АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИИ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ

На правах рукописи
УДК 574.3 : 614.7

БЕЗЕЛЬ Виктор Сергеевич

ПОПУЛЯЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТОКСИКОЛОГИИ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

03.00.16 экология
14.00.07 гигиена

Автореферат диссертации на
соискание ученой степени
доктора биологических наук

Свердловск - 1987

Работа выполнена в лаборатории количественной экологии
Института экологии растений и животных
Уральского научного центра АН СССР.

Официальные оппоненты:

доктор биологических наук, профессор Ивантер Э.В.
доктор биологических наук, профессор Сюзюмова Л.М.
доктор биологических наук Селянкина К.П.

Ведущая организация – Институт эволюционной морфологии и экологии животных им. А.Н.Северцова.

Защита состоится "24" XI 1987 г. в 14 часов на заседании специализированного совета Д 002.05.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте экологии растений и животных Уральского научного центра АН СССР (620008, Свердловск, ул. 8 Марта, 202)

...иться в библиотеке
...животных УНЦ АН СССР

...лан "20" X 1987 г.

Нифонтова М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный этап развития производительных сил общества и его социальное развитие характеризуется невиданными масштабами антропогенного преобразования биосферы (Вернадский,1980). По мнению ведущих советских ученых подобное воздействие на природную среду следует рассматривать как явление прогрессивное для человечества и биосферы в целом, а связанное с этим техногенное загрязнение, приводящее к ухудшению качества природной среды и нарушению экологического равновесия, является лишь результатом ошибок, просчетов или временных решений конкретной технической политики (Шварц,1976; Израэль,1984).

В центре настоящего исследования находятся проблемы, связанные с оценкой уровней накопления техногенных элементов и их влиянием на природные популяции млекопитающих, что соответствует новому направлению общей экологии, определяемому как экологическая токсикология (см., например, Криволуцкий, 1985).

Принципиально важным является популяционный характер выполненного исследования. Согласно С.С.Шварцу, связанное с техногенным загрязнением среды вымирание отдельных видов организмов часто происходит не в результате непосредственной гибели особей, а вследствие необратимых изменений популяционной структуры.

Именно популяционные механизмы играют определяющую роль в поддержании жизнеспособности природных популяций. Мы подробно обсуждаем особенности накопления токсических элементов отдельными субпопуляционными группировками животных, обусловленные их эколого-физиологической специфичностью.

Своеобразием выполненной работы является широкое использование медико-биологической информации. Организменный уровень подобных исследований должен рассматриваться в качестве экспериментальной и теоретической основы для перехода к популяционному уровню накопления и токсического действия загрязнителей.

Таким образом, сочетание основ популяционной экологии с основными принципами и подходами теоретической токсикологии и гигиены при оценке последствий техногенного загрязнения природных популяций животных – такова теоретическая и методическая основа выполненной работы.

Подобная постановка проблемы актуальна в теоретическом плане. Обширный эмпирический материал по обмену и токсичности большинства техногенных элементов у млекопитающих на организменном

уровне, с одной стороны, и полученная информация об особенностях накопления загрязнителей животными из природных популяций - все это позволяет сформулировать принципы экстраполяции с организменного уровня на популяционный. Разрабатываемую в диссертации проблему экстраполяции закономерностей накопления и токсического действия загрязнителей с организменного на популяционный уровень следует рассматривать не только в качестве теоретической и методической основы теории популяционной экотоксикологии, но и как дополнительный вклад в развитие общей теории функционирования природных сообществ млекопитающих.

Проблема актуальна с практической точки зрения. В настоящее время не приходится рассчитывать на организацию детальных токсикологических исследований по каждому из многочисленных загрязнителей природной среды. В связи с этим особую значимость приобретают общие методические подходы, позволяющие при минимальной информации о метаболических свойствах и токсичности предвидеть возможные последствия для популяции техногенного загрязнения. Методические подходы популяционной экотоксикологии млекопитающих, отработанные на наиболее изученных с токсикологической точки зрения элементах (ртуть, свинец, цинк) применительно к общепринятым биологическим объектам, позволяют сформулировать общие принципы популяционных оценок меры токсического воздействия и состояния природных популяций.

Цель и задачи исследования. В центре обсуждаемых вопросов стоит анализ закономерностей накопления приоритетных техногенных загрязнителей у млекопитающих на организменном и популяционном уровнях с целью решения проблемы оценки и прогноза состояния природных популяций мелких млекопитающих, обитающих в условиях загрязнения среды обитания токсическими элементами, а также проблемы популяционного подхода к оценке накопления и последствий воздействия загрязнителей на человека (на примере свинца и ртути). Последовательно были решены следующие задачи:

I. Проведен анализ содержания токсических элементов у полевок нескольких видов, обитающих при различных уровнях элементов во внешней среде. Вскрыты возможные эколого-физиологические факторы, определяющие гетерогенность природных популяций с точки зрения поступления и накопления токсических элементов различными функциональными и пространственными группами животных.

2. В соответствии с принципами системного анализа дана формулировка основных понятий популяционного подхода к оценке меры токсического воздействия и ответа популяции мелких млекопитающих на техногенное загрязнение среды обитания.

3. Рассматривая собственные и литературные данные, полученные на лабораторных животных, в качестве исходного эмпирического материала, отражающего организменный уровень обмена токсических элементов, предложены математические модели этих процессов для важнейших загрязнителей среды. Проверена адекватность моделей для режимов, близких к условиям существования природных популяций.

4. Предложены принципы экстраполяции основных токсикокинетических показателей (параметров моделей) и показателей токсичности изучаемых элементов с лабораторных животных (организменный уровень) на мелких млекопитающих из природных экосистем. Полученные эмпирические данные по содержанию элементов у грызунов в природных популяциях использованы для проверки адекватности предлагаемой экстраполяции с организменного уровня на популяционный.

5. Рассматривая долю "пораженных" особей в качестве характеристики состояния природных популяций, оценено возможное влияние техногенного загрязнения на популяционную динамику численности. Проанализирован вклад животных различных генераций в оценку общего "поражения" популяции.

6. Показана роль пространственной неоднородности загрязнения территории и пространственной гетерогенности среды обитания животных в поддержании стабильности природных популяций мелких млекопитающих. Для этого использованы имитационные модели динамики численности этих животных.

7. Рассмотрена специфика накопления токсических элементов высшими трофическими уровнями наземных экосистем. Оценена роль физиологических и физико-химических факторов в концентрировании техногенных элементов в трофических цепях.

8. Рассмотрена возможность популяционного подхода к человеку при оценке последствий поступления к нему повышенных количеств токсических элементов. Для этих целей использованы лабораторно-клинические данные по обследованию лиц, профессионально контактирующих с повышенными уровнями загрязнителей.

Научная новизна работы. Широко публикуемые данные по накоплению токсических элементов млекопитающими, в том числе мелкими грызунами, носят фрагментарный характер, выполнены в различных природно-климатических зонах, для многочисленных видов животных.

Приводимые авторами средние содержания элементов в организмах животных по сути представляют оценку меры токсического действия на среднюю особь в выборке. Учет гетерогенности популяции по накапливаемым уровням и вариабельности этого показателя для отдельных функциональных ее группировок могут рассматриваться в качестве популяционной меры токсического воздействия.

Определяемый в единичных работах процент животных в популяции, у которых обнаружены отклонения в функционировании тех или иных систем организма, не связан с особенностью ее пространственно-функциональных группировок и не отражает ее состояние как биологической системы. Предлагаемый в диссертации учет гетерогенности популяции по накапливаемым уровням загрязнителей и определяемое этим различие доли "пораженных" животных непосредственно связано с особенностями функционирования природных популяций (динамика численности, половая и возрастная структуры). Это позволяет рассматривать вводимую долю "пораженных" особей в качестве популяционной оценки состояния популяции.

Лишь в единичных случаях делались попытки прямого сопоставления действующих доз элементов для лабораторных животных и грызунов из природных популяций. Впервые предложена теория экстраполяции с организменного уровня на популяционный закономерностей обмена и накопления токсических элементов, позволяющая выделить ведущие факторы внутренней среды организма и экологии вида, контролирующие эти процессы в природных популяциях.

Впервые предпринимается попытка количественного анализа роли разнокачественности мест обитания животных и неоднородности полей загрязнения для судьбы популяции, выполненного методами моделирования динамики численности.

В рамках современных санитарно-гигиенических исследований обсуждается возможность оценки частоты проявления признаков заболевания у отдельных групп населения, связанных с воздействием токсических агентов. Однако в известных нам публикациях отсутствуют методы количественного учета и прогноза ожидаемой частоты признаков поражения при изменении условий и уровней токсического воздействия на человека. Впервые предложен основанный на математических моделях популяционный подход к оценке влияния на человека повышенных уровней токсических элементов в окружающей среде и продуктах питания.

Таким образом, настоящая диссертационная работа является самостоятельным и актуальным исследованием проблемы накопления и токсического действия техногенных элементов на природные популяции животных и человека.

Автор выносит на защиту следующее:

I. Популяционный подход к проблемам техногенного загрязнения природных популяций млекопитающих может быть реализован через меру токсического воздействия, учитывающую особенности накопления токсических элементов отдельными пространственно-функциональными группировками. В качестве подобной меры, отражающей структурированность популяции по содержанию элементов и имеющей интегральный характер, предложено рассматривать спектр концентраций токсических элементов в организмах животных, выраженный логнормальным законом распределения.

2. Общую теорию экстраполяции закономерностей накопления и токсического действия поллютантов с организменного уровня на популяционный, построенную на основе разработанных автором для мелких млекопитающих математических моделей обмена токсических элементов. Экстраполяция предполагает учет важнейших экологических и физиологических факторов, определяющих накопление токсических элементов животными из природных популяций (состав рационов, удельное количество потребляемого корма, возрастная динамика и половая специфика обмена токсических элементов).

3. Состояние природных популяций мелких млекопитающих, обитающих в условиях техногенного загрязнения, может быть выражено через долю "пораженных" животных, содержание токсических элементов в организмах которых превышает некоторый критический уровень, определяемый по данным токсикологических экспериментов. Популяционный характер подобных оценок определяется структурированностью уровней загрязнителя, накапливаемых отдельными внутрипопуляционными группировками.

4. Пространственная разнокачественность мест обитания животных и неоднородность полей загрязнения являются важнейшими факторами, определяющими динамику численности популяции в условиях загрязнения. Принадлежность животных различным сезонным генерациям определяет величину их вклада в общее "поражение" популяции при подъеме и депрессии ее численности.

5. В биоконцентрировании техногенных загрязнителей трофическими уровнями природных экосистем определяющую роль играют уровни

абсорбции токсических элементов в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) животных хищников и особенности распределения поллютантов по тканям животных-жертв.

6. Обоснование необходимости и возможности популяционного подхода к оценке накопления и токсического влияния поллютантов на человека.

Практическое использование результатов работы.

I. Экспозиция "Общество и природа - разумное управление биосферными процессами" на ВДНХ СССР. Серебряная медаль (уд.№I5898).

2. Предложена методика оценки экологического ущерба, наносимого выбросами ртути в атмосферу, включенная, согласно Постановлению Госплана СССР, Госстроя СССР и Президиума АН СССР от 2I октября I983 г. за № 254/284/I34, во "Временную методику определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды".

3. Материалы использованы в методических указаниях "Клиника, диагностика, лечение, вопросы экспертизы трудоспособности и профилактика свинцовых интоксикаций", утвержденных Начальником Главного Управления Лечпомощи МЗ СССР от 09.I2.I985 г. за № I0-II/I44 (совместно с НИИ гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР).

4. Материалы вошли в методические рекомендации "Постановка экспериментальных исследований по изучению комбинированного действия химических веществ с целью разработки профилактических мероприятий", утвержденные МЗ СССР за № 4050 от 06.I2.I985 г. (совместно со Свердловским НИИ гигиены труда и профзаболеваний).

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Всесоюзном симпозиуме "Методы определения содержания р.а. изотопов в организме человека"(Ленинград,I973), Всесоюзной конференции по математической теории биологических процессов (Калининград,I976), I и II Радиобиологических конференциях социалистических стран (ЧССР,I974; БНР,I978), III Международном симпозиуме по метаболизму р.а.элементов в организмах животных и человека (ФРГ, I977), VIII Всесоюзной конференции по биологической роли микроэлементов (Ивано-Франковск,I978), I, II и III Всесоюзных совещаниях по ядерно-физическим методам анализа окружающей среды (Ташкент,I979; Рига,I982; Томск,I985), Международной конференции по ксенобиотикам в индустриальной и окружающей среде (Прага,I980), Всесоюзном совещании "Проблемы фитогигиены и охрана окружающей

среды" (Ленинград,I980), VI Всесоюзной конференции по экологической физиологии (Сыктывкар,I982), I Всесоюзном совещании по антропогенному загрязнению природной среды (Пущино,I983), Всесоюзной школе "Влияние промышленных предприятий на окружающую среду" (Звенигород,I984), IV Всесоюзном съезде териологического общества (Москва,I986), Всесоюзном совещании "Экологичиские механизмы преобразования популяций животных при антропогенных воздействиях (Свердловск,I986).

Диссертационная работа доложена на объединенном коллоквиуме ряда лабораторий Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А.Н.Северцева АН СССР (апрель I986 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 42 статьи. Основные результаты изложены в монографии автора "Популяционная экотоксикология млекопитающих" (Изд-во"Наука", I987).

Структура и объем диссертации. Работа имеет 298 страниц основного текста, 79 таблиц, 60 рисунков. Она включает введение, шесть глав, заключение, выводы и список цитированной литературы, содержащий 487 работ.

Глава I. Особенности накопления токсических элементов млекопитающими в природных популяциях.

В результате анализа собственных и литературных данных показано, что уровни токсических элементов в организмах мелких млекопитающих коррелируют с содержанием загрязнителей в объектах внешней среды. Это обстоятельство при неизбежной неравномерности загрязнения территории и высокой подвижности мелких млекопитающих существенно усложняет выделение ведущих физиологических и экологических факторов, контролирующих накопление токсических элементов животными из природных популяций.

Нами изучены уровни некоторых токсических элементов в организмах нескольких видов полевок, обитающих на Южном Урале (горный массив Иремель) и на участках горного пояса, принадлежащего металлогенической провинции Северного Урала (р-он р.Укью). Выбранные пять участков можно рассматривать в качестве отдельных геохимических провинций, отличающихся содержанием свинца в почвах и растительности. Уровни цинка на всех участках практически совпадают. Основным объектом наших исследований были красные полевки (Clethrionomys rutilus), а также рыжие (Cl. glareolus), красносерые (Cl. rufocamus), обыкновенные (Microtus arvalis), пашенные (M. agrestis). Животных добывали давилками Геро или

стандартными живоловками. Определение концентраций элементов в очищенных костных или мягких тканях проводили методом атомно-адсорбционного анализа на приборе типа "Перкин-Элъмар-403".

Дисперсионный анализ данных по накоплению свинца мелкими грызунами показал наличие видовых различий. Максимальные уровни элемента наблюдали у красных полевок (до I7 мкг/г на участке С-4), меньше - у рыжих и красносерых (до 3.6 мкг/г там же), минимальные уровни у зеленоядных видов (обыкновенная и пашенная).

Анализ содержания свинца и цинка в растительных объектах и определение пищевой предпочтительности отдельных видов растительности позволил установить среднее содержание элементов в рационах животных разных видов (полученные оценки сопоставлены с данными по прямому определению концентрации элементов в содержимом ЖКТ зверьков). Показано, что видовые различия в накоплении свинца могут быть обусловлены содержанием элемента в рационах.

Анализ наполненности ЖКТ зверьков позволил установить ежедневное поступление элементов в организмы полевок разного пола и возраста. Этот показатель у красных полевок изменялся для свинца от 4 мкг/сут (неполовозрелые самки на Южном Урале) до 26 мкг/сут (самцы на одном из участков Северного Урала).

По состоянию репродуктивных органов животных подразделяли на половозрелых и неполовозрелых. Дисперсионный анализ полученных данных позволил установить достоверные возрастные различия в содержании элементов в скелетах полевок. Низкие уровни свинца у неполовозрелых зверьков (не превышающие 9 мкг/г на участке С-4) по сравнению с половозрелыми (до I7 мкг/г там же) обусловлены спецификой метаболизма остеотропных элементов в костной ткани в онтогенезе. Ограниченная проницаемость плацентарного барьера обуславливает низкие уровни поллютантов в процессе кальцификации костной ткани плода. В постнатальный период идет интенсивное накопление загрязнителей, достигающее максимума у половозрелых. Половые различия наиболее выражены у половозрелых животных (достоверно более высокие уровни у самцов). Мы не располагаем информацией, позволяющей однозначно судить о причинах подобных различий. Проведенные оценки наполненности ЖКТ зверьков позволили предположить, что пищевые потребности, видовой состав рационов и удельное количество потребляемого корма могут явиться ведущими факторами, определяющими различия в уровнях элементов в скелетах полевок разного пола. Подробный статистический анализ показал,

что содержание свинца и цинка в скелетах полевок может быть описано логнормальным законом распределения концентраций.

Предложено рассматривать в качестве популяционной меры токсического воздействия распределение концентраций элементов в тканях или органах животных, относящихся к различным субпопуляционным группировкам, и в популяции в целом. Вводимый показатель носит популяционный характер, поскольку отражает внутреннюю структурированность популяции, представляя совокупность распределений содержаний элементов в отдельных, выделяемых нами половых, возрастных и сезонных группировках животных (в том числе принадлежащих различным генерациям). В то же время этот показатель, характеризуя интегральное содержание поллютантов в популяции, позволяет рассматривать ее в качестве единого биологического объекта, подверженного внешнему токсическому воздействию. Очевидна прямая связь меры токсического воздействия с важнейшими популяционными параметрами, контролирующими динамику численности. Изменение внешних условий существования, приводящие к изменению ее половой и возрастной структуры, определяет и вклад каждой группировки в распределение концентраций элементов у животных в популяции, т.е. влияе на меру токсического воздействия.

Количественная и качественная обоснованность роли выделенных нами физиологических и экологических факторов в накоплении загрязнителей мелкими млекопитающими из природных популяций может быть проверена при экстраполяции закономерностей обмена токсических элементов, установленных на организменном уровне, на условия существования популяций в природе.

Глава II. Системный подход к проблемам экологической токсикологии млекопитающих.

Глава посвящена обоснованию применяемых методов и методик исследования. Особенности накопления токсических элементов животными из природных популяций могут быть выявлены при экстраполяции этих процессов с организменного уровня на популяционный при учете возможной роли ведущих эколого-физиологических факторов (пищевые рационы, специфика обмена токсических элементов у животных отдельных субпопуляционных группировок и т.д.).

Показано, что последовательное применение принципов системного анализа при исследовании обмена токсических элементов на уровне организма выражается в представлении его в виде совокупности отдельных камер, соединенных потоками вещества и имитирующих ки-

нетические свойства элемента в отдельных органах и тканях. Рассмотрение подобной структурированной модели в качестве единой биологической системы может быть реализовано при создании математической модели обмена токсических элементов. При этом подразумевается последовательное решение следующих задач:

I. Формулировка концептуальной модели, отражающей основные закономерности изучаемых процессов. Выделение основных блоков модели (камер) и потоков элемента между ними.

2. Этап идентификации модели, в результате которого по эмпирическими данным определяют числовые значения констант переноса и их стандартные отклонения. Под исходным материалом понимается совокупность данных использованных при идентификации модели.

3. Этап верификации, при котором проводится проверка адекватности модели в условиях и режимах, не использованных ранее.

Математические модели представляют собой системы обыкновенных линейных уравнений с постоянными коэффициентами

$$\dot{q}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} K_{i,j} q_j - \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} K_{j,i} q_i + P_i$$

где q_i – содержание токсических элементов в i-камере; $\dot{q}_i$ – производная этой величины по времени; $K_{i,j}$ – константы переноса элемента из j-камеры в i-ую; P_i – поступление токсических элементов в i-ую камеру извне; N – число камер модели.

Предложен метод непосредственного (без предварительного аналитического решения системы уравнений) определения параметров моделей, основанный на последовательном применении метода случайного поиска и метода последовательных приближений Ньютона Гаусса (Попов, Безель, I974; I983). Конкретная реализация этого метода выполнена в виде машинной программы COMPAR, позволяющей находить по исходной совокупности эмпирической информации численные значения $K_{i,j}$ и их вариабельность S_K.

Проблема экстраполяции основных закономерностей обмена и токсического действия загрязнителей с организменного уровня на природные популяции животных требует применения стохастических моделей обмена. Непостоянство внешней среды и особенности экологии животных в сочетании с индивидуальной изменчивостью обменных свойств организмов, составляющих популяцию,- все это обуславливает стохастический характер накапливаемых уровней загрязнителей. Стохастические методы моделирования оказываются в этом случае наиболее адекватными реальным процессам накопления токсических элементов животными из природных популяций.

При имитации конкретных условий существования популяций рандомизация модели осуществляется не на каждом шаге интегрирования, а путем случайного выбора значений констант переноса и величины суточного поступления токсического элемента в организмы животных, согласно предварительно определенным вероятностным распределениям $K_{i,j}$ и P_i. Последующее решение уравнений, описывающих модель, проводили при постоянных значениях параметров. Многократное повторение таких решений позволяет получить выборку случайных траекторий, описывающих накопление токсического элемента в камерах модели, статистическая обработка которых дает среднее и дисперсию содержания в каждой камере для любого момента времени. Предложены и обоснованы статистические критерии согласия, определяющие наряду с критериями хи-квадрат, Фишера, Колмогорова- Смирнова и Мизеса меру адекватности модельного прогноза реальным системам.

Обосновано применение радиоактивных изотопов в качестве основного экспериментального метода анализа токсикокинетики изучаемых элементов в организмах лабораторных животных и полевок.

Глава III. Обмен токсических элементов в организмах млекопитающих (лабораторный эксперимент и моделирование). Имитация условий существования природных популяций.

В настоящей главе на примере ртути, свинца и цинка подробно рассмотрен обмен токсических элементов в животном организме и возможность математического моделирования этих процессов.

Показано, что обмен неорганических соединений ртути и ее паров может быть описан 4-х камерной моделью с выделением в качестве основных депонирующих органов: кровь и межклеточные жидкости, почки (быстро и медленно обменивающиеся пулы элемента) и прочие ткани, элемент содержащийся в которых объединен в общую камеру.

Предложена модификация исходной модели для описания обмена и трансформации в организме органических соединений ртути.

Определение числовых значений констант переноса выполнено по собственным экспериментальным данным, полученным на лабораторных

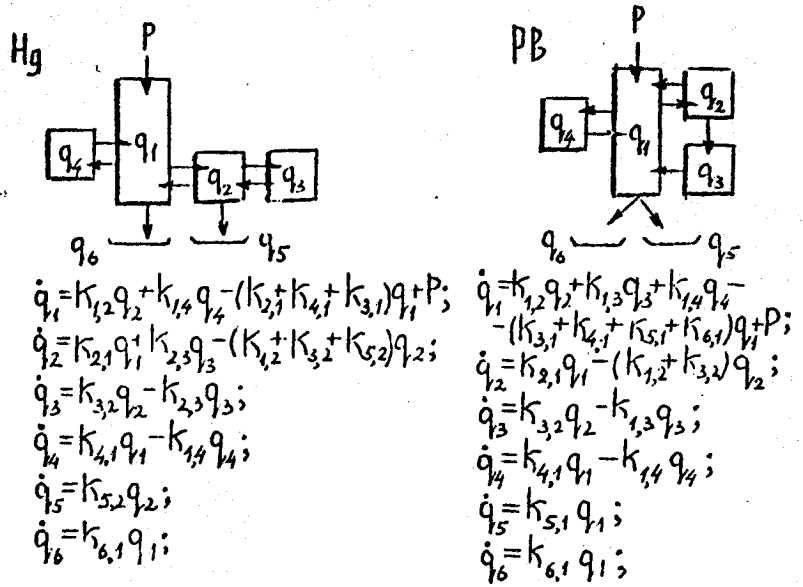

Рис.I Модели обмена ртути и свинца в животном организме и соответствующие системы уравнений.
q_1 - элемент, содержащийся в крови и межклеточных жидкостях, q_2 и q_3 - элемент в почках (для ртути) или скелете (для свинца), q_4 - элемент в прочих тканях организма, q_5 и q_6 - элемент выводимый с мочой и калом соответственно.

крысах при длительном, в течение I5 недель введении им раствора сулемы ($Hg^{203}Cl_2$). Экспериментальные данные Ротштейна и Хаеса (I960) по длительной ингаляционной затравке лабораторных крыс использованы для определения параметров модели обмена паров ртути. Эти данные, а также результаты Фукуда (I97I) позволили проверить адекватность предлагаемой модели обмена ртути для широкого диапазона концентраций элемента в воздухе (от 0.0I до 6.0 мкг/м^3) и для периодов воздействия различной длительности. Средняя по всем камерам модели точность имитации не превышала 25%.

Идентификация параметров модели при поступлении органических соединений ртути проведена по собственным данным по затравке лабораторных крыс этилмеркурхлоридом, меченым ртутью-203. Установ-

лена средняя скорость экскреции элемента у животных (0.059 I/сут) и скорость биотрансформации ЭМХ во внутренних средах организма (0.0I4 I/сут).

Накопление неорганических соединений свинца имитируется 4-х камерной моделью с выделением в качестве основного депо элемента в организме двух камер, соответствующих содержанию элемента в скелете. Центральной камерой модели является свинец, содержащийся в крови и межклеточных жидкостях. Остальная часть элемента объединена в камере "прочие ткани". Определение параметров модели проведено по опубликованным данным нескольких авторов (Москалев,I964; Болановска и др.,I967, I968, I969; Кастеллино и Алои, I964, I965; Торвик и др.,I974). Данные Потта и Брокхауса (I97I) по воздействию различных дозировок соединений свинца на крыс использованы нами для проверки адекватности модели в условиях перорального, интратрахеального и внутривенного поступления элемента. Точность имитации этих режимов была в пределах 2I-36 %, что позволяет рассматривать предлагаемую модель в качестве адекватного описания процессов обмена свинца в животном организме.

Обмен цинка у лабораторных крыс описан в виде I2-ти камерной модели с выделением основных депонирующих и физиологически значимых, с точки зрения обмена цинка, органов и тканей: кровь и межклеточные жидкости, печень, поджелудочная железа, почки, скелет (две камеры) и др. Для идентификации параметров модели использованы собственные данные по однократному введению крысам цинка-65 (внутривенно и перорально) и последующем измерении радиоактивности тканей и цельного организма. Были использованы также данные других авторов (Архангельская и др.,I966; Бьерроумен и др., I973; Боне и др.,I967; Дворак, I970; Гильберт и Тайлор, I956 и др.) Проведена проверка адекватности модели для условий постоянного и длительного поступления цинка.

Принятый нами в качестве меры адекватности показатель точности имитации для различных режимов воздействия (пути поступления, дозы, время воздействия) для всех изучаемых элементов был в пределах I0-50 %. Подобная точность имитации находится в соответствии с вариабельностью эмпирической информации (собственной и данных других авторов), используемой как на этапе идентификации параметров, так и при проверке адекватности модели.

В главе обсуждается вопрос о возможности экстраполяции токсикокинетических характеристик обмена, полученных для лабораторных

крыс и лабораторных мышей и полевок. Установлено, что $K_{i,j}$, имитирующие скорости обмена элемента между камерами модели, подчиняются общим закономерностям, основанным на пропорциональности основных показателей интенсивности обменных процессов в организме от его массы. Экспериментальная проверка этого факта, выполненная при однократном парентеральном введении цинка-65, ртути-203 и стронция-90, показала возможность применения предлагаемых моделей обмена для имитации накопления токсических элементов животными из природных популяций.

Рассматривая предложенные модели в качестве математической формализации закономерностей обмена элементов на организменном уровне, обсуждается возможность имитации условий существования природных популяций мелких млекопитающих. Адекватность подобной экстраполяции для полевок, принадлежащих половым и возрастным группировкам в популяции, установлена при сравнении средних концентраций свинца и цинка в скелетах с результатом расчета их концентраций на моделях. Средняя по всем участкам и группам точность имитации для свинца равна 20.7 %, для цинка - I4.2 %.

Важнейшим этапом проверки адекватности модельных расчетов является сопоставление расчетных и эмпирических распределений концентраций элементов. Показано, что с доверительной вероятностью $0.3 < P < 0.4$ может быть принята гипотеза о совпадении расчетных содержаний свинца с соответствующими измеренными концентрациями. Для цинка доверительная вероятность совпадения расчетов с измеренными значениями в пределах $0.1 < P < 0.6$.

Установленное совпадение распределений свидетельствует о том, что выделяемые, важнейшие с точки зрения токсикокинетики этих элементов, экологические факторы и параметры природных популяций (вид полевок, пол, возраст, состав рационов, наполненность ЖКТ) реально контролируют накопление токсических элементов в организмах зверьков. Обнаруженное соответствие между расчетом и реальными уровнями является важнейшим аргументом в пользу адекватности предложенных моделей и корректности проведенной экстраполяции на животных из природных популяций.

Глава IУ. Загрязнение природных экосистем и оценка состояния популяций мелких млекопитающих.

Любые оценки последствий техногенного загрязнения среды обитания должны основываться на количественной зависимости "доза-эффект". В экологической токсикологии животных в качестве аргумента

зависимости "доза-эффект" нами предложено рассматривать меру токсического воздействия (распределение концентраций токсических элементов у животных в популяции). Задача количественной оценки состояния популяции в условиях техногенного загрязнения требует формулировки некоторого интегрального показателя, однозначно и в количественной форме характеризующего состояние популяции. Подобная оценка эффекта токсического действия на популяцию должна основываться, с одной стороны, на совокупности физиологических, биохимических, функциональных и иных показателях состояния организма; с другой,- иметь популяционный характер, отражая свойства популяции как биологической системы.

Из приводимого в главе краткого обзора лабораторно-клинических данных по воздействию техногенных загрязнителей на животный организм следует, что первичные эффекты токсического действия реализуются прежде всего через поражение центральной нервной системы (гиперактивность животных, их возбудимость, поведенческие нарушения и др.) и репродуктивных функций животных.

Жизнеспособность природных популяций и их устойчивость к токсическому воздействию в определяющей мере зависит от средней плодовитости животных и поддерживается системой информационных и функциональных связей. Мера поражения популяции в этом случае будет определяться тем, сколько животных с признаками поражения (снижение плодовитости или отклонения в функционировании ЦНС, приводящие к неадекватной реакции зверьков на внутрипопуляционные взаимоотношения и внешние факторы) присутствуют в популяции.

Такая оценка токсического эффекта через долю "пораженных" животных носит популяционный характер, поскольку она связана с отмеченной ранее структурированностью популяций по уровням элементов, содержащихся у животных отдельных групп. Изменение уровней поллютантов во внешней среде и у животных, так же как изменение половой и возрастной структуры популяции ведут к изменению в ней количества зверьков с повышенным содержанием элементов.

Таким образом, речь идет о переходе от диагностики состояния конкретного организма к оценке состояния популяции. Предлагаемая дозовая зависимость "распределение содержаний токсических элементов у животных в популяции - доля в ней "пораженных" особей" предполагает пороговость токсического действия загрязнителей.

Это значит, что в организме животных или отдельных органах и тканях возможно определение критических содержаний токсических

элементов ($C_{кр}$), превышение которых ведет к появлению признаков поражения. Доля животных в популяции или отдельной внутрипопуляционной группировке, содержание токсических элементов у которых превышает $C_{кр}$, определяет состояние популяции.

В эксперименте на белых лабораторных крысах, подвергающихся в течение 5-ти месяцев ингаляционной затравке окислами свинца в концентрациях от 0.07 до I0 мкг/м^3 , определяли в разные сроки изменение содержания ретикулоцитов в крови, SH -групп в сыворотке крови, активности щелочной фосфатазы крови и холинэстеразы печени, содержания копропорфирина в моче. Одновременно определяли концентрации свинца в крови и мышцах. Анализ полученных результатов позволил определить границы нормы по каждому показателю. Установленная корреляционная зависимость между выбранными показателями и уровнем токсических элементов в тканях крыс позволила найти диапазон $C_{кр}$ (от I9 до 43 мкг/I00 мл).

Критические уровни свинца и ртути были получены также по опубликованным данным других авторов. Для этого условия каждого эксперимента (длительность и уровни воздействия, вид введения) имитировали на моделях. Полученные расчетным путем содержания элементов в тканях сопоставляли с приводимыми авторами показателями токсичности (главным образом по отклонению в функционировании репродуктивной системы и ЦНС). В результате анализа собственных данных и доступной токсико-гигиенической литературы в качестве критических уровней в крови приняты: для свинца $C_{кр}$= 30, для ртути 0.8 мкг/I00 мл.

Обоснованная в гл.III возможность использования математических моделей обмена для имитации накопления токсических элементов популяциями млекопитающих, а также установленные $C_{кр}$ загрязнителей у животных, ответственные за проявление первичных признаков поражения, позволяют оценить состояние популяций в условиях различных уровней загрязнителя во внешней среде.

Так, на исследованных участках Южного Урала должны наблюдаться минимальные количества "пораженных" зверьков (около 0.I % на всю популяцию). На участке с максимальными уровнями свинца в растительности (С-4) процент "пораженных" животных среди неполовозрелых самцов достигает I4 %, у взрослых самцов 8 % и у самок - 2.8%. Это различие между половозрелыми и неполовозрелыми зверьками наиболее выражено при концентрации свинца в рационах равной I5 мкг/г. Отмеченная закономерность (большее число "пораженных" среди неполовозрелых) характерна для типичных остеотропных элементов, преимущественное депонирование которых в скелете продолжается в течение всей жизни зверьков. Однако, используемая для оценки "поражения" величина $C_{кр}$ относится к концентрации элемента в крови, где стационарное содержание достигается в течение месяца и определяется отношением ежедневного поступления элемента в кровь к ее объему в организме. Поскольку это отношение у неполовозрелых зверьков существенно больше, то и доля "пораженных" в этой группе животных будет выше.

Иначе обстоит дело при загрязнении природной среды ртутью. Взрослые зверьки в течение жизни накапливают более высокие содержания этого элемента в мягких тканях и крови. Это обуславливает и более высокий процент "пораженных" особей среди половозрелых (рис.2). В качестве примера мы рассмотрели последствия для популяции грызунов загрязнения среды обитания источником воздушной эмиссии паров ртути. При мощности выбросов 70 кг ртутных паров в сутки, что соответствует работе на угле мощной тепловой электростанции, на ближайшем расстоянии (до 0.5 км) через 20 лет после начала выбросов средняя концентрация ртути в крови мелких млекопитающих достигает 0.6 мкг/I00 мл, а доля "пораженных" животных составит более 20 %. На расстоянии свыше 2 км эта доля не более 0.I5 %.

В главе обсуждается вопрос, в какой мере оценка доли "пораженных" животных соответствует реальной ситуации. Неспецифичность проявления признаков поражения ЦНС и репродуктивных функций животных, высокая пластичность и низкие уровни проявления этих показателей, а также невозможность адекватного подбора сравниваемых стаций обитания - все это усложняет или делает практически невозможным прямое определение доли "пораженных" особей.

Приводимые нами оценки еще не определяют судьбу популяции в условиях техногенного загрязнения. Слабая изученность популяционных механизмов поддержания численности не позволяет в полной мере оценить возможные последствия для природных популяций определяемого расчетным путем "груза" "пораженных" особей. Возможно ориентироваться лишь на существенное упрощение реальной ситуации, применяя имитационные модели динамики численности популяций. На подобных моделях показано, что при интенсивном загрязнении среды обитания только за счет токсического воздействия на основные демографические параметры (уменьшение плодовитости и выживаемости

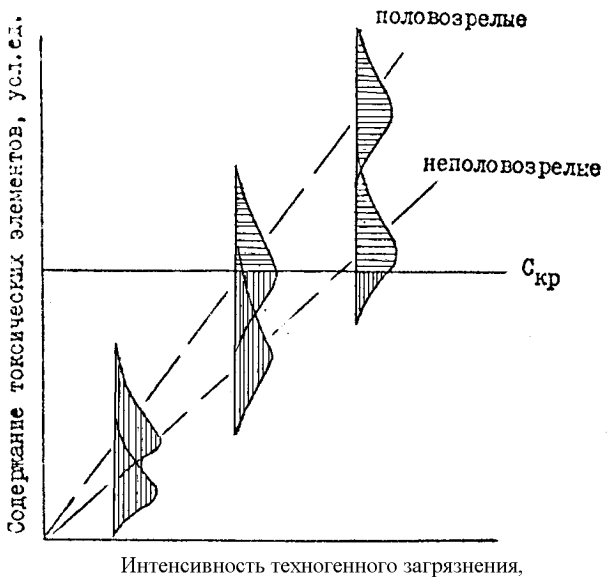

Рис.2 Содержание токсических элементов у животных в природных популяциях мелких грызунов в зависимости от интенсивности техногенного загрязнения среды обитания.
▤ - доля "пораженных" зверьков в популяции.
$C_{кр}$ - критический уровень элемента в организме.

зверьков) следует ожидать у мелких млекопитающих ограничение ежегодных колебаний численности популяции на фоне ее постоянного снижения. Так, в приводимом примере на расстояниях до 2 км от источника воздушных выбросов ртути при длительном загрязнении среды численность животных снизится в 10 раз.

Рассмотрено влияние техногенного загрязнения на животных, принадлежащих к различным функциональным группировкам. Показано, что перезимовавшие полевки к моменту достижения половозрелости накапливают бо́льшие количества токсических элементов и имеют более высокий процент "пораженных" зверьков, чем половозрелые сеголетки. В связи с этим отмечена различная "пораженность"

популяции на фазах максимума и депрессии ее численности.

Показано, что в условиях техногенного загрязнения обмен токсических элементов через природные популяции мелких млекопитающих в силу особенностей их эколого-функциональной структуры способен адаптивным образом воздействовать на демографические параметры и через них на динамику численности. Техногенное загрязнение выступает в этом случае в качестве компенсирующего фактора при максимальной численности популяции, способствуя ее снижению. При депрессии токсические агенты задерживают восстановление обилия животных. Выраженность такого корректирующего воздействия (максимальная при загрязнении свинцом и меньшего при воздействии ртути) зависит от специфики обменных свойств конкретных элементов.

Приводимые оценки не учитывают ряд важнейших факторов, в том числе возможного пополнения или уменьшения популяции за счет мигрантов с более загрязненных или чистых участков. Это обстоятельство особо важно в условиях неравномерности техногенного загрязнения территории и разнокачественности стаций обитания. Нами, совместно с И.Е.Бененсоном и О.Л.Садыковым, рассмотрена модель динамики численности, учитывающая отмеченную разнокачественность местности обитания мелких млекопитающих. Показана высокая устойчивость популяции к действию токсического агента, если загрязнение распространяется на второстепенные стации обитания. В этом случае миграционные потоки животных с чистых участков активно поддерживают высокую численность популяции. Иначе обстоит дело при токсическом воздействии на ядро популяции. Влияние загрязнения, выраженное в снижении численности животных, может выходить за пределы территории, подверженной загрязнению.

Таким образом, вводимая нами оценка состояния популяции через долю "пораженных" особей, а также определяемый на той же основе прогноз ее будущего является прямым отражением важнейшего свойства популяции – ее пространственной гетерогенности.

Глава У. Биологическое концентрирование токсических элементов трофическими уровнями экосистем.

Биоценотический подход к проблемам экологической токсикологии предполагает рассмотрение популяции животных в качестве одного из звеньев природных экосистем. Важнейшее место при этом принадлежит передаче токсических элементов от растительных объектов

к животным-фитофагам и далее к хищным животным, поскольку именно высшие трофические уровни оказываются часто наиболее уязвимыми в условиях загрязнения природной среды.

Показано, что наиболее существенными факторами, определяющими передачу токсических элементов по пищевым цепям, являются:

- Структура пищевых рационов и среднее содержание в них токсических элементов.
- Количество потребляемого корма и величина абсорбции элементов в ЖКТ ($f_{жкт}$).
- Пищевая доступность токсических элементов ($f_д$).

Роль абсорбции элементов в ЖКТ животных можно установить при сравнении всасывания неорганических ($f_{жкт}$= 0.I) и органических ($f_{жкт}$= 0.9) соединений ртути. Показано, что концентрация этого элемента возрастает при переходе от растительности к фитофагам примерно в 50 раз, а к хищным млекопитающим - в 250 при загрязнении среды органическими соединениями ртути. При поступлении неорганических форм элемента биоконцентрирование менее выражено: у фитофагов и хищников близкие концентрации, превышающие содержание в растительности в I0 раз.

Пищевая доступность элемента $f_д$ определяется спецификой его обмена в организме. Преимущественное депонирование свинца в костной ткани (до 90 % общего содержания) ограничивает всасывание элемента в ЖКТ. В сочетании с низкой абсорбцией ($f_{жкт}$= 0.05), отнесенной к остальному элементу, содержащемуся в мягких тканях, это обуславливает примерно I0-ти кратное снижение концентрации свинца у хищных животных по сравнению с их жертвами. Этот факт подтвержден нашим анализом содержания свинца у красных полевок и ласок, отловленных на участках Южного Урала. При среднем содержании его в растительности 3 мкг/г сух.веса у полевок было обнаружено I.63 ± 0.77 мкг/г, а у ласок - 0.35 ± 0.2I мкг/г.

Иначе происходит накопление цинка. При среднем содержании его в рационе полевок равном 79 мкг/г, в скелетах грызунов и ласок уровни этого элемента практически совпадают (I2I.0 ± 29.5 и II9.2 ± 2I.7 мкг/г соответственно). Данные свидетельствуют о наличии специфических механизмов активного транспорта цинка через стенку ЖКТ, обеспечивающего гомеостаз этого, физиологически необходимого элемента во внутренних средах организма.

Таким образом, транспорт токсических элементов по пищевым цепочкам контролируется рядом экологических, физико-химических и

физиологических барьеров, специфичных для каждого элемента, ограничивающих или, наоборот, способствующих накоплению его каждым трофическим уровнем.

Глава УI. Популяционный подход к оценке накопления и воздействия токсических элементов на человека.

В силу социальной структуры человеческого общества понятие "популяция" в чисто биологическом смысле, вероятно, не применимо к человеку. Согласно В.П.Казначееву (I983), под популяцией человека следует понимать социально и биологически организованный коллектив, населяющий определенное пространство. В обсуждаемой проблеме определяющим является общность рассматриваемых группировок населения на основе равного уровня воздействия конкретного токсического агента, а также сопутствующих факторов, модифицирующих его влияние.

Наш подход к оценке воздействия токсических элементов на человека и природные популяции животных однотипен. С учетом социальных особенностей человеческого общества мы рассмотрели:

- Процессы поступления и обмена токсических элементов, приводящие к накоплению последних в организмах людей, составляющих отдельные группировки изучаемого контингента, подвергаемые равному токсическому воздействию. Популяционная оценка меры токсического воздействия подразумевает некоторый интегральный уровень поллютантов, отражающий особенности производственных и бытовых условий для лиц, принадлежащих различным группам населения.

В качестве количественной характеристики этого показателя предложено распределение концентраций токсических элементов в биосредах человека (например, в крови или моче), выраженное одним из статистических законов.

- Следствием повышенных уровней загрязнителей является появление в организме признаков поражения. Популяционная оценка эффекта поражения может быть выражена через долю или процент лиц, у которых следует ожидать проявление признаков токсического действия.

Подобно описанному ранее методической основой популяционного подхода являются математические модели обмена токсических элементов. Для определения числовых значений параметров модели мы сочли возможным использовать данные, полученные на людях, профессионально контактирующих с повышенными уровнями загрязни-

телей. Оценка состояния подобной выборки представляет самостоятельный интерес, поскольку в условиях высоких уровней воздействия в течение рабочего дня могут находится значительные контингенты лиц, образующих по ряду признаков самостоятельную группировку, являющуюся предметом внимания промышленных гигиенистов. Естественно, что речь идет о достаточно специфической по условиям труда, состоянию здоровья, возрастному и половому составу выборке рабочих. Однако отсутствие реальной возможности получить количественные достаточно надежные данные по фоновым (или близким к ним) воздействиям оправдывают использование материалов, относящихся к профессиональным группам, с теми допусками и оговорками, которые неизбежны при любой экстраполяции и прогнозировании.

В главе рассмотрены накопление и воздействие на человека ртути и свинца. При обосновании структуры моделей и определении параметров мы исходили из следующего:

I. Структура моделей обмена элементов в организме человека идентична таковой, предложенной для лабораторных животных.

2. При моделировании обмена свинца принята интенсивность клеточно-ферментативной резорбции равной 2.5 % объема скелета в год.

3. Фоновое поступление свинца в кровь с пищей и при дыхании по данным многочисленных авторов принято равным 44 мкг/сут.

4. Данные по обследованию контингента работающих на ряде предприятий страны, полученные совместно с сотрудниками НИИ гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР (г.Москва), а также опубликованные данные других авторов (Рихтер и др.,1979; Голдуотер и др.,1964; Гамбини, 1978; Вильямс и др.,1969 и др.) позволили установить зависимость содержания элемента в крови и моче работающих от его уровня в воздухе. Использованы данные по возрастному изменению концентрации свинца в скелетах людей (Барри, 1975).

Проверка адекватности модели обмена свинца проведена при имитации условий производства (концентрация элемента в воздухе рабочей зоны) в цехах типографии и на заводах (аккумуляторном и вторичной переработки металлов). Показано совпадение средних, рассчитанных на модели и измеренных, концентраций свинца в моче и крови работающих (средний показатель точности имитации от I6 до 2I %). Различия достоверны лишь для данных по моче у работающих на аккумуляторном заводе (точность имитации 42.6 %).

Были сопоставлены также эмпирические данные по распределению

концентраций свинца в крови и моче обследованных с расчетными распределениями, полученными при имитации различных условий производства. Наилучшее совпадение ($P<0.95$) имеет место для содержания свинца в моче работающих на заводе вторичной переработки металла. Проверка адекватности модели обмена ртути проведена при сопоставлении опубликованных данных по содержанию ртути в моче и крови обследованных (Голдуотер,1964; Джекобс и др.,1964 и др.) с результатами имитации на модели условий длительного ингаляционного воздействия паров ртути.

Оценка состояния популяции человека предполагает определение частоты проявления признаков токсического действия. Для этого мы использовали результаты лабораторно-клинического анализа упомянутых контингентов работающих. Все обследованные, независимо от уровня воздействия, включая контрольную группу, были разбиты на две категории:

– Лица практически здоровые или имеющие частичные изменения функционального состояния печени или почек без признаков токсического действия свинца.

– Лица с проявлением признаков интоксикации, выраженной в нарушении порфиринового обмена и специфических изменениях периферической крови. Были исключены все случаи, когда диагноз свинцовой интоксикации ставился под вопросом.

Все обследованные были разбиты на группы в соответствии с уровнем свинца в крови и моче. В каждой группе определяли процент лиц с наличием признаков поражения. Анализ полученных данных позволил определить критические уровни свинца в крови, равные 20 мкг/I00 мл или в моче – 0.I мкг/л мг % креатинина. Показано, что при ежедневном поступлении в кровь людей 30–50 мкг свинца в сутки вероятность проявления признаков токсического действия не превышает таковую у контрольной группы.

На основании опубликованных данных $C_{кр}$ ртути в крови принята равной I.2 мкг/I00 мл. При этом частота проявления первичных признаков поражения (по И.М.Трахтенбергу – это отсутствие аппетита, бессонница, эмоциональная лабильность) не более 5 %.

Таким образом, полученная дозовая зависимость "уровень ртути или свинца в крови или моче – частота первичных признаков токсического действия" позволяет оценить состояние популяционных выборок отдельных групп населения и дать прогноз эффективности мероприятий, направленных на улучшение условий труда и быта.

На современном этапе развития общества его естественные связи с природными экосистемами осуществляются, главным образом, через пищевое потребление продукции экосистем. В этом плане можно говорить о двух аспектах проблемы техногенного загрязнения природной среды: прямое поступление токсических элементов с продуктами питания и общее снижение продуктивности природных и искусственных экосистем. Мы рассмотрели эти вопросы на примере загрязнения природной среды воздушными выбросами паров ртути. Показано, что снижение биопродуктивности водоема, вызванное действием ртути, наступает при значительных ее концентрациях (по нашим оценкам свыше 2-5 мкг/л) в воде. При существенно меньших концентрациях содержание ртути в рыбах достигает предельных, определяемых санитарными нормами.

Таким образом, на примере ртути показано, что, благодаря особенностям трофических связей, в ряде случаев человека следует рассматривать в качестве наиболее уязвимого звена экосистемы.

Заключение.

Проведенное исследование охватывает широкий круг проблем экологической токсикологии млекопитающих. Несмотря на то, что основное внимание было уделено анализу особенностей обмена и воздействия ряда загрязнителей на организменном и популяционном уровнях; рассмотрены особенности распределения загрязнителей по компонентам экосистем, в частности, трофическая передача элементов от растительности к первичным консументам-млекопитающим и далее - к хищникам. Диапазон изучаемых видов, кроме лабораторных крыс и мышей, включает несколько видов полевок (лесных и серых) и представителей хищных млекопитающих. Проведен анализ состава пищевых рационов зверьков, количества потребляемого корма и ряда других экологических и популяционных характеристик. Подобная широта исследования оправдана и объясняется многогранностью проявления поражающего действия рассматриваемых загрязнителей и сложнейшей взаимообусловленностью изучаемых биологических явлений и объектов. Мы отчетливо представляем неизбежный при этом иллюстративный характер некоторых разделов изложенного, известную фрагментарность и в ряде случаев возможный частный характер сделанных выводов. Однако при современном уровне наших знаний, недостаточной изученности и отсутствии завершающих теорий функционирования природных систем в отсутствии техногенного загрязнения нельзя

рассчитывать на большую определенность и конкретность исследования. Решение проблемы популяционной экотоксикологии млекопитающих неразрывно связано с общими успехами всех разделов экологической науки.

Выводы.

I. Основная задача популяционной экотоксикологии млекопитающих - оценка накопления техногенных загрязнителей и их влияния на природные популяции - может быть реализована путем определения меры токсического воздействия (распределение содержаний элементов у животных в популяции) и доли особей с признаками токсического действия.

2. Эколого-функциональная и пространственная структурированность природных популяций мелких млекопитающих определяет различие в накоплении токсических элементов отдельными видовыми и функциональными (в том числе, половыми и возрастными) группировками животных. Установлены:

- Видовые различия уровней накапливаемых элементов, обусловленные структурами рационов, определяющих поступление загрязнителей к животным.
- Возрастная зависимость накапливаемых уровней в скелетах животных (максимальные уровни у взрослых зверьков).
- Половые различия в накоплении свинца. Более высокие уровни у самцов обусловлены особенностями экологии животных.

Эффективный мониторинг техногенного загрязнения природной среды и прогнозирование состояния природных популяций животных возможны при всестороннем учете важнейших популяционных и экологических закономерностей функционирования природных сообществ.

3. Обмен свинца, ртути, цинка в организме лабораторных животных, отражающий закономерности накопления токсических элементов на организменном уровне, может быть формализован в виде имитационных математических моделей.

- Обмен свинца в организмах мелких млекопитающих может быть описан в рамках 4-х камерной модели с выделением в скелете быстрообменного и медленнообменного пула элемента.
- Обмен ртути (неорганические соединения и пары металла) имитируется 4-х камерной моделью с выделением двух кинетически различающихся пулов элемента в почках.
- Обмен органических соединений ртути моделируется единой ка-

мерой, соответствующей общему содержанию элемента в организме.

– Имитация обмена цинка может быть осуществлена многокамерной моделью с выделением элемента, содержащегося в основных органах и системах.

4. Возможен перенос основных токсикокинетических закономерностей обмена токсических элементов, полученных для лабораторных животных, на природные популяции мелких млекопитающих. Теоретической основой такой экстраполяции на популяционный уровень являются имитационные математические модели обмена элементов, учитывающие специфику экологии животных в конкретных условиях среды обитания.

5. Оценка состояния природных популяций мелких млекопитающих, подвергнутых действию техногенного загрязнения, должна основываться на токсических эффектах организменного уровня (разнообразные медико-биологические показатели состояния организма). Математическое моделирование позволяет перейти к оценкам состояния популяции, основанным на зависимости "распределение концентраций элементов у животных в популяции – доля "пораженных" особей".

6. Поток токсических элементов через природные популяции мелких млекопитающих в силу особенностей их эколого-функциональной структуры способен адаптивным образом воздействовать на демографические параметры и через них на динамику численности. Техногенное загрязнение выступает в этом случае в качестве компенсирующего фактора при максимальной численности популяции, способствуя ее снижению. При депрессии токсические агенты задерживают восстановление обилия животных. Выраженность такого корректирующего воздействия (максимального при загрязнении свинцом и меньшего при воздействии ртути) зависит от специфики обменных свойств конкретных элементов, определяемой организменным уровнем этих процессов. Вследствие пространственной разнокачественности стаций обитания и неоднородности загрязнения территории его влияние, выраженное в снижении численности животных, распространяется за пределы зоны, испытывающей прямое техногенное воздействие.

7. Мера биологического концентрирования токсических элементов трофическими уровнями (на примере фитофагов-грызунов и хищных млекопитающих) определяется совокупностью факторов, связанных, главным образом, с химической формой элемента, его физиологической значимостью и пищевой доступностью.

– Ограниченная подвижность по пищевым цепям неорганических соединений ртути обусловлена низкой желудочно-кишечной абсорбцией.

– Примерно 10-кратное (по сравнению с растительностью) снижение уровней свинца у хищников обусловлено, кроме того и ограниченной пищевой доступностью элемента (преимущественное депонирование в скелетах полевок).

– В диапазоне исследованных концентраций цинка активные механизмы желудочно-кишечного всасывания обеспечивают стабильность содержания этого физиологически необходимого элемента в организмах фитофагов и хищников.

– Выраженной способностью к биологическому накоплению обладают органические соединения ртути, характеризующиеся высокой, практически полной абсорбцией в ЖКТ.

8. Показана необходимость и возможность популяционного подхода к человеку при оценке воздействия техногенных загрязнителей, основанного на математических моделях обмена элементов в организме человека (на примере свинца и ртути).

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.

1. Безель В.С., Трегубенко Н.П., Гудин В.М., Сухачева Е.И. Трехкамерная модель процессов сорбции костью радиоактивных стронция и иттрия // Теоретические вопросы минерального обмена.– Свердловск, 1970.–С.104–110.

2. Попов Б.В., Безель В.С., Субботина Н.Н. Применение методов случайного поиска для определения констант камерной модели // Метаболизм радиоизотопов в животном организме.– Свердловск, 1974.– С.48–52.

3. Безель В.С. Математическое моделирование обмена свинца при однократном и многократном введении его крысам // Моделирование поведения и токсического действия радионуклидов.– Свердловск, 1978.– С.8–15.

4. Безель В.С., Оконникова Н.Е., Попов Б.В. Анализ кинетики обмена ртути у крыс при длительной затравке малыми дозами сулемы // Гигиена труда и профзаболеваний.–1979.–№ 6.–С.55–56.

5. Безель В.С., Кацнельсон Б.А., Коншева Л.К., Грехова Т.Д. О постоянстве констант модели, описывающей кинетику токсических элементов в организме // Гигиена и санитария.–1980.–№ 2.– С.69–72.

6. Попов Б.В., Безель В.С., Любашевский Н.М. Математическое моделирование обмена радиоизотопов в скелете // Н.М.Любашевский "Метаболизм радиоизотопов в скелете позвоночных".-М.:Наука, 1980.- С.166-206.
7. Безель В.С. Загрязнение ртутью антропогенного происхождения наземных фитоценозов и его влияние на популяцию мышевидных грызунов // Проблемы фитогигиены и охрана окружающей среды.- Л., 1981.- С.169-172.
8. Безель В.С., Розенберг Е.Е. К вопросу о скорости биотрансформации органических соединений ртути в организме экспериментальных животных // Гигиена труда и профзаболеваний.-1981.- № 7.- С.49-51.
9. Безель В.С. Поступление ртути в наземные биоценозы и оценка возможных последствий этого для популяции грызунов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.-Л.: Гидрометеоиздат,1981.-Т.IУ.-С.41-58.
10. Безель В.С. О возможности популяционных оценок токсического действия тяжелых металлов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.-Л.:Гидрометеоиздат,1982.- Т.У.- С.19-24.
11. Безель В.С. Некоторые подходы к экологическому прогнозированию последствий промышленного загрязнения наземных экосистем тяжелыми металлами // Экология.-1982.-№ 5.- С.65-71.
12. Безель В.С. Математическое моделирование обмена ртути в организме человека // Биометрический анализ в биологии.-М.:МГУ, 1982.- С.91-102.
13. Безель В.С., Егорова Т.С., Плотко Э.Г. Критические уровни тяжелых металлов в организме грызунов и оценка состояния популяции // Количественные методы в экологии позвоночных.- Свердловск, 1983.- С.61-72.
14. Кацнельсон Б.А., Коншева Л.К., Безель В.С., Грехова Т.Д. О некоторых особенностях токсикокинетики остеотропных элементов при длительном поступлении их в организм // Гигиена и санитария .- 1983.- № 3.- С.35-38.
15. Попов Б.В., Безель В.С. Математическое моделирование обмена микроэлементов в организме животных // Биологическая роль микроэлементов.-М.: Наука, 1983.- С.128-133.
16. Безель В.С., Андрияшкин Ю Г., Корщун М.Н., Скрипник В.А. К вопросу оценки последствий загрязнения водных экосистем

промышленными выбросами ртути // Количественные методы в экологии позвоночных.-Свердловск,1983.- С.141-167.
17. Безель В.С., Садыков О.Ф., Тестов Б.В., Мокроносов А.А. Накопление свинца мышевидными грызунами в природных популяциях // Экология.-1984.- № 6.- С.25-31.
18. Безель В.С., Архипова О.Г., Павловская Н.А. Моделирование обмена свинца в организме человека // Гигиена и санитария.- 1984.- № 4.- С.46-48.
19. Архипова О.Г., Безель В.С., Павловская Н.А. и др. Количественные соотношения между концентрацией свинца в воздухе и биосредах организма человека // Гигиена труда и профзаболеваний.- 1984.- № 2.- С.21-24.
20. Безель В.С., Баженов А.В., Мокроносов А.А., Садыков О.Ф. Мышевидные грызуны как возможный индикатор уровней свинца в природных экосистемах // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.-Л.: Гидрометеоиздат, 1985.- Т. УII.- С.27-35.
21. Безель В.С. Накопление тяжелых металлов грызунами на организменном и популяционном уровнях // Проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду.- М.: Наука, 1985.- С.28-37.
22. Безель В.С. Популяционный подход к оценке последствий техногенного загрязнения для популяции грызунов // Влияние промышленных предприятий на окружающую среду.- Пущино-на-Оке, 1984.- С.25-26.
23. Безель В.С., Архипова О.Г., Павловская Н.А., Семенова Л.К. Популяционный подход к оценке воздействия антропогенных загрязнителей на человека // Пограничные вопросы экологии.- Свердловск, 1986.- С.103-115.
24. Безель В.С., Бененсон И.Е., Садыков О.Ф. Влияние техногенного загрязнения среды обитания на динамику численности мелких млекопитающих в мозаичных местообитаниях // Техногенные элементы и животный организм.- Свердловск, 1986.- С.37-42.
25. Безель В.С., Попов Б.В., Садыков О.Ф. и др. Мелкие млекопитающие в системе регионального экологического мониторинга // Техногенные элементы и животный организм.-Свердловск, 1986.- С. 3-13.
26. Безель В.С. Оценка состояния природных популяций мелких млекопитающих в условиях техногенного загрязнения // Экология, 1987.- № 3.- С.36-44.

ПОДПИСАНО К ПЕЧАТИ 26.05.87 НС18599
ЗАКАЗ 711 ТИРАЖ 100 ЭКЗ. ОТПЕЧАТАНО В
ГВЦКП СВЕРДЛОВСКОГО ОБЛИСПОЛКОМА