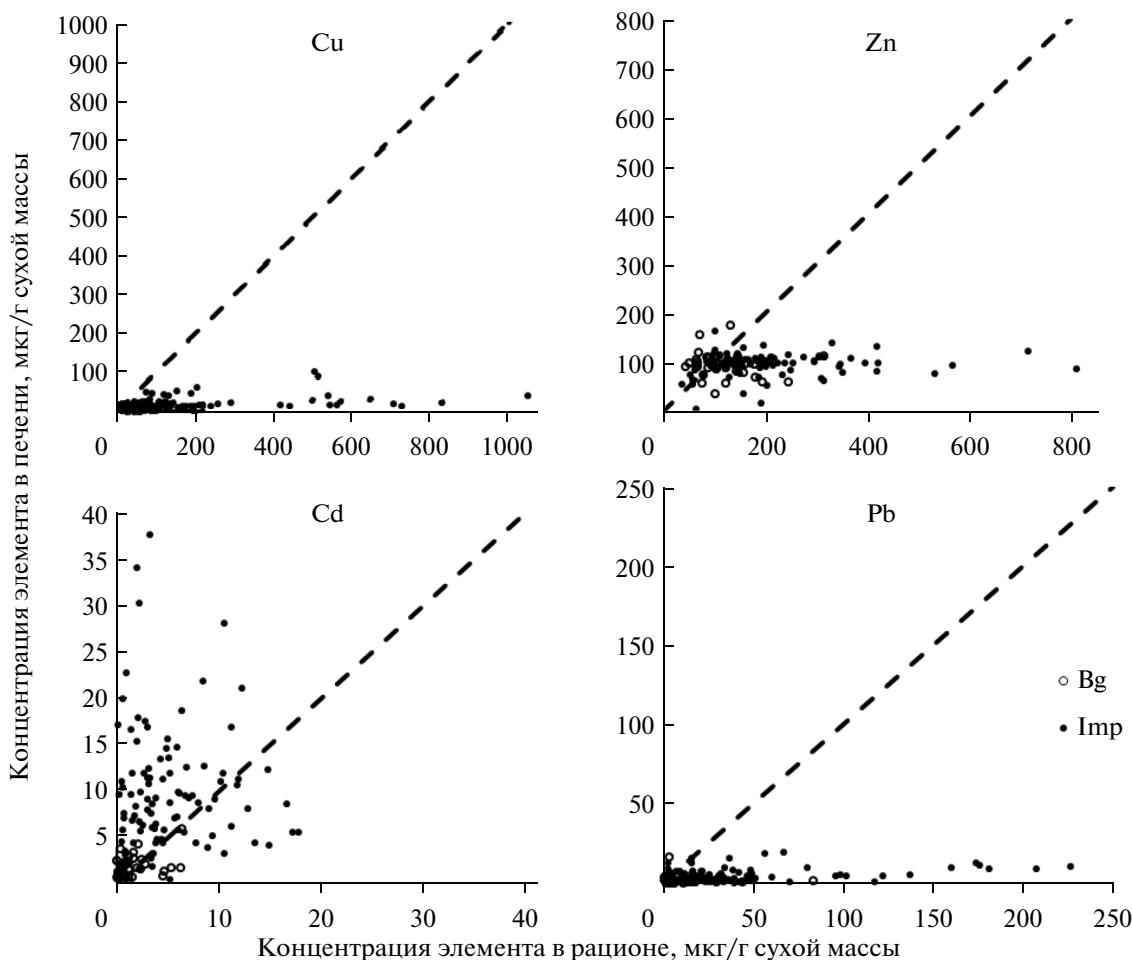


Рис. 3. Изменение концентрации тяжелых металлов в печени и рационе рыжей полевки с фоновых (Bg) и загрязненных (Imp) территорий.

выводками, так и в пределах одного выводка) связь слабая ($r = 0.25-0.32$). По нашим оценкам вариабельность массы жизнеспособных эмбрионов в выводке составляла в среднем 10% (CV от 2.2 до 25.4%) и не зависела от степени загрязнения участка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Роль гастроинтестинального барьера. Барьер на уровне ЖКТ – это один из уникальных гистогематических барьеров организма, в котором благодаря межтканевым и межклеточным кооперациям реализуется интенсивный селективный транспорт, обеспечивающий защиту от действия разнообразных механических, химических и биологических факторов (Могильная, Могильный, 2007). Оценить его роль можно по соотношению концентрации тяжелых металлов в рационе и печени одних и тех же особей (рис. 3): штриховая линия (биссектриса) означает прямую пропорциональную зависимость концентрации металла в этих субстратах,

точки ниже биссектрисы свидетельствуют о дискриминации элемента, выше – о его концентрировании в организме.

Несмотря на высокие концентрации Cu, Zn и Pb в корме рыжих полевок на загрязненной территории, токсическая нагрузка этих элементов на организм (печень) незначительна. Интенсивно аккумулировался в печени зверьков независимо от участка исследования Cd: его концентрация в печени примерно в 2 раза выше, чем в рационе.

Таким образом, для Cu, Zn и Pb характерна дискриминация элементов на уровне гастроинтестинального барьера, тогда как Cd его легко преодолевает. Подобная зависимость показана для мелких млекопитающих разных трофических групп (Безель и др., 2007; Нестеркова и др., 2014).

Роль плацентарного барьера. Плацента является связующим звеном между развивающимся эмбрионом и материнским организмом, выполняя двойную функцию: обеспечивает свободное прохождение одних веществ (питание, газообмен) и

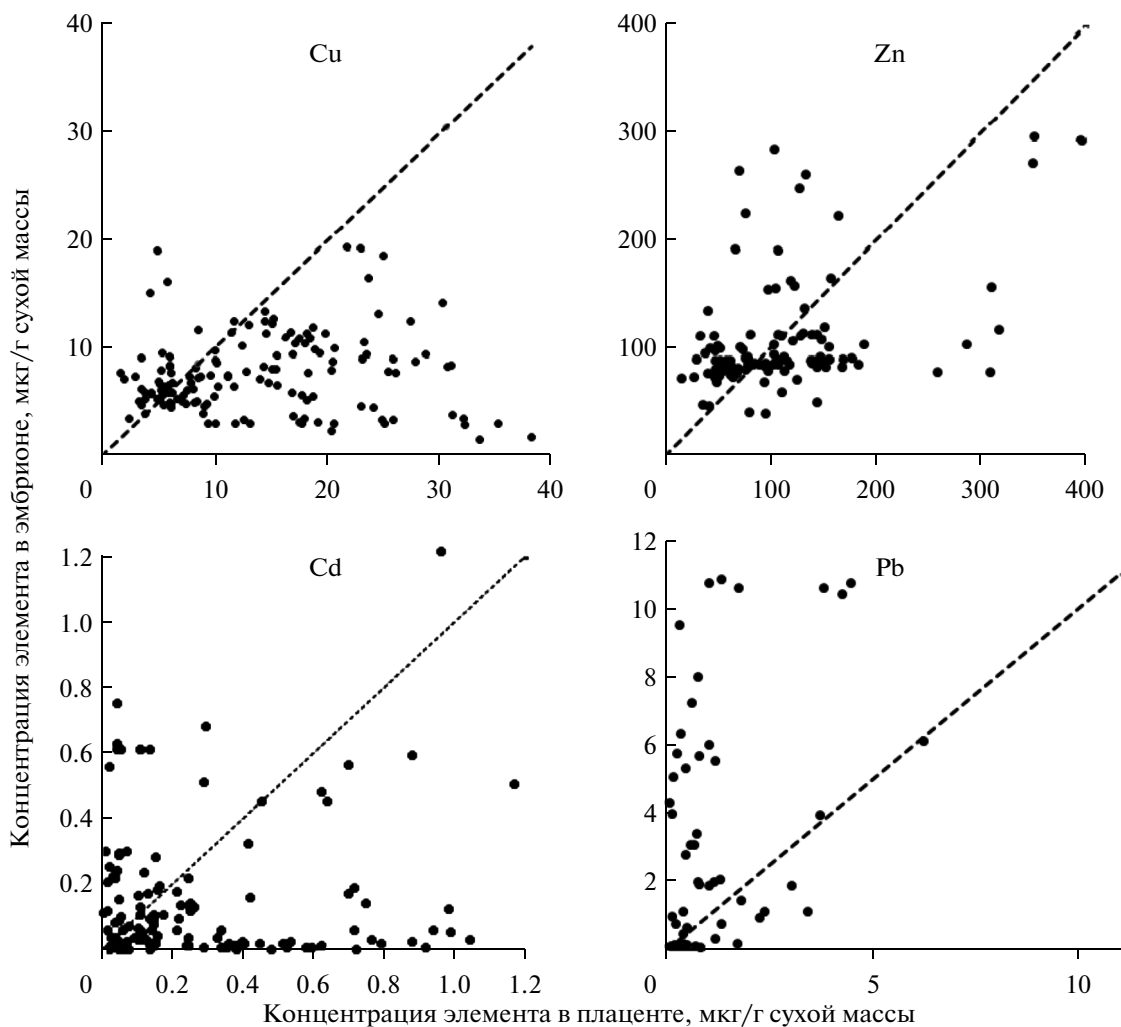


Рис. 4. Изменение концентрации тяжелых металлов в эмбрионах и соответствующих им плацентах рыжей полевки.

выступает в качестве барьера для других. Однако некоторые ксенобиотики (в том числе тяжелые металлы) проникают через плаценту, оказывая негативное воздействие на плод (Iyengar, Rapp, 2001; Stawarz et al., 2011; Amaya et al., 2013).

Барьерную роль плаценты в процессе транслокации химических элементов от материнского организма к развивающемуся плоду можно оценить, рассматривая соотношение концентраций тяжелых металлов в плацентах и соответствующих им эмбрионах (рис. 4). Подобная зависимость позволяет определить диапазон критических концентраций элементов, превышение которых ведет к их аккумуляции в эмбрионе. Медь пропорционально накапливалась в плаценте и эмбрионе до уровня 10 мкг/г сухой массы, а его превышение приводило к ограниченному поступлению элемента в эмбрион. Иначе изменялась концентрация другого эссенциального элемента — Zn: отмечалось его накопление в эмбрионе по

сравнению с плацентой. Лишь при достижении значительных (200 мкг/г сухой массы) уровней Zn в плаценте его поступление к плоду ограничивалось. Согласно литературным данным (Lindsay et al., 1994), содержание Zn в эмбрионе увеличивается на протяжении всей беременности.

Для токсических элементов дискриминационная функция плаценты выражена в меньшей степени, чем для эссенциальных: для Cd она исполняет роль частичного барьера, а Pb легко его преодолевает (см. рис. 4). Это хорошо согласуется с литературными данными (Osman et al., 2000; Iyengar, Rapp, 2001; Stawarz et al., 2011). По сведениям одних авторов (Loiacono et al., 1992; Baranowska, 1995; Diaz-Barriga et al., 1995; Zakrzewska et al., 2002), среднее содержание Cd в плацентах в индустриально развитых районах значительно (от 50 до 800%) превышает фоновые значения, тогда как другие (Truska et al., 1989) не отмечали подобных изменений. Согласно нашим данным, в плаценте

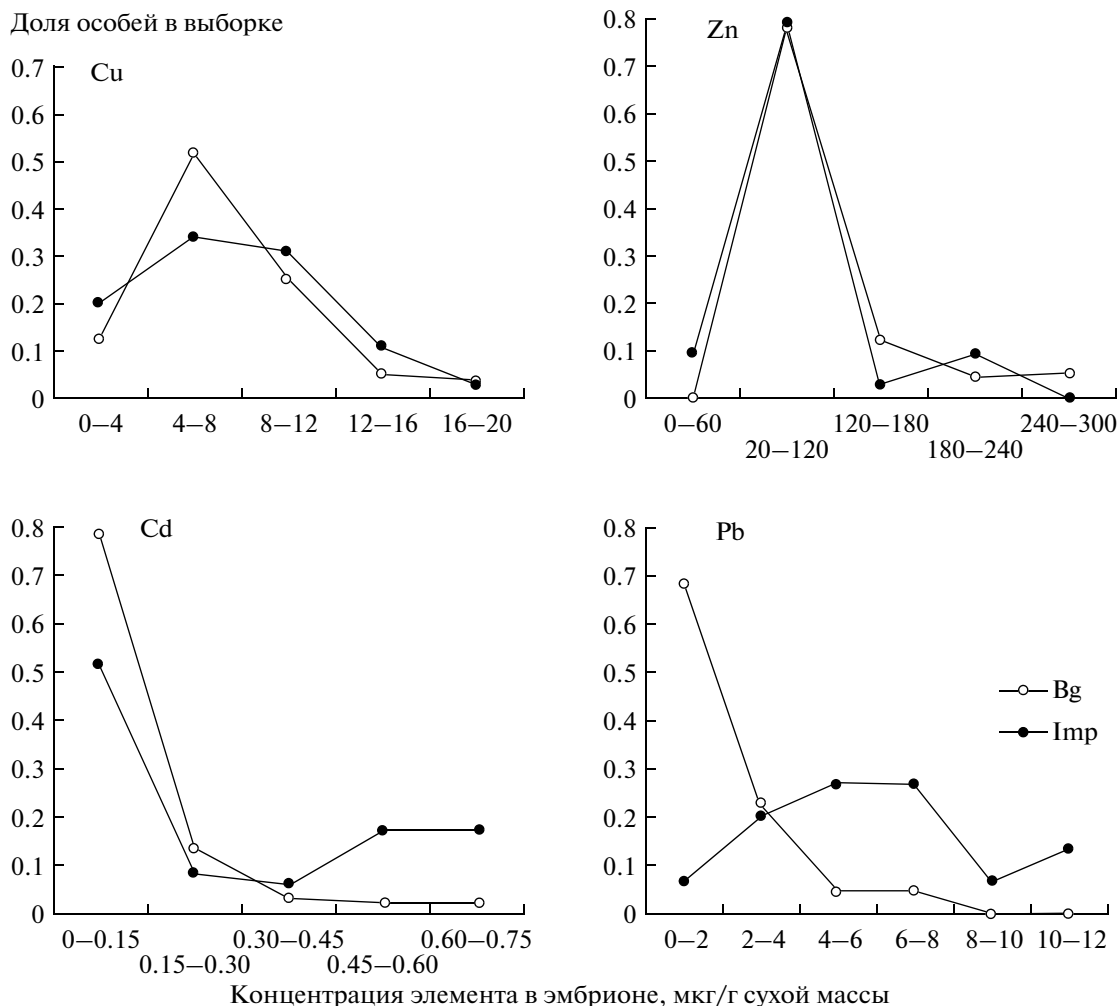


Рис. 5. Кривые распределения концентраций эссенциальных и токсических элементов в эмбрионах на фоновой (Bg) и загрязненной (Imp) территориях.

животных с загрязненных участков к окончанию беременности Cd содержалось в среднем в 5 раз больше, чем на фоновых участках, тогда как для Pb значимых различий не регистрировали (табл. 2).

Накопление химических элементов в развивающихся эмбрионах на участках с разным уровнем загрязнения можно представить в виде частотных распределений, смещение которых в сторону высоких концентраций отражает повышенную аккумуляцию элементов на загрязненных участках (рис. 5). Несмотря на повышенные уровни элементов в рационе животных, обитающих в импактной зоне (Cu – в 9 раз, Zn – в 2 раза), практически полное совпадение кривых распределения концентраций Cu и Zn в выборках фоновой и загрязненного участка отражает дискриминацию этих элементов на уровне рассмотренных выше барьеров. В распределении концентраций Cd и Pb четко проявляется эффект более интенсивного их накопления в эмбрионах на загрязненных участ-

ках, что полностью соответствует повышенным (в 5 раз) концентрациям этих токсических элементов в материнском рационе и отсутствию “жесткого” барьера на уровне плаценты. Так, например, на загрязненной территории эмбрионов с концентрацией Cd выше 0.45 мкг/г в 4 раза больше, чем на фоновой. В случае Pb доля эмбрионов, аккумулировавших его в количествах выше 4.0 мкг/г, в импактной зоне в 7 раз выше фоновой (см. рис. 5).

Таким образом, выраженная дискриминация отдельных эссенциальных элементов и ее отсутствие в случае токсикантов в организмах млекопитающих при рассмотренных уровнях загрязнения формируется за счет барьерной функции желудочно-кишечного тракта и плаценты.

Популяционные эффекты. Токсическое воздействие Cd и Pb на репродуктивную функцию млекопитающих не вызывает сомнения (Domingo, 1994; Thompson, Bannigan, 2008). Поражения мо-

гут затронуть как гонады родительских особей, так и развивающееся потомство, приводя в отдельных случаях к полному срыву беременности. Обсуждаемые нами транслокации химических элементов в системе рацион–организм матери–плацента–эмбрион с точки зрения популяционной экотоксикологии имеют не только индикационное значение, но и отражают ключевые моменты благополучия популяции, прежде всего ее способность обеспечивать необходимый уровень воспроизводства качественного потомства. Несмотря на повышенные уровни поступления тяжелых металлов с кормом у материнских особей рыжих полевок, обитающих на загрязненных территориях, наличие системы гистогематических барьеров на уровне организма обеспечивает существенное снижение концентраций токсикантов в органах, тканях, а также в развивающихся эмбрионах. По нашим данным, при рассматриваемых уровнях промышленного загрязнения отдельные стадии эмбриогенеза у рыжей полевки отличаются высокой резистентностью к воздействию тяжелых металлов, не отмечено значимого их влияния на такие репродуктивные показатели, как потенциальная плодовитость и гибель эмбрионов в течение периода внутриутробного развития (Мухачева, 2001).

Однако простой подсчет числа живых эмбрионов, которым обычно ограничиваются в ходе стандартного зоологического обследования животных из природных популяций, не позволяет учесть качество потомства. На отклонения от нормального развития (наличие уродств, размерно-весовые характеристики эмбриона, особенности расположения плаценты и т.д.), определяющие здоровье потомства, внимание обращают крайне редко (Москвитина и др., 2011). В то же время при хроническом воздействии тяжелых металлов на материнский организм в течение беременности в эмбрионах мелких млекопитающих может развиваться до 30 типов серьезных патологических изменений (Москвитина и др., 2011; Саломейна, Машак, 2012; Мирзоев и др., 2014; Domingo, 1994; Zakrzewska et al., 2002; Thompson, Bannigan, 2008): многие из них приводят к рождению ослабленного потомства, другие несовместимы с жизнью.

Одним из важнейших показателей, определяющих жизненный потенциал детеныша, является его масса. Известно, что масса эмбрионов (новоорожденных) отрицательно связана с концентрацией токсикантов в плаценте (Ward et al., 1987; Loïacono et al., 1992; Benitez et al., 2009). При хроническом воздействии загрязнителей в течение беременности и лактации снижение массы может достигать 6–10%, в отдельных случаях – 25% от контрольных значений (Саломейна, Машак, 2012; Zakrzewska, 1988).

В нашем случае увеличение уровней Pb и в меньшей степени Cd к концу внутриутробного периода в эмбрионах рыжей полевки с загрязненных участков сопровождается снижением их массы в сравнении с фоновыми. К концу беременности (18–20 дней) эмбрионов с массой менее 1 г на фоновой территории около 40%, на загрязненных участках – более 50%. Это неизбежно ведет к появлению ослабленного потомства и его повышенной смертности в ранний постнатальный период. В отличие от уровня эмбриональных потерь масса эмбрионов более адекватно оценивает изменение репродуктивного потенциала популяции, что подтверждают наши данные (Безель и др., 1998; Мухачева, 2001), согласно которым относительная выживаемость молодняка в летне-осенний период на загрязненной территории в 1.5–1.8 раза ниже фоновой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании химического анализа рационов, печени и потомства (эмбрионов и плацент) самок рыжей полевки, обитающих в условиях загрязнения среды выбросами медеплавильного комбината, оценено поступление с рационом и накопление в организме эссенциальных (Cu, Zn) и токсических (Cd, Pb) элементов. Показано, что на уровне желудочно-кишечного тракта происходит дискриминация Cu, Zn и Pb, тогда как Cd легко его преодолевает. Плацентарный барьер ограничивает избыточное поступление Cu, Zn и Cd, но проницаем для Pb.

Установлено, что в ходе внутриутробного развития концентрации Pb и Cd в эмбрионах с загрязненных участков увеличиваются, а относительная масса развивающегося потомства снижается. Это может приводить к ослаблению приспособительного потенциала потомства и его повышенной элиминации в ранний постнатальный период.

Проверяемая нами гипотеза заключается в предположении, что при существующих уровнях загрязнения среды поступление токсикантов в организм материнских особей не обязательно приводит к значительным эмбриональным потерям в течение беременности, но может сказываться на качестве потомства и его жизнеспособности в ранний постнатальный период.

В конкретных условиях загрязнения среды наблюдаемые изменения основных репродуктивных показателей полевок лишь в малой степени связаны с прямым токсическим воздействием поллютантов, которое, возможно, проявляется в снижении массы эмбрионов во второй половине беременности, что полностью подтверждает выдвинутую нами рабочую гипотезу. Вероятно, решающую роль в реализации репродуктивного потенциала популяции вносят такие факторы, как

качество среды обитания, возрастная структура, уровень локальной численности животных.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН (№ 15-3-А-28), Программы развития научных школ (НШ-2840.2014.4), а также РФФИ (проекты № 12-05-00811, 13-04-01229). Авторы выражают искреннюю признательность Е.Л. Воробейчику за конструктивные замечания при написании статьи, а также Э.А. Ахуновой и А.В. Щепеткину, выполнившим аналитические работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. 280 с.
- Безель В.С., Бельский Е.А., Мухачева С.В.* К проблеме вариабельности показателей воспроизводства в популяциях животных при токсическом загрязнении среды обитания // *Экология*. 1998. № 3. С. 217–223. [*Bezel V.S., Belskii E.A., Mukhacheva S.V.* On the problem of variability in reproductive parameters of animal under toxic pollution of the environment // *Rus. J. Ecol.* 1998. V. 29. № 3. P. 186–191.]
- Безель В.С., Куценогий К.П., Мухачева С.В.* и др. Элементный состав рационов питания и тканей мелких млекопитающих различных трофических уровней как биоиндикатор химического загрязнения окружающей среды // *Химия в интересах устойчивого развития* 2007. № 15. С. 33–42.
- Динерман А.А.* Роль загрязнителей окружающей среды в нарушении эмбрионального развития. М.: Медицина, 1980. 192 с.
- Могильная Г.М., Могильный В.Л.* Гастроинтестинальный защитный барьер // *Морфология*. 2007. № 6. С. 9–16.
- Мирзоев Э.Б., Кобяко В.О., Губина О.А., Фролова Н.А.* Ответная реакция организма крыс (поколение F1) при хроническом воздействии малых доз кадмия в антенатальный период развития // *Токсик. вестн.* 2014. № 4. С. 29–33.
- Москвитина Н.С., Куранова В.Н., Савельев С.В.* Нарушение эмбрионального развития позвоночных животных в условиях техногенного загрязнения среды // *Сиб. экол. журн.* 2011. № 4. С. 489–495.
- Мухачева С.В.* Воспроизводство населения рыжей полевки в градиенте техногенного загрязнения среды // *Зоол. журн.* 2001. Т. 80. № 12. С. 1509–1517.
- Мухачева С.В.* Особенности пространственно-временного размещения населения рыжей полевки в градиенте техногенного загрязнения среды обитания // *Экология*. 2007. № 3. С. 178–184. [*Mukhacheva S.V.* Spatiotemporal population structure of the bank vole in a gradient of technogenic environmental pollution // *Rus. J. Ecol.* 2007. V. 38. № 3. P. 161–167.]
- Мухачева С.В., Безель В.С.* Уровни токсических элементов и функциональная структура популяций мелких млекопитающих в условиях техногенного загрязнения (на примере рыжей полевки) // *Экология*. 1995. № 3. С. 237–240. [*Mukhacheva S.V., Bezel V.S.* Levels of toxic elements and functional structure in population of small mammals under the condition technogenic pollution (with reference to the bank vole) // *Rus. J. Ecol.* 1995. V. 26. № 3. P. 212–215.]
- Нестеркова Д.В., Воробейчик Е.Л., Резниченко И.С.* Тяжелые металлы в пищевой цепи “почва–дождевые черви–европейский крот” в условиях загрязнения выбросами медеплавильного завода // *Сиб. экол. журн.* 2014. № 5. С. 777–788.
- Саломейна Н.В., Машак С.В.* Структурные основы материнскоплодовых отношений при химическом воздействии в эмбриогенезе // *Медицина и образование в Сибири*. 2012. № 1. С. 10–15.
- Трубина М.Р., Воробейчик Е.Л., Хантемирова Е.В.* и др. Динамика лесной растительности после снижения промышленных выбросов: быстрое восстановление или продолжение деградации? // *Докл. РАН. Сер. биол.* 2014. Т. 458. № 6. С. 721–725.
- Туникова Н.В.* Изучение размножения и возрастного состава популяций мелких млекопитающих // *Методы изучения природных очагов болезней человека*. М.: Медицина, 1964. С. 154–191.
- Шварц С.С.* Экологические закономерности эволюции. М.: Наука, 1980. 287 с.
- Amaya E., Gil F., Freire C.* et al. Placental concentrations of heavy metals in a mother-child cohort // *Environ. Res.* 2013. V. 120. P. 63–70.
- Baranowska I.* Lead and cadmium in human placentas and maternal and neonatal blood in heavily polluted area, Measured by graphite furnace atomic absorption spectrometry // *Occup. Environ. Med.* 1995. V. 51. № 1. P. 229–232.
- Benitez M.A., Mendez-Armenta M., Montes S.* et al. Mother-fetus transference of lead and cadmium in rats: involvement of metallothionein // *Histol. Histopathol.* 2009. V. 24. P. 1523–1530.
- Diaz-Barriga F., Carrizeles L., Calderon J.* et al. Measurement of placental levels of arsenic, lead and cadmium as a biomarker of exposure to mixtures, biomarkers and biomarkers as indicators of environmental change. New York: Plenum Press, 1995. P. 139–148.
- Domingo J.L.* Metal induced developmental toxicity in mammals: A review // *J. Toxic. Environ. Health: Current Issues*. 1994. V. 42. № 2. P. 123–141.
- Iyengar G.V., Rapp A.* Human placenta as a 'dual' biomarker for monitoring fetal and maternal environment with special reference to potentially toxic trace elements. Part 3: toxic trace elements in placenta and placenta as a biomarker for these elements // *Sci. Total Environ.* 2001. V. 280. P. 221–238.
- Lindsay Y., Duthie L.M., Mcardle H.* Zinc levels in the rat fetal liver are not determined by transport across the placental microvillar membrane or the fetal liver plasma membrane // *Biology of reproduction*. 1994. № 51. P. 358–365.

- Loiacono N.J., Graziano J.H., Kline J.K.* et al. Placental cadmium and birthweight in women living near a lead smelter // *Arch. Environ. Health*. 1992. V. 47. P. 250–255.
- Osman K., Akesson A., Berglund M.* et al. Toxic and essential elements in placentas of Swedish women // *Clin. Biochem*. 2000. V. 33. P. 131–138.
- Stawarz R., Formcki G., Chrobaczynska M.* et al. Accumulation of cadmium and lead in placenta and amnion of women from upper Silesian region Poland // *J. Environ. Res. and Devel*. 2011. V. 5. № 4. P. 871–879.
- Talmage S.S., Walton B.T.* Small mammals as monitors of environmental Contaminants // *Rev. Environ. Contam. Toxicol*. 1991. V. 119. P. 47–145.
- Thompson J., Bannigan J.* Cadmium: Toxic effects on the reproductive system and the embryo // *Reprod. Toxicol*. 2008. V. 25. P. 304–315.
- Truska P., Rosival L., Balazova G.* et al. Blood and placental concentrations of cadmium, lead and mercury in mother and their newborns // *J. Hyg. Epidemiol. Microbiol. Immunol*. 1989. V. 33. № 2. P. 141–147.
- Ward N.I., Watson R., Bryce-Smith D.* Placental element levels in relation to fetal development for obstetrically “normal” births: A study of 37 elements. Evidence for effects of cadmium, lead and zinc on fetal growth, and for smoking as a source of cadmium // *J. Biosoc. Res*. 1987. № 9. P. 63–81.
- Zakrzewska M.* Effect of lead on postnatal development of the bank vole (*Clethrionomis glareolus*) // *Arch. Environ. Contam. Toxicol*. 1988. № 17. P. 365–371.
- Zakrzewska M., Bialoriska D., Sawicka-Kapusta K.* Cadmium accumulation in fetus and placenta of bank voles (*Clethrionomis glareolus*) // *Bull. Environ. Cont*. 2002. № 69. P. 829–834.