

УДК 599.504.54.05

## УРОВНИ ТОКСИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИЙ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РЫЖЕЙ ПОЛЕВКИ)<sup>1</sup>

© 1995 г. С. В. Мухачева, В. С. Безель

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, г. Екатеринбург*  
Поступила в редакцию 17.10.94 г.

Изучали уровни и характер накопления тяжелых металлов Pb, Cd, Cu, Zn в органах и тканях рыжих полевок, обитающих в условиях техногенного воздействия (вблизи медеплавильного комбината) и на фоновой территории. Отмечены принципиальные различия в характере накопления физиологически чужеродных (Pb, Cd) и необходимых для нормального функционирования (Cu, Zn) элементов. Показано, что популяция рыжей полевки реагирует на техногенное загрязнение среды обитания в соответствии с эколого-функциональной спецификой составляющих ее субпопуляционных группировок.

Накопление токсических веществ природными популяциями животных вызывает теоретический и практический интерес, так как потоки токсических веществ, замкнутые через такие популяции, не только дифференцируются в соответствии с их пространственно-функциональной структурой, но и, выступая в качестве активного токсического фактора, могут модифицировать последнюю (Безель, 1987; Безель, Оленев, 1989). Выявление закономерной связи между функциональной (полово-возрастной) структурой популяции и структурированностью накапливаемых ею уровней токсических элементов способствует пониманию механизмов адаптации природных популяций к техногенному загрязнению среды обитания.

С этих позиций особый интерес представляют популяции мелких млекопитающих, популяционная структура, механизмы функционирования и устойчивость которых в настоящее время хорошо изучены.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Изучали влияние выбросов медеплавильного комбината (Средний Урал) на население рыжей полевки. Выбор ее в качестве объекта обусловлен доминирующим положением в районе исследований, а также достаточной изученностью экологии этого вида ("Европейская рыжая полевка", 1981; "Ecology of the Bank Vole", 1983). На территории России рыжая полевка традиционно используется в качестве стандартного модельного вида.

Исследования проводили в течение мая - сентября 1990 - 1994 гг. в двух зонах техногенной нагрузки: импактной (0 - 2,5 км от источника эмиссии) и буферной (2,5 - 5 км). В качестве контроля использовали территорию, находящуюся на расстоянии более 20 км от

источника воздействия. Для отлова мелких млекопитающих применяли метод ловушко-линий, ловушки выставляли в сходных биотопах линиями по 25 - 100 шт., на 4 сут, проверку которых проводили ежедневно в утренние часы. В соответствии с функциональным состоянием животных, определяемым спецификой их роста, развития и репродуктивного состояния в популяции, выделяли три функционально-возрастные группы зверьков: перезимовавшие, неполовозрелые сеголетки и половозрелые сеголетки, размножающиеся в год рождения.

Придавая особое значение оценке роли прямого токсического влияния загрязнителей на популяции животных, мы считали необходимым определить уровни поступления токсических веществ в организм зверьков. При сложном составе и пластичности пищевого рациона полевок наиболее правильным, на наш взгляд, было определять уровни токсических элементов в содержимом желудков зверьков.

Среди широкого спектра тяжелых металлов, аэрозоли которых поступают в атмосферу и загрязняют природную среду, мы остановились на наиболее приоритетных в наших условиях - меди, цинке, свинце и кадмии. Если первые два относятся к физиологически необходимым элементам, то свинец и кадмий являются типичными токсикантами, негативное влияние которых на млекопитающих широко известно.

Выбор тканей животных, взятых на анализ, определялся преимущественным депонированием в них токсикантов: свинца - в скелете, кадмия - в печени и почках (Ершов, Плетнева, 1989). Содержание свинца, кадмия, меди и цинка в скелете, печени, почках и содержимом желудка отловленных животных определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Проанализирован 1161 образец, в том числе 479 - скелета, 350 - печени, 263 - почек, 69 - содержимого желудков. Математическую обработку материалов проводили общепринятыми методами.

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-04-12866-а).

**Таблица 1.** Уровни накопления тяжелых металлов (мкг/г сухого веса) в содержимом желудка рыжих полевок, отловленных в разных зонах техногенной нагрузки, и суммарная токсическая нагрузка (отн. ед.)

Металл	Зона техногенной нагрузки		
	контрольная (n = 16)	буферная (n = 33)	импактная (n = 20)
Cd	0.880 + 0.201	2.297 + 0.309	4.735 + 0.844
Pb	8.354 + 1.966	15.164 + 1.750	16.023 + 2.323
Cu	12.827 + 1.008	56.508 + 5.630	115.318 + 17.022
Zn	107.056 + 20.531	135.271 + 22.667	230.954 + 30.934
$S_n$	1	2.36	4.61

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Большинство авторов при оценке меры токсической нагрузки на млекопитающих пользуется данными по содержанию токсических элементов в объектах внешней среды. Однако пространственные перемещения мелких млекопитающих по территории и разнообразие их растительного рациона не позволяют адекватно оценить поступление в организм полевок токсических элементов по их содержанию в растительных объектах. В качестве интегральной оценки уровня загрязненности среды обитания, обуславливающей поступление токсикантов в организмы зверьков, нами принята их концентрация в содержимом желудков (токсическая нагрузка).

Естественные рационы животных с участков, подверженных интенсивному техногенному воздействию, характеризуются более высокими концентрациями тяжелых металлов по сравнению с фоновыми. Так, данные анализы содержимого желудков полевок с разных участков (табл. 1) показывают, что имеет место превышение концентраций по свинцу в 1.2 - 1.9 раза, по цинку – в 1.2 - 2.2 раза, по кадмию – в 2.6 - 5.4 раза, по меди – в 4.4 - 9 раз (для буферной и импактной зон соответственно).

Перечисленные элементы не исчерпывают полный перечень токсикантов, поступающих с пищевым рационом. Учитывая возможное сочетанное влияние всего спектра загрязнителей, определяемые элементы следует рассматривать в качестве маркеров общей токсической нагрузки на животных, которая представлена в каждой зоне как

$$S_n = \frac{1}{n} \sum \frac{C_{ij}}{C_{if}}$$

где суммирование ведется по  $n$  элементам,  $C_{ij}$  – концентрация  $i$ -элемента в  $j$ -зоне, а  $C_{if}$  – фоновая концентрация  $i$ -элемента в содержимом желудочно-кишечного тракта. В градиенте загрязнения суммарная токсическая нагрузка  $S_n$  на животных возрастает в 2.36 и 4.61 раза для буферной и импактной зон соответственно (табл. 1). Тенденция к увеличению концентрации загрязнителей при возрастании токсической нагрузки прослеживается для животных всех функционально-возрастных групп (табл. 2).

Концентрация меди и цинка в печени не зависит от места отлова зверьков, тогда как уровни их на-

копления в скелете рыжих полевок, обитающих на фоновом участке, были ниже, чем у животных с нарушенных территорий. Максимальные концентрации кадмия обнаружены в почках полевок, обитающих в зонах, подверженных техногенному воздействию. Они достоверно выше уровней накопления этого токсиканта в почках зверьков фоновых территорий (см. табл. 2). Аналогичная картина отмечена и для кадмия, депонирующегося в печени, однако его содержание в этом органе ниже, чем в почках.

Свинец, поступающий в организм, депонируется главным образом в костной ткани (Ершов, Плетнева, 1989). Максимальные концентрации элемента обнаружены нами в скелете рыжих полевок, обитающих на территории, непосредственно прилегающей к источнику эмиссии. Они достоверно выше уровней накопления этого токсиканта в скелете зверьков с фоновых участков.

**Накопление физиологически необходимых и токсических элементов в организмах рыжих полевок.** Факт повышения уровня токсических элементов по мере возрастания загрязненности среды обитания очевиден. Обратим внимание на различия в уровнях физиологически необходимых элементов (цинка и меди) по сравнению с токсическими (свинцом и кадмием). Рассмотрим это на примере перезимовавших животных (рис. 1). Так, увеличение содержания меди в рационе зверьков из буферной зоны в 4.4 раза, импактной зоны – в 9 раз, а также цинка в 1.2 и 2.2 раза (соответственно) практически не привело к возрастанию уровня этих элементов в тканях животных (скелет, печень). Здесь мы имеем дело с естественным биологическим барьером на уровне желудочно-кишечного тракта, обеспечивающим внутренний гомеостаз физиологически необходимых цинка и меди. Вероятно, содержание этих элементов в рационах, достигающее в среднем 135.3 - 230.9 мкг/г сухого веса для цинка и 56.5 - 115.3 мкг/г сухого веса для меди, не столь велико, чтобы преодолеть барьеры, вызывая повышение уровней этих элементов в тканях.

Иначе обстоит дело с токсическими элементами (свинцом и кадмием). Увеличение концентрации свинца в рационах полевок из буферной зоны в 1.2 раза и импактной зоны – в 1.9 раза, а кадмия соответственно в 2.6 и 5.4 раза приводит к существенному повышению их уровня в изученных тканях (см. рис. 1). Отсутствие по отношению к этим элементам физиологических барьеров обуславливает их свободное поступление через стенки желудочно-кишечного тракта и объясняет повышенные их уровни в тканях животных.

**Депонирование токсикантов в организмах рыжих полевок различных функционально-возрастных групп.** Поскольку обменные процессы, прежде всего энергетические, у мелких млекопитающих обеспечиваются за счет пищевых рационов, то и поступление токсических элементов в организмы зверьков должно коррелировать с уровнем энергетических затрат. С этих позиций обнаруженные

**Таблица 2.** Уровни накопления тяжелых металлов в скелете, печени и почках рыжих полевок, отловленных в разных зонах техногенной нагрузки, мкг/г сухого веса

Возрастная группа	Зона техногенной нагрузки		
	контрольная	буферная	импактная
Свинец в скелете			
ПЗ	12.735 + 1.439 (37)	42.696 + 5.071 (39)	66.004 + 7.497 (20)
ПС	20.270 + 3.108 (30)	48.031 + 4.019 (45)	57.931 + 5.473 (36)
НС	19.476 + 1.528 (146)	36.916 + 2.144 (99)	50.780 + 6.120 (27)
Кадмий в печени			
ПЗ	1.683 + 0.188 (41)	6.247 + 1.129 (18)	9.635 + 2.221 (8)
ПС	1.974 + 0.494 (26)	6.254 + 1.096 (39)	6.704 + 1.624 (15)
НС	1.252 + 0.121 (125)	7.641 + 0.487 (63)	6.089 + 0.964 (15)
Кадмий в почках			
ПЗ	10.884 + 0.899 (24)	35.973 + 3.284 (37)	55.690 + 9.517 (9)
ПС	7.199 + 1.335 (10)	34.035 + 6.215 (9)	22.643 + 3.113 (11)
НС	3.062 + 0.274 (85)	22.865 + 2.172 (64)	24.340 + 3.541 (14)

Примечание. ПЗ – перезимовавшие; ПС – половозрелые сеголетки, размножившиеся в год рождения; НС – неполовозрелые сеголетки. В скобках приведен объем выборки.

нами повышенные уровни свинца в скелете самок всех возрастных групп, вероятно, отражают их общие, более высокие энергетические затраты, связанные с участием в размножении. Так, на рис. 2 представлены данные по накоплению свинца в скелете перезимовавших зверьков в градиенте техногенной нагрузки. Возможно, что пониженные уровни элементов, отмеченные у самцов, объясняются еще и спецификой их территориального поведения. В отличие от самок, ведущих преимущественно оседлый образ жизни, особенно в период беременности и выкармливания потомства, самцы активно перемещаются по территории. Это значит, что в наших выборках животных из импактной зоны могут присутствовать самцы-мигранты со смежных менее загрязненных участков, что, естественно, снижает средние концентрации этого элемента в выборках самцов.

Из литературы известно, что в условиях хронического воздействия рассматриваемые токсиканты имеют тенденцию накапливаться с возрастом в органах-депо в больших количествах (см., например, Безель, 1987). Логично поэтому ожидать, что максимальные уровни изученных тяжелых металлов будут обнаружены в органах и тканях перезимовавших животных (особенно это касается свинца в метаболически инертном скелете). Повышенные концентрации токсикантов, по нашему мнению, можно было бы ожидать и в организмах половозрелых сеголетков, характеризующихся более высоким по сравнению с неполовозрелыми прибылыми особями уровнем энергетических затрат.

Действительно, наши предположения подтверждают данные о содержании интересующих нас тяжелых металлов в органах и тканях у зверьков, обитающих в зоне максимального загрязнения, когда у полевок первых двух групп отмеченные уровни токсикантов в 1.1 - 2.3 раза выше, чем у неполовозрелых животных (см. табл. 2). Аналогичная картина наблюдалась и для кадмия, концентрирующегося в поч-

ках рыжих полевок, обитающих в буферной и контрольной зонах (превышение составило 1.5 - 3.6 раза).

Иной эффект отмечен по уровням накопления свинца в скелете и кадмия в печени у животных, обитающих в зоне слабого загрязнения и на фоновой территории. Так, на фоновой территории свинца в скелете неполовозрелых прибылых зверьков содержалось в 1.1 раза, а перезимовавших – в 1.6 раза меньше, чем у половозрелых особей (для буферной зоны соответственно в 1.04 и 1.3 раза). Наблюдаемую картину вряд ли можно объяснить токсическим действием поллютантов при низких фоновых концентрациях загрязнителей. Нам представляется важным, что основной экотоксический эффект, связанный с накоплением свинца в скелете, обусловлен не столько обусуждаемыми различиями уровней этого элемента на фоновой территории, сколько динамикой его накопления в градиенте техногенной нагрузки. Так, у перезимовавших зверьков содержание свинца в скелете при переходе от контрольной зоны к импактной увеличивается более чем в 5 раз, у половозрелых прибылых особей – в 2.9 раза, у неполовозрелых животных – в 2.6 раза (рис. 3а).



**Рис. 1.** Накопление тяжелых металлов у перезимовавших рыжих полевок: 1 – медь в печени; 2 – цинк в печени; 3 – свинец в скелете; кадмий в почках; 4 – кадмий в печени.

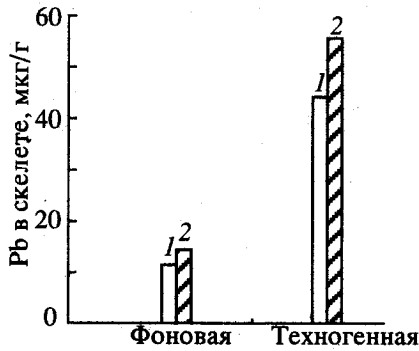


Рис. 2. Накопление свинца в скелете самцов (1) и самок (2) перезимовавших рыжих полевок в градиенте токсической нагрузки.

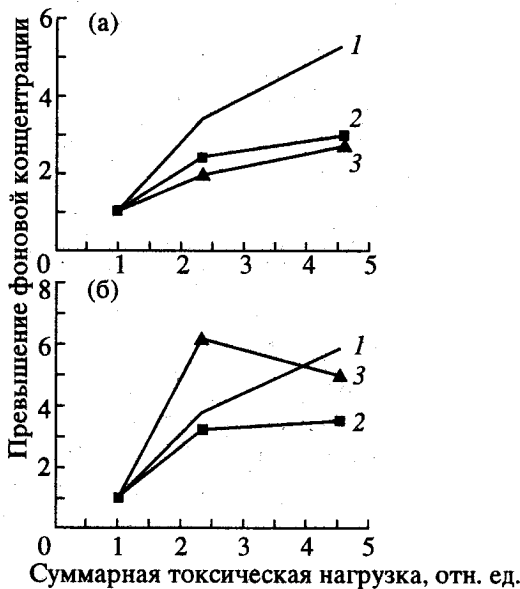


Рис. 3. Накопление свинца в скелете (а) и кадмия в печени (б) рыжих полевок разных функционально-возрастных групп:

1 – перезимовавшие животные; 2 – половозрелые сеголетки; 3 – неполовозрелые сеголетки.

Аналогичная картина в градиенте техногенной нагрузки отмечена и для кадмия, накапливающегося в печени (рис. 3б). У сеголетков (половозрелых и неполовозрелых), обитающих на загрязненных участках, отмечены сходные концентрации этого элемента, которые в 3.2 - 3.3 раза больше, чем у половозрелых прибылых особей фоновых территорий, и в 4.9 - 6.1 раза – у неполовозрелых зверьков. У перезимовавших животных также отмечено почти 6-кратное увеличение концентрации кадмия по мере возрастания техногенной нагрузки.

Можно ожидать, что любое токсическое воздействие реализуется в популяционных выборках через возросшую вариабельность функциональных показателей животных, в том числе вариабельность уровней накапливаемых металлов. Если уровни токсикантов у животных, обитающих на территориях, подверженных техногенному

воздействию, вызывают повышенную смертность в период зимовки, то эффект “сита”, обуславливающего гибель наиболее “отравленных” зверьков, должен приводить к снижению вариабельности уровней депонирования токсикантов в организмах перезимовавших особей по сравнению с выборками животных, уходящих в зиму.

Рассмотрим с этих позиций накопление свинца в скелете полевок, обитающих в зоне максимального загрязнения. Прямым указанием на дискриминацию зверьков, приводящую к “отсеканию” в течение зимовки зверьков с максимальными уровнями свинца, является уменьшение коэффициента вариации у перезимовавших особей (51%) по сравнению с половозрелыми сеголетками (57%) и неполовозрелыми зверьками (63%).

Таким представляется нам один из возможных механизмов влияния техногенного загрязнения на демографическую структуру популяции. В силу неблагоприятного влияния токсических факторов смертность животных в зонах промышленного загрязнения существенно повышена. Поскольку на загрязненных территориях создается своеобразный демографический вакуум, это может привести к интенсификации процессов воспроизводства у сохранившейся части населения мелких млекопитающих. Воспроизводство животных на техногенных участках увеличивается за счет возрастания скорости созревания сеголеток в 2.5 раза. Достоверных отличий в плодовитости самок в градиенте техногенной нагрузки нами не отмечено.

Таким образом, природные популяции мелких млекопитающих реагируют на техногенное загрязнение среды обитания в соответствии с эколого-функциональной спецификой составляющих ее субпопуляционных группировок. Это выражается прежде всего в дифференциации уровней токсикантов, накапливаемых отдельными группами животных. Следствием такой гетерогенности является избирательная элиминация из популяции особей с максимальными уровнями загрязнителей, что в свою очередь ведет к деформации демографической структуры и изменению ряда важнейших популяционных характеристик. Отмеченные изменения следует рассматривать в качестве необходимой адаптационной перестройки популяции в ответ на экстремальные условия среды обитания, создаваемые ее техногенным загрязнением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безель В.С. Популяционная экотоксикология млекопитающих. М.: Наука, 1987. 127 с.  
 Безель В.С., Оленев Г.В. Внутрипопуляционная структура грызунов в условиях техногенного загрязнения среды обитания // Экология. 1989. № 3. С. 40 - 45.  
 Европейская рыжая полевка. М.: Наука, 1981. 352 с.  
 Еришов Ю.А., Плетнева Т.В. Механизмы токсического действия неорганических соединений. М.: Медицина, 1989. 272 с.  
 Ecology of the Bank Vole // Acta Theriologica. 1983. V. 28. Suppl. 1. 242 p.