АКАДЕМИЯ НАУК СССР УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

0

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ

СВЕРДЛОВСК

АҚАДЕМИЯ НАУҚ СССР УРАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ

(полевые наблюдения и эксперимент)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

УДК 502.55:628.5+591.5

Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент): Сб. науч. трудов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

В сборнике рассматриваются некоторые аспекты экотоксичности, имеющие существенное значение для развития теории и практики мониторинга и экологической экспертизы — проблемы загрязнения животных техногенными элементами. Обмен и эффекты стабильных элементов и радионуклидов исследуются в их собственном значении и в то же время могут рассматриваться как индикаторы других видов промышленных загрязнителей. Ряд работ предпринят с целью согласования на популяционном и организменном уровнях закономерностей метаболизма техногенных элементов, а также углубленного исследования механизмов их накопления и выведения.

Материалы сборника рассчитаны на экологов, гигиенистов, радиобиологов и профпатологов.

Ответственные редакторы кандидат биологических наук Б. П. Попов кандидат биологических наук О. Ф. Садыков

Рецензент доктор медицинских наук Б. А. Кацнельсон

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

В. С. БЕЗЕЛЬ, Б. В. ПОПОВ, О. Ф. САДЫКОВ, Е. И. ГРОШЕВА, Р. М. ХАНТЕМИРОВ

МЕЛКИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИЕ В СИСТЕМЕ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Задача мониторинга — непрерывное наблюдение за текущими состояниями окружающей среды и природных комплексов на локальном, региональном и планетарном уровнях, а также подготовка решений по управлению ими [9]. Если контроль состояния атмосферного воздуха и природных вод в настоящее время полностью обеспечен в методическом и методологическом отношениях и опирается на развитую систему наблюдательных постов и пунктов, то этого нельзя сказать о мониторинге природных комплексов.

На глобальном уровне мониторинг природных комплексов должен опираться на достаточно репрезентативную сеть биосферных заповедников, начало формирования которой уже положено. Поскольку скорость изменения регистрируемых нами параметров природных комплексов мала по сравнению с изменениями таких объектов мониторинга, как атмосферный воздух в крупных городах (т. е. на локальном уровне), то отпадает необходимость в непрерывных наблюдениях и на первый план выходит проблема организации комплексных периодических наблюдений. Заключения относительно тех или иных тенденций изменения состояния природных комплексов должны базироваться на интегральных параметрах и оценках их текущего состояния. Многокомпонентность природных комплексов делает проблему подбора адекватного задаче мониторинга набора интегральных показателей состояния природных комплексов весьма актуальной. Речь должна идти, по сути дела, о мониторинге основных типов наземных и водных экосистем.

Применительно к целям глобального мониторинга необходимо контролировать изменения состояния основных биомов: тундр, лесотундр, тайги, лесостепей, степей, пустынь, гор, морей и шельфовой зоны океана. Важно, чтобы пункты глобального мониторинга были достаточно удалены от местных источников антропогенной нагрузки и одновременно контролируемые конкретные экосистемы не обладали бы свойствами, затрудня-

ющими экстраполяцию получаемых результатов на территории или акватории биомов в целом.

Мониторинг на региональном уровне занимает промежуточное положение между развитой системой мониторинга окружающей среды на локальном уровне, охватывающей в настоящее время в основном состояние воздуха и воды, и системой глобального мониторинга, применительно к которому уже разработаны комплексные программы наблюдений, реализуемые, в частности, в биосферных заповедниках. Существующее подразделение территории страны на ряд регионов отражает исторически сложившуюся структуру общественного производства и экономических связей и одновременно выражает специфику антропогенного воздействия на природные комплексы этих регионов. Система регионального мониторинга призвана обеспечить контроль за теми изменениями состояния природных компплексов и окружающей среды, которые вызваны региональной спецификой антропогенной нагрузки. Получение такого рода данных особенно важно в связи с необходимостью разработки комплексных региональных планов и схем экономического развития крупных территориально-производственных комплексов. планирования на региональном уровне и осуществления идеи комплексного развития крупных эколого-экономических систем первостепенное значение имеет информационное обеспечение разделов, касающихся сохранения высокого качества окружающей среды и природных комплексов в условиях интенсификации общественного производства. В основе такого обеспечения должна быть развитая с учетом региональной специфики система регионального мониторинга.

Рассмотрим развитие региональной системы мониторинга природных комплексов для высокоразвитого в промышленном отношении Уральского региона. В наземных экосистемах Урала, представленных на 70 % лесами нескольких типов, необходимо выбрать для целей первой фазы формирования системы регионального мониторинга ограниченный набор объектов — биоиндикаторов состояния лесных экосистем. Исследование этих объектов позволит зонировать регион по степени экологического риска и в дальнейшем контролировать тенденции изменения состояний природных комплексов во всех основных выделенных зонах.

Поскольку влияние антропогенных факторов на природные комплексы многогранно, то в качестве биоиндикаторов наиболее пригодны такие компоненты экосистем, которые позволяют получать интегральные оценки состояния этих систем. По теоретическим соображениям этому требованию наилучшим образом соответствуют высшие звенья трофических цепей лесных экосистем. Но получение достаточных материалов по состоянию популяций высших хищников представляется трудной в методическом отношении задачей. Более пригодны консументы первого

порядка, популяции которых более многочисленны. Среди консументов первого порядка особый интерес представляют млекопитающие, чья биохимическая и физиологическая близость к человеку позволяет осуществлять экстраполяцию данных по экологическому риску, получаемых в отношении диких или домашних животных на человека. Среди травоядных млекопитающих в настоящее время наиболее пригодны экологически всесторонне изученные мелкие млекопитающие.

Изучение мелких млекопитающих позволяет получать оценки по прямому влиянию антропогенной нагрузки на экосистемы и опосредованному — через трофические цепи экосистем на организмы и их сообщества. Имеющиеся методы экологического анализа мелких млекопитающих обеспечивают получение адекватных целям мониторинга оценок на субклеточном, клеточном, организменном, популяционном и биогеоценотическом уровнях организации биосистем.

Среди характерных для Урала форм антропогенной нагрузки, представляющих потенциальный экологический риск, не последнее место занимает химическое загрязнение. Оно снижает качество воздуха в городах и пригородах, приводит к аккумуляции вредных примесей в пригородных водах, в почвах и илах. Это ведет к накоплению техногенных поллютантов растениями и животными, и со временем возникает риск проявления экотоксических эффектов. Всестороннее изучение популяций мелких млекопитающих во всех характерных для Уральского региона ландшафтах позволяет с достаточной полнотой оценить степень этого риска по его локальным проявлениям и предупредить нежелательные последствия техногенной нагрузки на региональном уровне.

В Институте экологии растений и животных УНЦ АН СССР начата разработка теоретических основ использования мелких млекопитающих в системе регионального мониторинга природных комплексов, которая обычно именуется системой экологического мониторинга. Для экологического мониторинга принципиальное значение имеет полнота экологической характеристики объектов мониторинга, точность информации относительно положения в трофо-динамических цепях контролируемых экосистем. Мелкие млекопитающие в целом отвечают этим требованиям. Однако для целей мониторинга предстоит адаптировать касающиеся их разделы общей экологической теории.

Особое положение мелких млекопитающих в наземных экосистемах объясняет и повышенный интерес к ним как к объекту мониторинга. Многочисленными исследованиями показано, что повышенное содержание токсических элементов во внешней среде, включая растительность, неизбежно обусловливает и повышенные концентрации поллютантов в организмах млекопитающих, прежде всего фитофагов.

Это показали Балл с соавторами [16] при исследовании со-

держания ртути у пашенных полевок и лесных мышей, отловленных в непосредственной близости от химических производств. Повышенные уровни ртути, кадмия, цинка и меди определены Джефферисом и Френчем [21] у полевых мышей и рыжих полевок на пшеничном поле, подвергавшемся постоянной обработке ядохимикатами. Аналогичным образом Бардслей с соавторами [17] исследовали содержание некоторых металлов (цинк, медь, марганец, кадмий, свинец и хром) в тканях пашенной полевки, обитающей на загрязненных полях сельскохозяйственной фермы. Уровень цинка, свинца и марганца в растительности достигал в этих условиях 220, 21 и 183 мкг/г соответственно.

В работе Робертса и Джонсона [27] рассмотрены уровни цинка, свинца и кадмия в окрестностях двух заброшенных шахт Уэллса. Шарма и Шюп [30] рассмотрели выборки животных из 18 мест обитания, различающихся широким диапазоном концентраций свинца, кадмия и мышьяка в почвах. Объектом их исследования были скалистые белки и водяные крысы. Повышенные уровни железа, молибдена и меди определяли в скелете и органах оленьих хомячков, отловленных в районе нефтепромыслов [32]. Отмечено повышенное содержание свинца и кадмия в тканях серых крыс из загрязненных районов крупных городов [18, 24]. Во всех цитируемых трудах авторы исследуют также животных, отловленных на контрольных участках. В этих и многих других работах [3, 15, 22, 28, 29, 31, 33] подчеркивается наличие повышенных уровней токсических элементов в организме грызунов по сравнению с контрольными животными.

Объектами исследования других авторов [19, 20, 23, 25] явились животные из придорожных экосистем, главным образом мелкие млекопитающие (серые и рыжие полевки, различные виды мышей, копытные лемминги и т. д.), обитающие в непосредственной близости от автомагистралей и не мигрирующие на значительные расстояния. Так, Гетц с соавторами рассматривают три типа магистралей, отличающихся по интенсивности

движения, и контрольные участки [19].

Многие авторы, исследовавшие накопление токсических элементов у мелких млекопитающих из природных популяций, отмечают наличие видовой специфичности. При равных уровнях загрязнителя во внешней среде различное содержание последних в организмах грызунов естественно объяснить различием их экологии и прежде всего структурами рационов. Полевки рода Microtus (чаще всего серая и пашенная) — типичные зеленоядные зверьки. В придорожных экосистемах в условиях высокого поверхностного загрязнения растительности токсическими элементами в органах этих животных наблюдали более высокие концентрации свинца, чем у типичных зерноядных — лесных мышей [20]. Полевки рода Clethrionomys (обычно рыжая или красная) со смешанным рационом питания, включающим веточный корм и частично насекомых, по данным тех же

авторов, имеют промежуточные уровни этого элемента в организме. Другие авторы [31] при сравнении участков с повышенными уровнями многих элементов (цинк, медь, кадмий, свинец, ртуть, мышьяк и др.) с контрольными участками показали обратное. Пенсильванская полевка, например, имеет более низкое содержание этих элементов, чем копытный лемминг, потребляющий кроме растительности беспозвоночных. Наши исследования в условиях фоновых уровней свинца и цинка показали, что уровни данных элементов в организме красных и рыжих полевок превышают таковые у серых полевок [2]. В противоположность этому установлены равные уровни свинца у рыжей и пашенной полевок, обитающих на отвалах шахт, а у лесных мышей в таких же условиях наблюдали несколько меньшее количество металла [26].

Роль рациона можно установить сравнивая животных-фитофагов (полевки, мыши) с типичными насекомоядными (бурозубки), предполагая, что различие в уровне токсических элементов в растительном и животном рационах приведет к значимым отличиям их содержания в организмах этих зверьков. Однако и в этом случае мы не имеем четкой закономерности. По данным Робертса с соавторами [26], бурозубки накапливают меньшее количество свинца, чем полевки и лесные мыши. Аналогичные результаты получены другими авторами [27]. В то же время не отмечены какие-либо значимые отличия у этих групп животных в работе А. В. Жулидова [8], а Гетц с соавторами [19], исследовавшие мелких млекопитающих, обитающих около дорог, получили обратное отношение. По данным этих авторов, при низких уровнях воздействия (дороги с малой и средней интенсивностью движения) разнообразные виды мышевидных грызунов (хомячки, полевки, лесные мыши) и даже бурозубки практически не отличаются по содержанию свинца. При высоких уровнях воздействия бурозубки накапливают большее количество этого элемента.

В настоящее время мы располагаем наиболее полной информацией по накоплению свинца животными. С целью установления видовой специфики накопления этого элемента мы проанализировали данные известных нам авторов [1, 2, 20, 26, 27]. Поскольку в этих работах речь идет о различающихся уровнях элемента во внешней среде, то средние концентрации свинца в теле зверьков были выражены относительно содержания его у полевок рода *Містотия*, принятого нами за единицу. Согласно этим данным, нет основания говорить о каком-либо избирательном накоплении свинца полевками рода *Clethrionomys* и даже бурозубками. Иначе обстоит дело у мышей рода *Ародетия*, являющихся типичными зерноядными животными, содержание элемента в теле которых примерно на 40 % ниже.

Особое положение мелких грызунов в качестве первичных консументов придает особое значение установлению функцио-

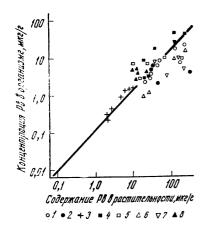


Рис. 1. Содержание свинца в организмах мелких грызунов при различных уровнях элемента в растительности.

I — рыжая полевка [26], 2 — рыжая полевка [20], 3 — красная полевка [1, 2], 4 — пашенная полевка [26], 5 — пашенная полевка [27], 6 — лесная мышь [27], 7 — лесная мышь [26], 8 — лесная мышь [20].

нальной зависимости «уровень элемента в организме животных — его содержание в растительности». Согласно этой зависимости мы обобщили весь известный нам материал по накоплению свинца в организме полевок различных видов, обитающих в условиях

техногенного загрязнения и на контрольных участках. ные охватывают значительный диапазон концентраций мента в растительности (от 1 до 1000 мкг/г) и широкие пределы возможных уровней его в тканях животных (от 0,5 до 100 мкг/г). Высокие концентрации свинца в растительности отражают максимальное техногенное загрязнение среды, когда природных популяций мелких грызунов мала, а их роль в функционировании экосистем сведена к минимуму. Отметим в этой связи, что уровни свинца в растительности в пределах от 1 до 10 мкг/г представлены наименьшим числом данных. Между тем концентрации этого диапазона имеют наибольший интерес, поскольку определяют зону начального техногенного воздействия, близкую к глобальным уровням этого элемента, которые можно ожидать в ближайшем будущем для значительных территорий. Представленные на рис. 1 данные показывают, что, несмотря на разброс приводимых значений концентраций, можно говорить о линейной зависимости содержания свинца в организме животных от его уровня в растительности. Подобную же зависимость в костях мышевидных грызунов и в их рационах отмечали другие авторы [23, 33]. Есть данные о линейной зависимости уровня токсических элементов в костной ткани рогов косуль от их содержания в кормах [28].

Данных по накоплению других токсических элементов значительно меньше. Однако, проанализировав содержание цинка в организмах грызунов по данным нескольких авторов [17, 27], мы вывели подобную же линейную зависимость (рис. 2, а). Относительно меньший наклон этой прямой свидетельствует о наличии определенных гомеостатических механизмов, препятствующих высокому всасыванию цинка в желудочно-кишечном тракте животных.

Имеются и другие данные о пропорциональности накапливаемых уровней содержанию токсических элементов во внеш-

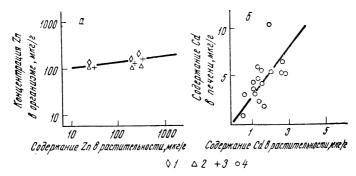


Рис. 2. Содержание цинка в организме мелких грызунов (a) и кадмия в печени скалистой белки (б) при различных уровнях данных элементов в растительности [17, 27, 30].

1 — пашенная полевка, 2 — лесная мышь, 3 — бурозубка, 4 — скалистая белка.

ней среде. Так, по данным Шарма и Шюпа [30], можно говорить о линейной зависимости накопления кадмия в печени скалистых белок от уровня элемента в растительности.

Таким образом, мы располагаем в настоящее время достаточной информацией о накоплении токсических элементов в организме мелких млекопитающих, чтобы говорить о принципиальной возможности использования этих объектов для мониторинга техногенных загрязнений природной среды.

В то же время наиболее подробно изучено лишь ограниченное количество токсических элементов. Конкретная реализация мониторинга загрязнений невозможна без информации о накоплении животными широкого спектра разнообразных техногенных элементов. Особо следует подчеркнуть ограниченность наших знаний о накоплении и действии низких уровней поллютантов в растительных и животных организмах, незначительно превышающих фоновые содержания. Восполнение этого дефицита информации возможно лишь при разработке разнообразных и высокочувствительных аналитических методик измерения биологических проб.

При использовании мелких млекопитающих в качестве объекта мониторинга перспективным в методическом отношении является определение уровней содержания техногенных химических элементов в скелетных тканях животных. Скелет служит как бы депо для подавляющего большинства элементов периодической системы [10], т. е. представляет собой ткань организма, где концентрация этих элементов наиболее высока. Скелетные ткани лучше сохраняются и в естественных условиях, и в зоологических коллекциях, и в сборах образцов для мониторинга, открывая возможность исследования уровней техногенных загрязнений на значительных хронологических отрезках. Наконец, эти ткани обладают рядом чисто методических преиму-

Содержание металлов в растительности и в организме животных Южного

Вид	Свинец	Свинец Ртуть	
Черника	$0,27\pm0,02$ $0,28\pm0,03$ $0,41\pm0,05$ $0,32\pm0,03$ $0,60\pm0,03$	$0,013\pm0,002$ $0,012\pm0,003$ $0,009\pm0,001$ $0,010\pm0,001$ $0,009\pm0,001$	$0,0033\pm0,0003$ $0,0039\pm0,0004$ $0,0055\pm0,0003$ $0,0045\pm0,0002$ $0,0026\pm0,0005$
Среднее	$0,376$ $2,72\pm0,26$ $1,74\pm0,09$ $1,92\pm0,06$	$0,0107$ $0,091 \pm 0,007$ $0,088 \pm 0,005$ $0,098 \pm 0,005$	$\begin{array}{c} 0,00396 \\ 0,033\pm0,004 \\ 0,029\pm0,002 \\ 0,047\pm0,004 \end{array}$
Среднее	2,13	0,0923	0,0363

ществ при подготовке образцов к элементному анализу (механическая очистка, измельчение, полнота мокрой минерализации и др.).

Обзоры современных методов элементного анализа объектов природной среды [4, 11, 13, 14] показывают, что наиболее полно отвечают критериям мониторинга те из них, которые обладают высокой чувствительностью, а также возможностью производить одновременный многоэлементный анализ при значительном количестве проб. Такими качествами обладают некоторые ядерно-физические методы, метод спектроанализаторов с индуктивно-связанной плазмой, атомно-абсорбционные методы [4, 13, 14]. Однако все они требуют дорогостоящей аппаратуры, высококвалифицированного обслуживающего персонала, сложны в эксплуатации.

В связи с этим определенный интерес представляет использование для целей мониторинга современных модификаций методов изотропного разбавления (ИР) со субстехиометрическим выделением элемента, которые обладают высокой чувствительностью, характерной для радиометрических методов. В то же время для них достаточно стандартного, широко доступного радиометрического аппаратурного обеспечения. Такие методы эффективно применяются при мониторинге водной среды [5, 6]. Однако методика ИР при экологическом мониторинге разработана недостаточно.

В настоящей статье, в дополнение к данным различных авторов, обзор которых дан выше, приведены результаты использования ИР-метода при анализе некоторых объектов природной среды.

Материал и методика. Анализировали содержание ртути,

Урала, мкг/г сух. вещ.

Медь	Цинк
-	
-	
-	
-	
	-
49,3±4,3	168,9±18,5
48,1±3,8	133,7±7,5
47,2±1,9	159,8±3,1
48,2	154,1

цинка, кадмия и меди в костных тканях мелких млекопитающих и в растениях, отобранных в районе горного массива.

Растительные пробы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали до мелкодисперсного порошкообразного состояния на лабораторной мельнице ЭМ-ЗА, металлические части которой предварительно покрывали слоем эпоксидного клея. Далее пробы подвергали мокрой минерализации по стандартной методике [4].

Образцами тканей животных служили кости черепа, механически очищенные от костного мозга и других тканей и подвергнутые мокрой минерализации в смеси азотной, серной и хлорной кислот на водяной бане [12].

Определение содержания металлов в подготовленных пробах проводили методом изотопного разбавления со субстехиометрическим выделением элемента токсином и его производными по методике [7].

Приведенные в таблице результаты определений показывают, что данные, полученные ИР-методом, согласуются с данными, полученными другими методами, а сам ИР-метод обладает высокой чувствительностью при анализе объектов природной среды, позволяющей использовать его при мониторинге территорий с содержанием техногенных элементов, близких к фоновым.

Таким образом, на основе анализа результатов, опубликованных различными авторами, и по данным собственных измерений можно сделать вывод о пригодности мелких млекопитающих в качестве объекта мониторинга техногенных загрязнений природной среды.

Показано, что метод радиоизотопного разбавления, применяемый для определения содержания ряда элементов в костных тканях животных в сочетании с другими аналитическими методами, позволяет реально обеспечить контроль за уровнем токсических элементов в этом важнейшем звене природных экосистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Безель В. С., Баженов А. В., Мокроносов А. А., Садыков О. Ф. Мышевидные грызуны как возможный биоиндикатор уровней свинца в природных экосистемах. В кн.: Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л., 1985, с. 27-35.

3. Васьковская Л. Ф. Мышевидные грызуны — индикаторы загрязнения и трансформации стойких пестицидов в окружающей среде.— В кн.: Грызуны: [Материалы V Всесоюзного совещания]. М., 1980, с. 390.

4. Гидрометеорология. Серия: Контроль загрязнения окружающей среды.

Обзорная информация. Обнинск, 1982, вып. 1. 37 с.

- 5. Грошева Е. И., Стурис А. П., Банковский Ю. А. Определение следов кадмия в озерных водах методом изотопного разбавления.— В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по аналитической химии. Минск, 1979, с. 219-220.
- 6. Грошева Е. И., Веверис О. Э. Суб- и суперэквивалентное изотопное разбавление как метод анализа озерных вод на следы ртути. -- Там же, с. 221—222.
- 7. Грошева Е. И., Банковский Ю. А., Веверис О. Э., Стурис А. П. Применение тиоксина (8-меркаптохинолина) и его производных в субстехнометрическом радиохимическом анализе. - Изв. АН Латв. ССР, 1980, № 7, c. 117—136.
- 8. Жулидов А. В. Характеристика свинцового загрязнения растительности и животных в некоторых биотопах Воронежского заповедника. - В кн.:

Проблемы экологии позвоночных Сибири. Кемерово, 1978, с. 158—160. 9. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды.

Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 375 с.

10. Любашевский Н. М. Метаболизм радиоизотопов в скелете поз-

- воночных. М.: Наука, 1980. 250 с.
 11. Ти нели И. Поведение химических загрязнителей в окружающей среде. М.: Мир, 1982. 281 с.
- 12. Хавезов И., Целев Д. Атомно-абсорбционный анализ. Л.: Химия, 1983, 143 с.
- 13. Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды: Тр. І Всесоюзн. сов. Ташкент, 23—26 окт. 1979. Л.: Гидрометеоиздат, 1980.

14. Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды:

Тез. докл. II Всесоюзн. сов. 20—22 апреля 1982. Рига, 1982. 190 с.

15. Anthony R. G., Kozlowski R. Heavy metals in tissues of small mammals inhabiting waste-water-irrigated habitats.— J. Envir. Qual., 1982, vol. 11, N 1, p. 20—22.

16. Bull K. R., Roberts R. D., Inskip M. J., Goodman G. T. Mercury concentrations in soil, grass, earthworms and small mammals near an industrial emission source.— Envir. Pollut., 1977, N 2, p. 135—140.

17. Beardsley A., Vagg M. J., Beckett P. H. T., Sausom B. F. 17. Beardsley A., Vagg M. J., Beckett P. H. T., Sausom B. F. Use of the field vole (M. agrestis) for monitoring potentially harmful elements in the environment.— Envir. Pollut., 1978, vol. 16, N 1, p. 65—71.

18. Cathy W. A., Gene S. D. Accumulation of lead and cadmium in wild populations of the commeusal rat, rattus norvegicus.— Arch. Envir. Contam. Toxicol., 1982, vol. 11, N 4, p. 407—417.

19. Getz L. L., Verner L., Prather M. Lead concentrations in small mammals living near highways.— Envir. Pollut., 1977, N 2, p. 151—157.

20. Jefferies J. D., French M. C. Lead concentration in small

20. Jefferies J. D., French M. C. Lead concentration in small mammals trapped on readside verges and field sites. - Envir. Pollut., 1972,

vol. 172, N 3, p. 147-182. 21. Jefferies J. D., French M. C. Mercury, cadmium, zinc, copper and organochorme insecticide levels in small mammals trapped in a wheat

field.— Envir. Pollut., 1976, vol. 10, N 3, p. 175—182. 22. Lochmiller R. L., Kendall R. J., Scanlon P. F., Kirkpafrick R. L. Lead concentrations in pine voles trapped from two Virginia orchards.—Va. J. Sci., 1979, vol. 30, N 2, p. 50.

23. Mieran G. W., Favara B. E. Lead poisoning in roadside popu-

lations of deermice. Envir. Pollut., 1975, vol. 8, p. 55-64.

24. Mouw D., Kalitis K., Anver M. et al. Possible toxicity in urban versus rural rats.— Arch. Envir. Health., 1975, vol. 30, p. 276—280.

25. Quarles H. D., Hanawalt R. B., Odum W. E. Lead in small mammals, plants and soil at varying distriance from a hoghway.— J. Appl. Ecol., 1974, vol. 11, p. 937—949.

26. Roberts R. D., Johnson M. S., Hutton M. Lead contamina-

tion of small mammals from abandoned metalliforons mines.— Envir. Pollut.,

1978, vol. 15, N 1, p. 61-69.

27. Roberts R. D., Johnson M. S. Dispersal of heavy metals from abandoned mine workings and their transference though terrestrial food chains.— Envir. Pollut., 1978, vol. 16, N 4, p. 293-310.

28. Sawicka-Kapusta K., Perzanowski K., Bobek Heavy metal intake by roedeer in Silesian forests.— Ekol. Pol., 1982, vol. 29,

N 3, p. 353-359. 29. Scanlon P. F. Contamination of food chains with particular refe-

rence to vertebrates.— Va. J. Sci., 1980, vol. 131, N 3, p. 24—58.

30. Sharma R. P., Shupe J. L. Lead, cadmium and arsenic residues in animal tissues in relation to those in the surounding habitat.—Sci. Total. Envir., 1977, vol. 7, N 1, p. 53—62.

31. Smith G. J., Rogstad O. J. Small mammal heavy metal concen-

trations from mined and control sites.— Envir. Pollut., 1982, vol. 28, N2,

p. 121-134.

32. Stelter L. H. Baseline levels of selected trace elements in Colorado oil shale region animals.—J. Wildl. Dis., 1980, vol. 16, N 2, p. 175—182.

33. Welsh W. R., Dick D. L. Lead concentrations in tissues of road-side mice.—Envir. Pollut., 1975, vol. 8, p. 15—21.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986.

Л. М. СЮЗЮМОВА, А. Р. КАРАГЕЗЯН

ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГИИ КУСТАРНИКОВОЙ ПОЛЕВКИ И ЛЕСНОЙ МЫШИ В АНКАВАНЕ

Анкаванская биогеохимическая провинция, обогащенная молибденом, характеризуется распространением эндемичных заболеваний у людей (молибденовая подагра) и сельскохозяйственных животных (молибденозы с проявлениями энтеритов, анемий, болезней волос).

Влияние избыточного содержания молибдена в среде на диких животных не изучено. Особый интерес для исследователей представляют многочисленные обитатели природных биогеоценозов — мелкие травоядные млекопитающие. Содержание молибдена в Анкаване высокое (в почвах $1 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-2}$, в растениях $0.5 \cdot 10^{-2}$ — $2.5 \cdot 10^{-2}$ % на золу этого элемента) [4, 11]. Показатели концентрации Мо в растениях приведены с учетом форм, способных к его накоплению. Поглощение Мо зависит и от видовых особенностей растений (бобовые, например, накапливают Мо больше, чем злаковые [15]). Следовательно, видовые особенности питания травоядных млекопитающих должны быть существенны в поступлении и воздействии Мо на их организм. Как известно, у растительноядных животных Мо имеет важное физиологическое значение в процессах пищеварения, что связано с деятельностью микрофлоры кишечника, восстановлением нитратов и пр. [2, 15].

Изучение приспособительных изменений, вырабатывающихся в процессе жизни у естественных обитателей биогеохимических провинций в условиях повышенного фона Мо, может способствовать раскрытию ряда важных сторон адаптации животных к экстремальным воздействиям факторов геохимической среды.

Общепризнано, что процессы адаптации к экстремальным факторам проходят на уровне популяции, и оценки реакции отдельных животных, физиологических изменений и механизмов устойчивости рассматриваются в плане популяционной изменчивости [16]. При направляющем воздействии отбора формируются устойчивые, адаптивные варианты. Поэтому важное общетеоретическое значение приобретают экологические и эколого-физиологические исследования, а также изучение динами-

ки экологической структуры популяций и ее влияния на устойчивость животных в экстремальных условиях среды.

В изучении адаптаций к геохимическим условиям большое значение имеют работы В. В. Ковальского [5-8], в которых раскрываются основные закономерности накопления, распространения, особенностей миграции токсических металлов. Показано, что именно на внутрипопуляционном уровне осуществляются приспособительные реакции к условиям геохимической среды, вырабатываются стойкие свойства, обеспечивающие жизнедеятельность организма животных в экстремальных условиях при содержании в тканях запредельных концентраций токсических элементов. Однако экологические механизмы этих адаптаций более изучены на растениях и микроорганизмах. Для решения этой проблемы необходимы широкие исследования популяций разных биогеохимических провинций. При этом особое значение приобретают не только изучение распространения отдельных микроэлементов в популяции и их гетерогенность в накоплении, но и стационарные исследования особенностей динамики экологической структуры популяции, ее численности и продуктивности на территории геохимической провинции и сопредельных областей. Этот подход дает возможность оценивать комплекс воздействий с последующим анализом роли отдельных физиологических параметров (возраста, плодовитости, интенсивности размножения и пр.) на устойчивость популяций.

Материал и методика

Обследования популяций проводили в 1980—1982 и 1984 гг. Было собрано 729 лесных мышей и 1101 кустарниковая полевка. Отловы зверьков проводили на двух участках размером 950 × ×180 м², один из которых находился на территории биогеохимической провинции, второй — в 10 км от ее границы. Участки представляют собой северный и северо-восточный склоны ущелий, покрытые широколиственным лесом с хорошо развитым подлеском и травянистым покровом. Высота участков — 2100—2300 м над ур. м. Верхняя граница — горный хребет. Противоположные южные и юго-западные склоны безлесные, каменистые, с бедным травянистым покровом. Участки отделены друг от друга двумя горными речками шириной около 3 и 7 м.

Отлов грызунов проводили ловушками Геро и живоловками. На каждый участок расставляли по 100 ловушек одновременно. Расположение линейное, через каждые 5 м. Приманкой служил кусочек поролона, пропитанный растительным маслом.

Возраст животных определяли комплексным методом на основе данных о длине и весе тела, развитии и состоянии генеративных органов, весе тимуса. Для изучения динамики возрастной структуры популяции и размножения были выделены три группы животных: а) размножающиеся, б) молодые и в) взрос-

лые, неразмножающиеся. К первой группе были отнесены беременные и кормящие самки, а также самки с вагинальной пробкой. Беременность определяли по наличию желтых тел в яичниках и эмбрионов. Состояние половой активности самцов определяли по состоянию придатков, размеру и тургору семенников. В группу молодых выделяли животных с весом тимуса не менее 15 мг при условии, что у самцов вес семенника не превышал 80—100 мг, а вес тела 12—14 г. У самок не перфорировано влагалище.

Кустарниковая полевка обоих участков имела идентичный хромосомный набор: 2n = 54, $\Gamma = 60$. (Данные представлены в 1980 г. группой М. И. Баскевич из Института эволюционной морфологии и экологии животных.) Кариотипическая форма обнаруженной нами кустарниковой полевки относится к лесной форме и прослеживается на Большом и Малом Кавказе до высоты 2000 м над ур. м. [14].

Содержание Мо, Си и некоторых других элементов в органах и тканях грызунов (печень, почки, шкурки) определяли спектрофотометрическим методом в 1980 и 1981 гг. в Центральной лаборатории Геологического Управления Арм. ССР, в 1982 г.— в спектральной лаборатории ПГО «Уралгеология» и в 1984 г.— в Свердловском Институте профзаболеваний. Режим минерализации проб сохраняли в течение всего периода обследований без изменений. Результаты совпали. Расчеты концентрации Мо в шкурках животных даны по В. В. Ковальскому [5].

Математическую обработку материалов проводили общепри-

нятыми методами.

Результаты исследований и обсуждение

В популяциях обследованных видов грызунов установлена достаточно высокая степень гетерогенности по содержанию Мо в шкурках. При этом средние значения концентрации Мо в шкурках зверьков, отловленных на территории биогеохимической провинции, несколько больше, чем у животных сопредельного (контрольного) участка (табл. 1).

На контрольном участке содержание Мо в шкурках у половозрелых самцов кустарниковой полевки достоверно ниже. Определились некоторые межвидовые различия, у кустарниковых полевок Мо в шкурках накапливается больше, особенно у половозрелых самцов. Это явление прослеживается только у зверьков с территории провинции, у полевок контрольного участка оно не выражено. У лесной мыши различия в концентрации Мо у представителей разного пола практически не отмечены. Нет достоверных различий и между животными этого вида с разных участков.

Существенны особенности накопления Мо в шкурках молодняка. Если у грызунов контрольной территории наблюдается

Кустар-Лесная Колич. никовая Колич. σ σ Участок Группа мышь особей особей полевка $M \pm m$ $M \pm m$ 2.94 ± 0.5 14 1,5 10 $4,13 \mp 0,6$ Молибденовая провин-**♂** ♂ QQ20 $3,20 \mp 0.6$ 2,6 20 $2,59 \mp 0,4 \mid 1,6$ ция 20 20 3.03 ∓ 0.7 2.8 iuv $2,73 \mp 0,9$ 3,6 $|2,01\mp0,4|$ 1,2 8 2.31 ± 0.3 0,9 Контрольная территория ₫ ₫ 11 $2,75 \mp 0,2 \mid 0,8$ 우우 17 $[2,20 \mp 0,4]$ 1,6 20 20 1.60 ± 0.3 juv 20 1.56 ± 0.4 1,6

увеличение содержания этого элемента с возрастом, то у грызунов на территории биогеохимической провинции это явление не установлено. Кроме того, в группах обитателей провинции отмечается большее разнообразие по содержанию Мо, чем контрольного участка. Очень демонстративны различия между молодыми зверьками. Они наблюдаются на обоих видах. Надо полагать, что эта изменчивость связана с концентрацией элемента в кормах.

Показательны данные о проявлении внутрипопуляционной химической изменчивости и по концентрации Мо в шкурках грызунов в целом на участках (табл. 2).

Поскольку используемый метод спектрального анализа не позволял определить содержание Мо в золе меньше, чем $1\cdot 10^{-4}$ %, то пробы, в анализе которых Мо не обнаруживался, при расчете средних значений числа животных на концентрацию мы условно принимали за $0.5\cdot 10^{-4}$. Показательно, что среди обследованных обитателей провинции таких проб не оказалось. Накопление элемента у них и по минимальным его значениям было несколько выше, чем в исследованной группе зверьков с контрольного участка. Следовательно, на контрольной территории разнообразие животных по содержанию Мо в их шкурках больше, чем на территории провинции. Повышенные концентрации Мо характерны для зверьков из биогеохимической провинции.

Отмечаются и различия в накоплении Мо между видами. Кустарниковая полевка по показателю концентрации элемента в шкурках способна к большему его накоплению. В молибденовой провинции у большего числа зверьков установлены повышенные содержания Мо (равные или превышающие 3·10-4% на золу), тогда как среди полевок сопредельного участка они встречены намного реже. Характерно, что по этому признаку межвидовые отличия определяются только при сопоставлении данных, полученных от обитателей геохимической провинции.

Накопление Мо в шкурках грызунов, % на золу, $n \cdot 10^{-4}$

Участок	Концентра- ция, %	Колич. особей	Коли особен осо		Кустарнико- вая полевка
Молибденовая провин- ция	1·10 ⁻⁴ 2·10 ⁻⁴ 3·10 ⁻⁴	6 25 23	$ \begin{array}{c c} 11 \pm 13 \\ 46 \pm 10 \\ 43 \pm 10 \end{array} $	4 14 32	8±14 28±12 64±8
Контрольная территория	Не обн. 1·10 ⁻⁴ 2·10 ⁻⁴ 3·10 ⁻⁴	4 14 16 11	$\begin{array}{c} 9 \pm 14 \\ 31 \pm 12 \\ 36 \pm 12 \\ 24 \pm 13 \end{array}$	5 15 17 14	$ \begin{array}{c c} 10 \pm 13 \\ 30 \pm 12 \\ 33 \pm 11 \\ 27 \pm 12 \end{array} $

Таблица 3

Интенсивность размножения самок в популяциях грызунов, %

Год	Июнь	Июль	Август /	Сентябрь	Октябрь		
	Кустарниковая полевка						
1980 1981	35,1/59,3* 60,0/67,7	47,3/28,2 34,7/41,0	15,3/21,0 23,6/49,0	$\frac{38}{-}$ 16,0/14,3	29,3/—		
	Лесная мышь						
1981	40,0/62,5	35,0/30,0	17,4/37,5	8,2/6,5	6,7/11,0		

^{*} В числителе — обитатели молибденовой провинции, в знаменателе — контрольной территории.

Таблица. 4

Относительная численность кустарниковых полевок и лесных мышей, на 100 ловушко-суток

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
		Куст	арникова	я полевка		
1980 1981 1982 1984	1/0,4*	$ \begin{vmatrix} 8,2/15,3\\1,0/1,5\\9,5/7,0\\12,0/11,5 \end{vmatrix} $	12,1/12,2 5,8/2,2 14,0/16,2 8,7/7,0	4,1/9,0 13,2/1,5 11,0/14,0 11,3/16,0	2,1/9,0 11,8/1,4 —	2,4/1,7
	! ;	1 - , , ,	I Лесная м	ышь		
1980 1981 1982 1984	0,5/0,7	$\begin{array}{c c} 15,0/2,0\\ 2,7/4,0\\ 12,0/1,6\\ 5,5/2,4 \end{array}$	$\begin{bmatrix} 12,2/3,5\\2,2/3,7\\6,0/3,0\\8,0/0,7 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c c} 9,0/1,1\\ 5,4/4,4\\ 15,0/4,5\\ 4,0/0,5 \end{array}$	$ \begin{array}{c} 9,0/2,2 \\ 16,5/11,4 \\ - \end{array} $	15, 0 /6,9

^{*} В числителе — обитатели молибденовой провинции, в знаменателе — контрольного участка.

В шкурках кустарниковой полевки Мо накапливается больше, чем в шкурках лесной мыши. По-видимому, это связано с характером питания животных: кустарниковые полевки как травоядные животные получают Мо больше, чем зерноядные лесные мыши. Однако это наблюдается только в условиях повышенного фона Мо в среде, когда поступление элемента в организм, быть может, несколько превышает его физиологический порог выделения. Как известно, Мо выделяется достаточно быстро из организма, и на 4—6 день в волосяном покрове его устанавливают в следовых количествах [15]. При меньших же концентрациях элемента в растительности контрольного участка межвидовые различия в содержании его в шкурках не проявляются.

Динамика экологической структуры популяций

Показателями состояния популяций, их устойчивости к воздействиям неблагоприятных факторов среды может служить динамика различных биогенных структур на протяжении ряда лет. Важнейшая из них — динамика возрастной структуры, которая отражает интенсивность размножения и выживаемости отдельных возрастных групп в ходе закономерных изменений численности популяции.

Сезонная и хронографическая изменчивость возрастной структуры популяций кустарниковой полевки и лесной мыши на территории молибденовой провинции имела ряд характерных особенностей. Среди них следует отметить у кустарниковой полевки изменение соотношения молодняка и взрослых половозрелых животных в пользу последних. Число половозрелых полевок на этой территории с июня по сентябрь 1980 и 1981 гг. было заметно большее, чем в популяции контрольной территории. Существенных различий в структуре популяций лесной мыши между участками не отмечали. Однако и этот вид реагировал на условия среды гораздо более ранними сроками прекращения размножения. На участках провинции осенняя депрессия размножения наступала на месяц раньше, чем на контрольной территории. Соответственно проходила и осенняя перестройка возрастной структуры: отмечалось резкое преобладание молодых неполовозрелых животных. Это связано, видимо, не только со своеобразием геохимической среды, но и с условиями климатического фона, о чем свидетельствуют межгодовые различия в осенней структуре популяций.

Ряд особенностей в размножении полевок и мышей с выбранных участков свидетельствует о большем периоде размножения у полевок молибденовой провинции. Здесь размножение проходило интенсивнее и заканчивалось позднее (табл. 3).

У лесной мыши интенсивное размножение на участке провинции проходило до августа, а на контрольном оно растягивалось до сентября. В целом в динамике размножения мышей между участками различий практически не установлено.

При анализе плодовитости самок кустарниковой полевки и лесной мыши не выявлено существенной разницы между исследуемыми популяциями. Среднее число эмбрионов на размножавшуюся самку кустарниковой полевки в 1980 и в 1981 гг. на участках провинции составляло 3,0, а на контрольном 2,8—3,0. У лесных мышей в 1981 г.— 5,3 и 5,8 соответственно.

Динамика численности грызунов — интегральный показатель динамики возрастной структуры и интенсивности размножения. Общий ход динамики относительной численности кустарниковой полевки указывает на существование некоторых межпопуляционных отличий (табл. 4), что видно из сопоставления интенсивности размножения в этих популяциях.

Так, в 1980 г. на участке молибденовой провинции после июльского пика численности в августе было отмечено резкое сокращение численности кустарниковой полевки, несмотря на относительно высокий процент размножающихся самок в июне. Интенсивно размножались самки и в сентябре. Тем не менее весенняя численность этой популяции в 1981 г. оказалась низкой. Эти данные, хотя и косвенно, позволяют полагать, что на территории провинции в 1980 г. проходила высокая элиминация молодняка. Однако к осени численность животных закономерно увеличивалась. Осенняя гибель молодняка была выражена здесь не менее четко, чем в предыдущем году.

Высокая элиминация молодняка проходила и в популяции полевок контрольной территории. Однако для нее была характерна резкая депрессия численности 1981 г., которая проходила при снижении числа размножающихся животных в 1980 г. и увеличении их числа в разреженной популяции 1981 г.

Судя по данным табл. 4, на контрольном участке также отмечалась высокая элиминация молодняка, превышающая таковую на территории провинции, особенно в 1981 г. Заметно выше здесь и интенсивность размножения. Однако депрессия численности на этом участке проходила очень резко.

Не менее выражены годы сильных депрессий и в контрольной популяции лесных мышей. Они отмечены в 1980 и 1984 гг. При высокой плодовитости мышей в эти годы наблюдалась очень высокая смертность в разных возрастных группах (особенно молодняка). Возможно, на участках, обогащенных Мо, молодых особей сохраняется больше, хотя размножение (например, в августе и даже октябре 1981 г.) интенсивнее у контрольной популяции.

На территории биогеохимической провинции численность популяций обоих видов более стабильна. Изменения (в частности, падение численности) не носят катастрофического характера. Отмеченные межвидовые различия у популяций разных участков связаны с особенностями экологии — динамикой суточной и сезонной активности, характером питания, физиологическими различиями [9, 10, 14].

Данные о распределении Мо в популяции указывают на выраженную гетерогенность животных по количественному содержанию его у отдельных животных, которая, как отмечается в работах В. В. Ковальского [5—8], играет важную роль в адаптационных процессах на уровне популяций.

Материалы экспериментов, однако, не позволили нам определить заметных отличий в чувствительности к Мо между полевками отловленными в биогеохимической провинции, и полевками контрольного участка. Проявление эмбриотоксического эффекта и летальные дозы у них совпадали [4,13]. Кустарниковая полевка оказалась весьма чувствительной к токсическому воздействию Мо.

Большее содержание Мо в шкурках кустарниковых полевок на участках, обогащенных Мо, кроме отмеченного выше вероятного порогового действия, связано с особенностями их питания и физиологии обменных процессов в сравнении с мышами. Материалы Н. И. Лариной и М. А. Тарасова [10] убедительно свидетельствуют о том, что кустарниковая полевка как типично зеленоядный вид поедает в два — девять раз больше кормов, чем лесная мышь. В сравнении с высокой калорийностью семян кустарников и растений сочные вегетативные части травянистых растений малокалорийны. Уровень пищеварительных процессов у полевок выше. Эти качественные и количественные особенности питания и определяют высокое содержание Мо у полевок геохимической провинции в результате большего поступления элемента с пищей. В обычных условиях накопление балансируется выделением и, как видно по результатам обследования зверьков контрольной территории, различий в содержании этого микроэлемента у мышей и полевок не устанавливается.

Внутрипопуляционное разнообразие в концентрации элемента, выраженное у обоих видов исследованных участков, основано на наследственной гетерогенности и разной устойчивости организмов к экстремальным факторам [12]. Однако трудно пока этим объяснить механизмы, поддерживающие большую стабильность численности популяций молибденовой провинции.

Тем не менее есть основание считать, что у короткоживущих видов (грызунов) Мо способен накапливаться в биотических количествах, оказывающих позитивное влияние на рост, репродуктивную способность и сопротивляемость организма неблагоприятным факторам среды. Наблюдения и экспериментальные данные показывают благоприятное влияние на организм млекопитающих небольших добавок к корму Мо [1, 3, 17, 18]. Особенности экологической структуры популяций доминирующих видов грызунов молибденовой провинции, их устойчивость в специфических условиях среды и большая стабильность численности при действии неблагоприятных факторов общего характера (климатические, кормовые и пр.) могут иметь непосредственную связь с содержанием Мо в среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Венчиков А. И. Дозировки микроэлементов — уровень энергетических процессов животного организма. В кн.: Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине. М., 1974, c. 347—350.

2. Георгиевский В. И., Анненков В. Н., Самохин В. Т. Ми-

неральное питание животных. М.: Колос, 1979. 470 с.

3. Григорян М. С., Татевесян-Маркарян Л. Г. Влияние молибдена на функцию почек. - В кн.: Матералы III Закавказской научной конференции паразитологов. Тбилиси, 1972, с. 10-11.

4. Карагезян А. Р. Чувствительность кустарниковой полевки к эмбриотоксической дозе молибдена. В кн.: Вид и его продуктивность в ареа-

ле: [Материалы 4-го Всесоюзного совещания]. Свердловск, 1984, с. 28—29. 5. Ковальский В. В. Геохимическая среда и жизнь. М.: Наука, 1982.

6. Ковальский. В. В. Геохимическая экология и ее эволюционное направление.—Изв. АН СССР, сер. биол., 1963, № 6, с. 830—851.

7. Ковальский В. В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974, с. 41.

8. Ковальский В. В. Современные задачи и проблемы биогеохимии.— В кн.: Труды биогеохимической лаборатории. М.: Наука, 1979, с. 12-29.

9. Ларина Н. И., Тарасова М. И. Суточная и сезонная активность лесной мыши и малоазийской кустарниковой полевки в горах Северо-Западного Кавказа.— Экология, 1979, № 5, с. 56—60.

10. Ларина Н. И., Тарасов М. А. Опыт количественной оценки пи-

- тания и дефекации лесной мыши (Apodemus silvaticus L.) и кустарниковой полевки (Pitymys majori Thomas.) в горах Северо-Западного Қавказа. — В кн.: Физиологическая и популяционная экология животных. Саратов, 1980, c. 138—162.
- 11. Петунина Н. С. Геохимическая экология растений в провинциях с избыточным содержанием микроэлементов. В кн.: Проблемы геохимической экологии организмов. М., 1974, с. 57—117.

12. Риш М. А. Геохимическая экология животных и проблемы генети-

ки. В кн.: Труды биогеохимической лаборатории. М., 1979, с. 121-134.

13. Сюзюмова Л. М., Карагезян А. Р. О влиянии геохимических

условий среды на экологические особенности популяций мелких грызунов.— В кн.: Грызуны. Л., 1983, с. 450—451.

14. Темботов А. К., Хатухов А. М., Иванов В. Г., Григорьева Г. И. Эколого-географический аспект эволюции кустарниковых полевок Кавказа. В кн.: Фауна, экология и охрана животных Северного Кавказа. Нальчик, 1976, с. 3-35.

15. Хенниг А. Минеральные вещества, витамины, биостимуляторы в

кормлении сельскохозяйственных животных. М.: Колос, 1976. 559 с.

16. Шварц С. С. Экологические закономерности эволюции. М.: Наука,

17. Яковлева М. Н. Изучение действия молибдена на некоторые ком-

поненты углеводного обмена в тканях.—В кн.: Материалы VIII медико-биологической конференции. Петрозаводск, 1975, с. 15—16. 18. Jinu L., Boghianu L., Sporn A. The influence of small do-ses of molybdenum on the activity of some enzymes in rat liver and serum.— Rev. Ronmanie Bioch., 1972, vol. 9, N 3, p. 215-220.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

B. B. TECTOB, A. H. TACKAEB

НАКОПЛЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМЕ ЖИВОТНЫХ НА УЧАСТКАХ С ПОВЫШЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТЬЮ

В настоящей работе рассмотрены пути поступления и накопления естественных радионуклидов в основном полевками-экономками (Microtus oeconomus), обитающими на с различным генезисом техногенного загрязнения. Характерная особенность естественной радиоактивности среды обитания животных и растений состоит в наличии большого количества одновременно присутствующих радионуклидов (19 в урановом и 13 в ториевом семействах), в которые последовательно превращаются материнские атомы ²³⁸U, ²³²Th, проходя путь от радиоактивного до стабильного атома (Pb). В ходе этого превращения образуются химические элементы, которым свойственна различная миграционная способность. Это же явление лежит в основе трансмутационных изменений, пагубно отражающихся на жизненно важных системах организма. В настоящее время наиболее изучены с точки зрения накопления в живых организмах радионуклиды, имеющие большие периоды полураспадов $(^{238}\text{U}, ^{232}\text{Th}, ^{226}\text{Ra})$. К менее изученным относятся $^{222}\text{Rn}, ^{220}\text{Rn}, ^{210}\text{Pb}, ^{210}\text{Po}$. И почти совсем нет работ, посвященных описанию сравнительного накопления различных изотопов одного и того же элемента. Между тем, как показывают предварительные исследования, влияние различных изотопов одного и того же элемента на дозу облучения живого организма может быть весьма различным. Содержание в растениях радионуклидов может служить индикатором накопления их в организме животных. В качестве обобщающей характеристики, позволяющей оценить значение накопления полевками каждого радионуклида, могут использоваться интегральная доза облучения и влияние отдельных радионуклидов на эту величину.

Характеристика участков с повышенной радиоактивностью

Участки повышенной естественной радиоактивности образовались в результате длительного разлива по поверхности аллю-

виально-дерновых почв пластовых радиоактивных вод сложного химического и радиохимического состава (радиевые) или в результате внесения на поверхность видоизмененной горной породы, содержащей повышенное количество урана и радия (урано-радиевые) [8]. Все участки имеют локальный характер и занимают площадь от 1 до 10 га.

Радиевые. Пластовые воды, разлившиеся на территории радиевых участков, относились к хлоридно-натриево-кальциевому типу и содержали ионы натрия, кальция, магния, стронция, бария и некоторых других химических элементов. Из радионуклидов в водах помимо ²²⁶Ra содержались ²²⁸Ra, ²²⁸Th, ²²⁴Ra, ⁵²²Rn, ²²⁰Rn. Выход вод на поверхность прекратился более 26 лет назад [8]. Неравномерность изливания пластовых вод по поверхности участков привела к большой неравномерности их загрязнения по площади, что и объясняет значительную вариабельность в накоплении радионуклидов здесь растениями и животными [10]. Один из таких участков спустя несколько лет после загрязнения был дезактивирован песчано-гравийной смесью. Через год после проведения дезактивации на участке наблюдали только единичные растения, содержание радия в которых было на уровне фона. Но уже через восемь лет практически вся территория дезактивированного участка была занята растительностью, состав которой достигал 74 видов [2]. Преобладающую роль в травостое играли злаки: овсяница луговая, мятлики, щучка дернистая, вейник наземный. Согосподствующее положение занимали бобовые. Отмечали также постепенное зарастание участка ивой и ольхой. Мышевидные грызуны были представлены в основном полевкой-экономкой (Microtus oeconomus). Кроме нее встречали водяную полевку (Arvicola terrestris) и несколько видов бурозубок.

Урано-радиевые. Почвы урано-радиевых участков на глубинах 25—30 см обогащены практически всеми радионуклидами уранового и ториевого радиоактивных семейств, что представляет широкие возможности для исследования накопления естественных радионуклидов по цепочке почва — растения — животные. Один из участков расположен на слабопологом водораздельном склоне с глеесильноподзолистыми почвами на пылеватых суглинках. На вырубке 35-летней давности, в глубине бора черничника, на площади 2 га была внесена радиоактивная порода. образованная из рудных остатков, гидратных окисей, золы и древесного угля [8, 13]. К моменту исследований произошло зарастание вырубки березой, осиной и сосной. Травяной покров участка представлен разнотравьем, включающим более 60 видов растений. Из обитающих на этом участке полевок встречены серые (Microtus oeconomus, Microtus agrestis) и лесные (Clethrionomys glareolus).

Методика определения радионуклидов в образцах

Определение ²³⁸U, ²³²Th проводили люминесцентным и фотоколориметрическим методами. ²²⁶Ra, ²²⁴Ra определяли эманационным методом (по активности ²²²Rn и ²²⁰Rn, находящихся в равновесии с материнским радием). ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po определяли после электрохимического выделения этих элементов из раствора на никелевом диске по числу испускаемых β- и α-частиц. Изотопный состав урана и тория определяли путем тонкослойного осаждения этих элементов на металлической пластинке и измерения на α-спектрометрах, состоящих из датчиков с полупроводниковыми детекторами Si (Li) и амплитудных анализаторов (LP4840 и AИ-4096-2AB) [16]. Ошибки, связанные с низкой активностью проб, уменьшали за счет концентрирования радионуклидов при озолении больших объемов проб и увеличения длительности измерения одного образца.

Однако возможны ошибки, связанные с отбором проб, что необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов. В частности, при разбиении полевок на возрастные группы были использованы морфофизиологические критерии (вес, размеры тимуса и хрусталика, развитие черепных гребней и т. д.), которые являются абсолютными и существенно зависят от физиологического созревания. Кроме того, учитывали ошибки, связанные с разделением животных на оседлых и мигрантов по признаку накопления радионуклидов в организме при средних значениях. Все это могло привести к некоторым ошибкам при определении зависимости накопления радионуклидов от возраста полевок. Тем не менее большой статистический материал (более 3000 животных) предполагает достоверность наших данных.

Накопление радионуклидов и их изотопный состав

Среди большого количества факторов, влияющих на накопление радионуклидов живыми организмами, важнейшим является содержание химических элементов в окружающей среде. На накопление Ra растениями, например, особенно влияет содержание в почве его химических макроаналогов Са и Ва [18]. Большая вариабельность содержания Са и Ва в почве радиевого участка в связи с неравномерным разливом пластовых вод не позволяет сделать однозначных выводов, однако данные статистического анализа свидетельствуют о лучшей корреляции содержания Ra с содержанием Ва, нежели с содержанием Са (табл. 1). Анализ растений, собранных на радиоактивных участках, по содержанию радиоактивных (Ra, U, Th) и стабильных (Sr. Ba. Pb. Mo, Cu) элементов показал большую вариабельность. Меньшая вариация была выявлена для Sr, Ba, Pb, Mo, Си, что свидетельствовало об их незначительном присутствии в изливавшихся водах.

 $\label{eq: Tadinuma 1}$ Содержание $^{226} Ra,\ Ba,\ Ca\$ в растениях радиевого участка, %

_	²²⁶ Ra, 10	-10	Ba, 10		Ca	
Растение	Lim	\overline{X}	Lim	X	Lim	X
Осока водная Тысячелистник обыкновенный Тысячелистник обыкновенный Узколистный Мышиный горошек Клевер луговой Шучка дернистая Костер безостый Овсяница луговая Осот розовый	28,7—73,2 1,7—86,8 1,7—51,4 1,5—99,5 1,9—73,7 3,5—27,0 2,5—23,5 3,1—9,6 1,8—14,3	45,5 26,6 21,5 19,3 15,0 10,5	4,8-63,1 1,5-63,0 1,3-31,6 1,4-95,0 0,2-39,8 1,3-17,8 2,3-15,9 1,6-4,0 2,2	15,0 16,5 14,1 8,1 5,4 9,1 2,8	4,0—38,9 6,5—24,5 6,5—14,6 5,0—21,0 8,0—25,0 2,8—15,2 7,2—15,6 7,5—12,5 7,0—19,5	13,9 10,5 15,2 17,4 6,8 10,1

 $T\ a\ б\ \pi\ u\ ц\ a\ \ 2$ Концентрация изотопов U, Th, Ra в растениях, пКи/г золы

Растение	238U	234 ∐	²³² Th	230Th	228Th	227Th	²²⁴ Ra
Мышиный горошек Тысячелистник обыкновенный Иван-чай узколистный . Осока водная Щучка дернистая Костер безостый Осот розовый Листья ивы двуцветной	0,15 1,38 0,06 0,01 0,12 0,11	0,82 1,10 	0,37 	0,68 2,22 0,15 6,60 1,05	28,03 21,82 1,97 0,32 0,85 1,67 3,80 21,52	0,52 0,50 0,06 0,15 — 0,72 0,75	28,03 21,82 1,97 0,32 0,85 1,67 3,80 21,53

Таблица 3 Абсолютные и относительные содержания изотопов Ra и Rn в надземной массе растений, пКи/г жив. в.

Растение	226Ra	222Rn	220Rn/224Ra	225 Rn/220 Rn	286Rn/224Ra	***Rn/***Ra
Клевер луговой	0,21	0,90	0,72	1,25	0,29	4,28
	0,98	1,69	0,44	3,84	2,23	1,72
	1,29	5,33	1,16	4,59	1,11	4,13
	0,60	0,33	4,97	0,07	0,12	0,55
	1,20	0,87	0,47	1,85	2,55	0,73

Радий. Хорошо известно, что поступление большинства радионуклидов в организм животных обусловлено поеданием зеленой массы растений. По имеющимся данным, ²²⁶Ra в зеленой массе дикорастущих растений находится в обменном состоянии, связан с водорастворимыми минеральными и простыми органическими соединениями, образует подвижные органические комплексы, входит в состав труднорастворимых солей (карбонатов, сульфатов). Поведение Ra в растениях очень похоже на поведение его макроаналога Са, который находится в растениях в виде простых органических и минеральных кислот. В растительных пробах содержится несколько изотопов радия. Установлено, что распределение ²²⁸ Ra в почвах несколько отличается от 226 Ra (отношения концентраций этих радионуклидов по профилю изменяются от долей процента до 15). В аллювиальнолуговой и дерново-подзолистой почвах на глубинах 0-25 см прослеживается дефицит 228 Ra, а в нижележащих горизонтах концентрация ²²⁸Ra, напротив, превышает концентрацию ²²⁶Ra. Характер распределения ²²⁴ Ra отличен от такового для ²²⁶ Ra, но сходен с 228 Ra. В верхних горизонтах почв (до 25 см) ощущается дефицит ²²⁴Ra по отношению к ²²⁸Ra, а в нижележащих горизонтах их отношения близки к равновесному. Эти данные позволяют предполагать, что в растениях следует ожидать наряду с ²²⁶Ra присутствия ²²⁸Ra и ²²⁴Ra.

Уран. Анализ изотопного состава в почвах на исследуемом участке выявил явный избыток ²³⁴U над ²³⁸U, что было объяснено привносом ²³⁴U пластовыми водами. Изотопный анализ надземных частей различных видов растений показал, что концентрации ²³⁸U в них могут отличаться в 23 раза, а ²³⁴U — в 36 раз. Между содержаниями этих изотопов в различных органах растений существует хорошая корреляция, которая позволяет говорить о том, что оба изотопа мобилизуются растениями из минеральной части почв. По степени содержания изотопов U изученные растения можно расположить в следующем порядке: тысячелистник обыкновенный, мышиный горошек, осот розовый, осока водная. Несколько необычным оказалось выявленное превышение в растениях концентрации ²³⁸U по сравнению с ²³⁴U (табл. 2).

Торий. На исследуемых участках представлен всеми существующими в природе изотопами: ²³²Th, ²³⁰Th, ²²⁸Th, ²²⁷Th. Концентрация ²³²Th в аллювиально-луговой и дерново-подзолистой почвах составляет 0,2—1,1 пКи/г золы. Количество ²³⁰Th в аллювиально-луговой почве значительно выше (1,2—130 пКи/г золы), причем максимум приходится на слой 0/10 см. Скорее всего, увеличение концентрации ²³⁰Th в верхних горизонтах почвы— результат его привноса с пластовыми водами. Концентрация ²²⁸Th тоже повышена по сравнению с ²³²Th и составляет в профиле аллювиально-луговой почвы 1,5—172 пКи/г золы с максимумом в гумусовых горизонтах. Повышение концентра-

ции ²²⁸Th по сравнению с материнским ²³²Th в верхних горизонтах почв отражает привнос с пластовыми водами ²²⁸Ra, предшествующего ²²⁸Th в радиоактивной цепочке распада ториевого ряда. Растения, произрастающие на участках, усваивают все изотопы Th, но концентрация их в растениях различна. Так, содержание ²³²Th в растениях примерно равно содержанию ²³⁸U, а концентрация ²³⁰Th может быть в десятки раз выше концентрации ²³²Th и примерно равна концентрации ²²⁸Th. В то же время содержание ²²⁸Th в растениях примерно равно содержанию ²²⁴Ra, несмотря на значительные различия в интенсивности их накопления.

Радон и продукты распада. Концентрации ²²²Rn в надземной части растений превышают концентрации 226 Ra в среднем в 2— 8 раз (табл. 3), что убедительно свидетельствует о самостоятельном корневом поступлении ²²²Rn в растения [15]. В отличие от ²²²Rn, ²²⁰Rn (торон), имея период полураспада 55 с, образуется в растениях преимущественно из ²²⁴Ra, концентрация которого в отдельных случаях может быть также значительно выше концентрации ²²⁶Řа. Выявленное корневое поступление ²²²Rn в растения имеет большое значение для накопления радионуклида в период усиленной транспирации растений, поскольку повышенный ток воды через растение при сравнительно небольшой потребности его в минеральных веществах может привести к существенному накоплению в растениях продуктов распада Rn по сравнению с Ra. В этом отношении особый интерес представляют данные о поступлении в растения ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po, которые относятся к долгоживущим продуктам распада ²²²Rn.

Свинец и полоний. Расчеты, сделанные на основании содержания этих радионуклидов в растениях (табл. 4), показывают, что объяснить эти концентрации только за счет поступления в растения ²²²Rп невозможно. Следовательно, в растения они поступают самостоятельно главным образом через корневую систему, о чем говорит преимущественное накопление в растениях ²¹⁰Ро, который является дочерним по отношению к ²¹⁰Рb. Такое различие в накоплении Рb и Ро объясняется, по-видимому, дискриминационными механизмами и повышенным содержанием в окружающей среде стабильного Рb.

Накопление радионуклидов полевками-экономками

Специфика поступления радионуклидов в организм исследуемых диких полевок заключается в том, что они постоянно питаются растительной пищей, произрастающей на почве с повышенным содержанием радионуклидов. Это определяет своеобразие форм поступления радионуклидов и равномерность хронического поступления в организм, начиная с эмбрионального

состояния, поскольку плацента не является достаточно надежным барьером [6]. Содержание радионуклидов в эмбрионах полевок с радиоактивного и контрольного участков практически не отличалось. Как и следовало ожидать, интенсивное поступление радионуклидов происходило преимущественно в процессе онтогенеза.

Радий. Значительное поступление Ra наблюдалось в период кальцинирования костной матрицы, поскольку оба элемента (Са и Ва) относятся к щелочно-земельной группе, а Са выполняет роль химического макроаналога Ra [7]. С возрастом, повидимому, происходило увеличение дискриминации Ra по сравнению с Са, что привело к уменьшению накопления Ra [9]. Эксперимент, поставленный для проверки особенностей накопления Ra молодыми и старыми морскими свинками, получавшими траву, скошенную на радиоактивном участке, показал значительные различия в накоплении взрослыми и родившимися в ходе эксперимента животными. При этом увеличение радий-кальциевого отношения происходило также по линейному закону, только примерно в два раза медленнее. Это вполне закономерно, поскольку при всасывании из желудочно-кишечного тракта происходит дополнительная дискриминация, обеспечивающая лучшее всасывание Са. Об этом свидетельствует, в частности, выявленное увеличение (примерно двукратное) радийкальциевого отношения в фекалиях морских свинок по сравнению с рационом:

Проба	n·10 ^R a, золы	Са, n·10 ⁻² г/г золы	Ra/Ca, 10-10
Рацион	$5,78\pm0,73$	$3,6\pm0,3$ $5,5\pm0,2$ $21,2\pm5,3$	4,46±3,30 9,10±1,20 0,22±0,04

Результаты анализа объединенных проб диких полевок, обитающих на двух радиоактивных участках, показывают, что, несмотря на большие различия в содержании радия в костной ткани, шкурке и эмбрионах, величина радий-кальциевого отношения примерно одинакова (табл. 5). В то же время у морских свинок, которые содержались на радиоактивном рационе ограниченное время и были завезены во взрослом состоянии, радий-кальциевое отношение в кости примерно в 10 раз меньше по сравнению с мягкими тканями. Эти данные свидетельствуют о том, что поступление и накопление Ra в организме идет по кальциевому типу. Ra и Ca разносятся кровью по всем органам и тканям и затем накапливаются в скелете. При этом распределение Ra по глубине кости в принципе должно отражать динамику поступления Ra в организм в онтогенезе.

На основании данных радиохимического анализа накопле-

Таблица 4 Содержание 226 Ra, 210 Pb, 210 Po в растениях различных участков, пКи/г сыр. в.

Растение	*26Ra	210Pb	210PO	
Ура	но-радиевый у	часток		
Мать-и-мачеха	0,044 1,052 0,421 0,303	3,824 0,603 0,922 0,921	18,674 3,472 1,601 5,463	
•	Радиевый учас	ток		
Клевер луговой	0,424 0,172 0,281 0,043	- - -	0,045 0,165 0,038 0,096	

Таблица 5 Абсолютная и относительная концентрации Ra и Ca в тканях диких полевок и морских свинок

	-			
Проба	Қолич. животных	Ca, n·10-2	n·10 ^{Ra} ,	Ra/Ca. 10-13
	Пол	евки		
Костная ткань Шкурка Эмбрионы	96/82* 96/82 450/276	18,71/18,24 0,15/0,15 0,06/0,10	0,04/0,02	18,93/15,12 24,21/16,13 12,42/13,41
	Морские	свинки**		
Костная ткань черепа . Костная ткань конечно-	10	22,31	0,47	2,09
стей	10 10	15,42 0,03	0,29 0,01	1,90 20,03
Шкурка	10 10	0,04 0,01	0,09 0,01	23, 22 30,31
•		`		

^{*} В числителе — данные по радиевому участку, в знаменателе — урано-радиевому. ** Экспериментальные данные.

Таблица 6 Концентрация 220 Rn и 222 Rn в норках полевок на радиевом участке, $n \cdot 10^{-10}$ Ки/л

	220Rn		****Rn	
Место замера	$\overline{X}\pm m$	C _v , %	$\overline{X}\pm m$	C _v , %
Норка 1	$\begin{array}{c} 11,4\pm2,86 \\ 0,35\pm0,17 \\ 2,11\pm0,64 \\ 1,16\pm0,68 \end{array}$	84 123 61 140	$3,92\pm0,75$ $3,31\pm0,72$ $6,21\pm1,73$ $8,10\pm0,82$	66 49 56 23
Среднее по участку	6,23±1,65	135	4,61±2,21	240

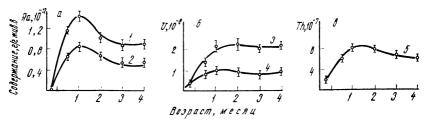


Рис. 1. Накопление Ra (a) U (б), Th (в) в организме полевок на урано-радиевом (1, 3) и радиевом (2, 4, 5) участках.

ния Ra дикими полевками (рис. 1) была получена зависимость накопления радионуклида с возрастом зверьков:

$$C_t = A(8t^3 - 56t^2 + 101t + 3),$$

где C_t — концентрация Ra, $n \cdot 10^{-14}$ г/г жив. в. в организме полевки в t-й возраст (мес); A — коэффициент пропорциональности.

Анализируя приведенный график накопления Ra в организме полевок, следует сказать, что мы не можем дать физиологического объяснения наблюдаемому падению концентрации радионуклида со временем. Вероятно, это объясняется тем, что в выборке более взрослых полевок больше мигрантов, что приводит к снижению среднего накопления на группу животных. Поэтому график отражает динамику накопления ²²⁶Ra группой животных, обитающих на участке.

Уран и торий. По данным радиохимического анализа, в органах и тканях полевок и морских свинок депонируется 232 Th, $n \cdot 10^{-7}$ г/г жив. в.:

Органы, ткань	Полевки- экономки	Морские свинки	Органы, ткань	Полевки- экономки	Морские свинки
Почки		0.267	Гонады		0,444
Печень	0.075	0,010	Мышцы	0,262	0,030
Легкие	0,023	0,022	Жир	´—	0,009
Сердце	· 	0,007	Шкурка	0,238	0,022
Головной		•	Скелет	18,700	16,0
мозг	0,134	0,092			•

Это хорошо согласуется с литературными данными, согласно которым количество U и Th, накапливающееся в костях, зависит от формы его поступления [3, 4]. Действительно, у овец, выпасавшихся на Иссык-Кульских почвах, обогащенных U, наибольшее накопление U было зафиксировано в опорно-покровных тканях [5]. При пероральном введении 75—90 % резорбированного Th депонировалось в скелете и практически с возрастом не снижалось; при хроническом поступлении Th в естественных условиях основным местом накопления был также скелет [11, 12].

Уровни накопления U и Th в организме полевок определяются величиной концентрации в рационе и дискриминацией при всасывании из ЖКТ. Динамика накопления ²³⁸U полевками (см. рис. 1) аналогична графику накопления ²²⁶Ra, однако при гораздо меньших уровнях накопления. Так, на участке с максимальным содержанием U в почве зафиксировано лишь четырехкратное накопление U по сравнению с концентрацией у эмбрионов. Уравнение, описывающее график группового накопления ²³⁸U, имеет следующий вид:

$$C_t = A(0.91t^3 - 7.39t^2 + 17.92t + 9.2),$$

где C_t — концентрация $^{238}{
m U}$ в организме полевок, п $\cdot 10^{-9}$ г/г жив. в.

Наблюдаемое понижение концентрации урана у полевок старше одного месяца, по-видимому, связано с увеличением иммиграции животных и отражает, как в случае с радием, динамику накопления урана группой полевок.

Динамика изменения концентрации тория с возрастом полевок примерно такая же, как для урана, но при несколько большей кратности накопления:

$$C_t = A(0.5t^3 - 3.8t^2 + 7.6t + 3.9),$$

где C_t — концентрация Th, $n \cdot 10^{-7}$ г/г жив. в.

Свинец и полоний. Поступление этих радионуклидов в организм животных может происходить как по пищевой цепи, так и через дыхательные пути (задержка в легких продуктов распада радона и дальнейший их распад до ²¹⁰Pb). Однако расчеты показывают, что второй путь поступления не обеспечивает тех концентраций ²¹⁰Pb, которые дают результаты радиохимического анализа. Кроме того, и в растениях, и в животных иногда наблюдались значительно большие содержания ²¹⁰Po по сравнению с ²¹⁰Pb, что возможно только при самостоятельном поступлении этих радионуклидов через трофические связи. Радиохимическое определение ²¹⁰Pb и ²¹⁰Po в органах и тканях морских свинок, содержащихся на рационе, где концентрация ²¹⁰Pb составляла 0,021—1,84, а ²¹⁰Po—0,436—5,65 пКи/г жив. в., показало в отдельных органах значительное превышение содержания ²¹⁰Po по сравнению с ²¹⁰Pb:

Орган, ткань	210 Po	210Pb	Po/Pb
Тушка	$0,31 \pm 0,03$	$0,086 \pm 0,008$	$3,58 \pm 0,42$
Почки	$1,41 \pm 0,16$	$0,082 \pm 0,002$	$27,8\pm7,1$
Печень	$1,14\pm0,06$	$0,053 \pm 0,008$	$14,9 \pm 3,1$
Шкурка	$0,40\pm0,06$	$0,103\pm0,015$	$3,90\pm0,62$
Мышцы	$0,13\pm0,02$	$0,034 \pm 0,043$	$3,60\pm0,36$
Скелет	$0,43 \pm 0,07$	$0,291 \pm 0,016$	$1,32 \pm 0,27$

Так, концентрации ²¹⁰Ро в почках и печени морских свинок были соответственно в 27 и 14 раз больше, что хорошо объясняется различными путями распределения в организме этих радионуклидов. Подобное сравнение концентраций в органах и тканях морских свинок и полевок, обитающих на радиоактивном участке более продолжительное время, обнаруживает примерно одинаковое содержание ²¹⁰Ро, что свидетельствует о неспособности радионуклида накапливаться в организме за счет его хорошего выведения.

Наибольшее абсолютное содержание ²¹⁰Ро зафиксировано в тканях, обладающих большей массой:

	(онцентра- ия, пКи/г	Содержан ие, пҚи	Доля, % к об- щему содержанию в животном
Почки	$,60\pm0,17$ $,41\pm0,13$ $,29\pm0,03$	0.98 ± 0.25 0.07 ± 0.02 0.99 ± 0.23 9.27 ± 0.01 1.07 ± 0.14	$4,45\pm1,73$ $0,47\pm0,28$ $5,46\pm1,62$ $9,64\pm0,03$ $10,64\pm1,60$

Радон, торон и продукты их распада достаточно интенсивно поступают в организм животных главным образом при дыхании. Радон и торон, являясь инертными газами, легко поступают в кровь и разносятся по всему организму. Имея сравнительно большой период полураспада (3, 7 сут), радон постепенно насыщает организм. Предельное насыщение наступает в момент, когда концентрация радона в 1 см3 организма равна концентрации в 1 см3 вдыхаемого воздуха [1, 19]. Торон, имея период полураспада 56 с, в значительной степени распадается в организме, и для него вводят коэффициент задержки, равный 0,35 [19]. Большое количество короткоживущих продуктов распада радона и торона, связанных с аэрозолями воздуха, оседает в легких, где они практически полностью распадаются. Поступление продуктов распада радона и торона определяется концентрацией газообразных радионуклидов в атмосферном воздухе и равновесностью между материнскими и дочерними [19, 14]. Равновесность (no радионуклидами активности), в свою очередь, определяется скоростью вентиляции норок, в которых обитают полевки. Поскольку в настоящее время нет методов, позволяющих экспериментально определять поступление газообразных радионуклидов и продуктов их распада в организм диких полевок в природных условиях, мы использовали расчетный метод, основанный на расчете поступления радионуклидов в организм полевок, по данным замеров концентрации радона и торона в норках грызунов и их равновесности с продуктами распада [17]. Следует отметить большую вариацию содержания газообразных радионуклидов в воздухе норок (табл. 6) как во времени (замеры в отдельных норках), так

и по площади (среднее значение в норках по участку). Вариация во времени обусловлена изменением условий эсгаляции газообразных радионуклидов в воздух, а по площади связана с неравномерностью загрязнения участка. Поэтому расчеты, сделанные на основании замеров газообразных радионуклидов в норках грызунов, характеризуют не отдельное животное, а целую группу полевок, и при изучении биологического действия их следует сопоставлять с групповым эффектом.

Дозы облучения полевок-экономок за счет накопления инкорпорированных радионуклидов

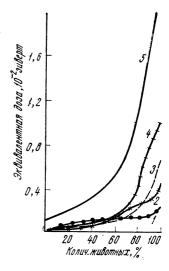
Если токсическое действие химических элементов, содержащихся в организме, определяется концентрацией, то для радионуклидов его обычно связывают с дозой облучения, т. е. поглощенной энергией ионизирующего излучения. Сравнительная оценка облучения полевок различными радионуклидами показывает, что наибольший вклад вносят газообразные радионуклиды ²²²Rn, ²²⁰Rn и продукты их распада, ²¹⁰Po, ²²⁶Ra и ²³²Th. Согласно расчетам, наибольшая доза облучения приходится на легкие за счет поступления короткоживущих продуктов распада газообразных радионуклидов. Из других органов (тканей) относительно большую дозу получают скелет и почки. Поскольку облучение полевок природных популяций является многокомпонентным, а сами компоненты в силу специфики их формирования независимы, точный расчет дозы на каждого отдельного зверька оказывается невозможным. Более реальной величиной следует считать диапазон доз для группы животных, обитающих на описываемых участках. Распределение дозы облучения от различных компонент, расположенных в порядке возрастания, показывает, что суммарная доза облучения полевок-экономок на участках может изменяться в 20-кратном интервале от 0,1 до 2 сЗв/мес (рис. 2). Реальные дозы при этом будут находиться в промежутке между данными значениями.

Заключение

Природные популяции полевок, обитающие на участках с повышенной естественной радиоактивностью, подвергаются одновременному действию различных радионуклидов, относящихся к радиоактивному семейству ²³⁸U и ²³²Th. Распределение, концентрация и изотопный состав радионуклидов в среде обитания полевок зависят от генезиса исследуемых участков, что в значительной мере определяет поступление их в организм зверьков. Основным путем попадания радионуклидов в организм полевок является поступление их с пищей, а накопление в легких осуществляется главным образом через дыхательные пути. Радио-

рис. 2. Распределение эквивалентной дозы 226 Ra (1), 210 Po (2), внешнего у-облучения (3) м 222Rn (4). 5 — суммарная доза на группу одномесячных полевок.

химический анализ растений на радиоактивных участках выявил отличия в накоплении изотопов одного и того же элемента, что обусловлено различием содержания и форм их нахождения в почве. В связи с этим содержание радиоэлементов в растительных и животных пробах без учета их изотопного состава не может дать реальной картины влияния радионуклидов на биообъект. Большое значение на величину накопления радионуклидов растениями и животными оказыва-



ют их химические макроаналоги. Накопление U, Th, Ra в организме полевок определяется содержанием радионуклидов в пище физиологическими особенностями животных. и возрастными U, Th, Ra, Pb накапливаются главным образом в скелете, Po сосредотачивается в мягких тканях. Значительного накопления радионуклидов в мягких тканях не обнаружено. Газообразные ²²²Rn и ²²⁰Rn, поступающие в организм полевок в основном при дыхании, распределяются в нем равномерно. Их короткоживущие продукты распада задерживаются в легких, формируя значительные дозы α-облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С. В. Энергия излучения, поглощаемая организмом человека при вдыхании воздуха и питье воды, обогащенных родоном.— Мед. ра-

диология, 1962, вып. 8, с. 40—46. 2. Груздев Б. И., Маслов В. И., Маслова К. И. и др. К вопросу об эффективности дезактивации радиевых загрязнений насыпным методом. — В кн.: Материалы радиоэкологических исследований в природных биогеоценозах. Сыктывкар, 1971, с. 77—90. 3. Гуськова В. Н. Некоторые данные по определению биологических

констант растворимых соединений урана в эксперименте на белых крысах.—

Гигиена и санитария, 1966, вып. 11, с. 36-45.

4. Закутинский Д. И., Андреева О. С. Токсикология урановых

соединений. — Мед. радиология, 1966, вып. 4, с. 75—78.

5. Қовальский В. В., Воротницкая И. Е., Лекарев В. С., Никитина Е. В. Урановые биохимические пищевые цепи в условиях Иссык-Қульской котловины. М., 1968, т. 8, с. 76-87. (Труды биохимической лаборатории; Т. 8).

6. Курляндская Э. Б. Влияние U₃O₈ на организм беременной самки и плода. В кн.: Материалы по токсикологии радиоактивных веществ. М.,

1964, c. 98—115.

7. Любашевский Н. М. Метаболизм радиоизотопов в скелете позвоночных. М.: Наука, 1980. 213 с.

8. Монсеев А. А., Маслов В. И., Тестов Б. В., Овченков В. Я. Дозовая нагрузка на мышевидных грызунов, обитающих на участках повышенной естественной радиоактивности. М.: Атомиздат, 1973. 30 с.

9. Москалев Ю. И. Опыт распределения изотопа радия-тория-X.—

В кн.: Распределение и биологическое действие радиоактивных изотопов.

M., 1964, c. 48-56.

10. Овченков В. Я. Миграция радия из мест его концентрирования в природных условиях. В кн.: Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах. М., 1972, с. 147-153.

11. Павловская Н. А. Естественное содержание и распределение тория в организметеловека. Мед. радиология, 1956, т. 9, вып. 5, с. 29-36.

12. Павловская Н. А. Накопление и распределение изотопов тория в организме человека и животных. - Гигиена и санитария, 1969, т. 12, вып. 4, c. 17-26.

13. Русанова Г. В. Некоторые особенности распределения и миграции радия в почвах района повышенной естественной радиоактивности: Автореф. дис. ...канд. биол. наук. Сыктывкар, 1968, 22 с.

14. Сердюкова А. С., Капитонов Ю. Т. Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе. М.: Атомиздат, 1969. 295 с.

15. Таскаев А. И., Тестов Б. В., Попова О. Н. Особенности поступления ²²⁶Ra, ²²⁴Ra, ²²²Rn в растения.— В кн.: Биологические исследования на северо-востоке Европейской части СССР. Сыктывкар, 1974, с. 109—115.

16. Таскаев А. И., Алексахин Р. М., Шуктомова И. И. Метоло. Таскаев А. И., Алексахин Р. М., Шуктомова И. И. Методика определения нуклидного состава U и Тh в почве с их кларковым содержанием.—В кн.: Тезисы докладов V съезда Всесоюзного общества почвоведов. Минск, 1977, с. 148—149.

17. Тестов Б. В. Влияние экологического фактора на накопление и

распределение радионуклидов в организме полевок и дозы их облучения в условиях повышенной радиоактивности: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1974. 19 с.

18. Шведов В. П. Свойства радиоактивных изотопов, находящихся во внешней среде. В кн.: Радиоактивное загрязнение внешней среды. М.:

Госатомиздат, 1962, с. 132—139.

19. Pohl E., Pohl-Rulling J. The radiation dose received by inholation of air containing ²²²Rn, ²²⁰Rn, ²¹²Pb and their products.— An. Acad. Brasil. Cie., 1967, vol. 39, p. 393—404.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

В. С. БЕЗЕЛЬ, И. Е. БЕНЕНСОН, О. Ф. САДЫКОВ

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ НА ДИНАМИКУ ЧИСЛЕННОСТИ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В МОЗАИЧНЫХ МЕСТООБИТАНИЯХ

Учет фактора мозаичности или пространственно-временной гетерогенности среды обитания — один из наиболее перспективных подходов в развитии и совершенствовании популяционной теории, в частности моделирования динамики популяций животных при антропогенных воздействиях [3]. Полученные в последнее время экспериментальные данные по пространственной структуре и динамике населения мелких млекопитающих в мозаичных биотопах Уральских гор [4,5] свидетельствуют о необходимости существенных изменений в самой методологии рассмотрения таких объектов, как популяции позвоночных. Они имеют сложную пространственную структуру, и по этой причине антропогенные и естественные экологические факторы, проявляющие прерывистость в пространственной реализации, дифференцированно влияют на различные структурные группы популяции. Результат такого рода воздействия практически невозможно прогнозировать и оценивать вне пространственного подхода к проблеме [3].

В последнее время внепространственные точечные модели, описывающие динамику популяций и сообществ под влиянием различного рода эндогенных и экзогенных факторов, изучены в общей аналитической форме достаточно полно [2, 6, 8]. Но многие важные вопросы экологии популяций и сообществ, требующие для своего решения учета пространственных связей исследуемых биосистем и их элементов, оказались недостаточно исследованными. Прежде всего это относится к моделированию популяционной динамики животных, способных к значительным и направленным перемещениям в пределах занимаемой популяцией территории. Установленная сложная пространственная структура популяций мелких млекопитающих [5, 7] и характерная для них высокая подвижность и миграционная активность не позволяют нам надеяться на адекватное описание их популяционной динамики точечными моделями. Это положение справедливо как в отношении использования точечных

моделей для описания динамики локальных группировок на том или ином конкретном участке, так и в отношении описания динамики популяции в целом, когда предполагается равномерное размещение животных по территории в каждый момент времени [3].

Обычное разделение используемых для описания популяционной динамики моделей на аналитические и имитационные особенно ярко проявляется при рассмотрении пространственных моделей популяций. Аналитические модели практически всегда строят на основе описания пространственных перемещений организмов как случайной диффузии, исходя из предположения, что у животных нет «памяти» и внутреннего стремления к перемещениям. В отношении к млекопитающим эти условия невыполнимы. По этой причине для изучения популяционных реакций на техногенное загрязнение среды мы использовали пространственную имитационную модель [1], которая учитывает специфику использования животными жизненного пространства, связанную с активным выбором участков для размножения, устройства убежищ, мест кормежки и перемещения. Используемая модель учитывает знание животными больщой территории вокруг постоянного места обитания и их способность к быстрым и далеким пространственным перемещениям.

Цель статьи — дать анализ влияния реальных источников техногенного загрязнения на популяции мелких млекопитающих в мозаичных биотопах. При этом неравномерность действия поллютантов из-за особенностей мезорельефа и розы ветров мы рассматриваем как дополнительную предпосылку именно пространственного подхода к изучению техногенного воздействия на популяцию, сообщества и экосистемы. Неравномерность размещения источников, наличие вокруг каждого из них нескольких зон с различной интенсивностью поражения, сложный характер наложения таких зон в крупных промцентрах и территориально-производственных комплексах могут и должны быть учтены при моделировании поведения сложных биосистем при комплексной техногенной нагрузке.

Рассмотрим вкратце основные положения использованной модели.

1. Популяция мелких млекопитающих базируется на одной или нескольких стациях резервации, условия существования в которых оптимальны. Резервации окружены стациями несколько худшего качества, но также обеспечивающими нормальное течение процессов воспроизводства в популяции. Значительные по площади зоны плохого качества имеют ограниченное значение для воспроизводства вида.

Таким образом, рассматриваемая территория подразделена на несколько зон, которые в различной мере пригодны для существования мелких грызунов. Соответствующие конкретной зоне условия обитания определяют выживаемость, интенсив-

ность и продолжительность размножения приуроченной к ней группировки, а также допустимую предельную плотность заселения особями исследуемого вида животных. Примем в дальнейшем, что наилучшие условия существования в стациях, обозначенных нами СТ-1, несколько худшие — в стациях СТ-2, еще более неблагоприятные — в буферной зоне. Для упрощения самцы в модели не учитываются.

- 2. Модель предусматривает наличие нескольких зон и буфера, куда происходит выселение животных из других зон при достижении критической плотности. Принципиальное отличие буферной зоны состоит в том, что в ней невозможно размножение зверьков. Взрослые животные «знают» всю популяционную территорию и при достижении критической плотности в зоне первого типа (Ст-1) «лишние» животные имеют возможность за один временной шаг переместиться в местообитание, соответствующее второму типу (Ст-2), или в буферную зону. Если по какой-либо причине плотность в стации Ст-1 стала ниже критической, а стация Ст-2 и буферная зона обитаемы, то освободившиеся участки мгновенно заполняют особи из этих зон.
- 3. В каждой стации животные подразделены на четыре функционально-возрастных группы, различающиеся стадиями онтогенеза и характером участия в размножении: неполовозрелые особи (juv), половозрелые, не участвующие в размножении (sad), половозрелые размножающиеся (ad), беременные самки (pr).
- 4. Как было показано [1], сравнительное «качество» зон разного типа удобно характеризовать кратностью прироста численности в них за год. Этот интегральный популяционный показатель однозначно определяется по параметрам размножения и смертности животных (см. таблицу). В нашем случае они равны 2,0 и 0,9 для стаций Ст-1 и Ст-2 соответственно. Данные соотношения кратностей ежегодного прироста соответствуют соотношениям прироста населения популяционного ядра и прилежащих к нему субоптимальных стаций в годы со средними погодно-климатическими условиями [1].
- 5. В качестве примера примем, что популяционное ядро (Ст-1) занимает площадь 5 га, субоптимальные местообитания (Ст-2) 20 га, буферная зона 75 га. Основные демографические параметры моделируемой популяции соответствуют условиям обитания красной полевки в районе массива на Южном Урале (см. таблицу).

Было рассмотрено несколько вариантов воздействия техногенного загрязнения на внутрипопуляционные территориальные группировки, приуроченные к разным по качеству стациям, и на

популяцию в целом.

Вариант І. Имеются лишь стация Ст-1 и буферная зона. Токсический элемент действует в пределах зоны Ст-1, снижая среднюю плодовитость зверьков с 3,5 до 2,0. В результате чис-

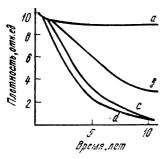
Демографические параметры модельной популяции и характеристика зон обитания

_		Зона обитан	кя
Параметр	Ст-1	Ст-2	Буфер
ыживаемость зверьков			
за месяц			
летом juv	0,43	0,38	
sad	0,73	0,69	0,69
ad	0,83	0,78	0,03
pr	0,83	0,78	_
зимой	•	1	
juv	0,43	0,38	_
sad	0,73 0,73	0,69	0,40
ad	0,73	0,69	-
pr	0,73	0,69	_
ритические плотности			
расселения зверь- ков, шт/га			
sad+ad+pr			
летом	· 3 0	20	0
зимой	60	40	Ŏ
ad + pr			_
летом	20	10	0
зимой	0	0	0
сло самок в помете,			
шт			
на чистой террито-	3,5	3,5	0
на «загрязненной»	2,0	2,0	ŏ
атность прироста чис-	2,0	2,0	. "
ленности за год			
(при низкой весен-			
ней численности) .	2,0	0,9	
ощадь зон, га	5,0	20,0	75,0

ленность грызунов к концу десятилетнего периода токсического воздействия снижается в 20 раз (рис. 1, d).

Вариант II. Наличие на той же территории второй стации, не подвергающейся токсическому воздействию, обеспечивает лишь незначительное и кратковременное поддержание численности зверьков в стации Ст-1. Затем численность популяции выходит на тот же уровень, что и в варианте 1 (рис. 1, c). Таким образом, локальное воздействие загрязнителя на ядро популяции (Ст-1) приводит к значительному опустошению смежных территорий, не подверженных токсическому воздействию (рис. 1, c).

Вариант III. Воздействие техногенного загрязнения на большую территорию второстепенных стаций (Ст-2), реализованное в таком же снижении плодовитости (с 3,5 до 2,0), приводит



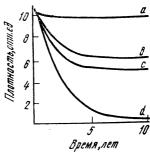


Рис. 1. Динамика средней плотности особей в стациях и плотности отдельных стаций для различных вариантов (объяснения в тексте).

Рис. 2. Динамика плотности животных в чистых $(a \ u \ c)$ и в загрязненных $(b \ u \ d)$ частях стаций Ст-1 (a, b) и Ст-2 (c, d).

почти к четырехкратному снижению численности зверьков в зоне. Однако в этом случае за счет постоянного притока мигрантов из Ст-1 численность зверьков устанавливается на уровне, почти в четыре раза превышающем полученный в варианте ІІ, при воздействии токсического агента на ядро популяции (ср. рис. 1, в, с). Отметим также, что численность зверьков в стации Ст-1 в данном варианте практически остается неизменной (рис. 1, а).

Вариант IV. Более реальной представляется ситуация, когда токсическому воздействию подвергается часть территории стаций обоего типа. В этом случае наблюдается закономерное снижение численности во всех стациях; максимальное — в загрязненной части стации Ст-2 (рис. 2, d); минимальное — в чистой части стации Ст-1 (рис. 2, a). Как в вариантах I и II, площадь зоны, в которой численность животных снижается, может значительно превышать загрязненную территорию. Так, в последнем варианте загрязнению подвергнуты 2,5 га и 10 га стаций Ст-1 и Ст-2, а значимые последствия этого воздействия (двукратное и более снижение численности) сказываются на площади 22,5 га. Лишь в незагрязненной части стации Ст-1 снижение численности незначительно.

Таким образом, рассматриваемые варианты техногенного загрязнения, учитывающие пространственное распределение стаций обитания мелких грызунов и полей загрязнения, убеждают нас в том, что последствия такого воздействия могут выходить за рамки зоны прямого токсического действия, оказывая значительное влияние на смежные территории.

Любое математическое моделирование неизбежно связано с существенным упрощением реальной ситуации. Тем не менее применение имитационной модели динамики численности популяции, учитывающей пространственную гетерогенность среды

обитания, для имитации условий техногенного загрязнения кажется нам оправданным и, вероятно, единственно возможным методом анализа действия поллютантов на природные популяции грызунов и получения данных, пригодных для средне- и долгосрочного экологического прогнозирования. Одновременно такого рода модели могут быть использованы и в целях экологической экспертизы проектов и связанного с этим экологического нормирования техногенной нагрузки на естественные экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бененсон И. Е., Садыков О. Ф. Пространственная имитационная модель популяции красной полевки. В кн.: Моделирование популяционной динамики мелких млекопитающих. Свердловск, 1985, с. 56-87.

2. Полуэктов Р. А., Пых Ю. А., Швытов И. А. Динамические модели экологических систем. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 288 с.

3. Садыков О. Ф., Бененсон И. Е. Актуальные проблемы моделирования популяционной динамики млекопитающих.— В кн.: Моделирование популяционной динамики мелких млекопитающих. Свердловск, 1985, с. 3—35.

4. Садыков О. Ф. Пространственная структура горных популяций полевок рода Clethrionomys. В кн.: Популяционная экология и морфоло-

гия млекопитающих. Свердловск, 1984, с. 20-36.

- 5. Садыков О. Ф., Большаков В. Н., Баженов А. В. Пространственная структура горных популяций лесных полевок. Экология, 1984, № 4, c. 58—64.
 - б. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических

сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с. 7. Флинт В. Е. Пространственная структура популяций мелких мле-

копитающих. М.: Наука, 1977. 182 с.

8. Okubo A. Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models. N. Y.: Springer, 1980. 254 p.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

И. А. БОГАЧЕВА

ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕКОМЫХ-ФИТОФАГОВ ОТ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ЛЕСНЫХ БИОЦЕНОЗОВ ФТОРОМ

Изучению воздействия промышленных, в том числе фторсодержащих, выбросов производственных предприятий на биогеоценозы или их отдельные растительные и животные компоненты посвящена в последнее время довольно обширная литература. Некоторые аспекты этой проблемы (например, пути проникновения фтора в организм и влияние на этот процесс различных факторов [7], содержание фтора в отдельных органах одного организма [14] и уровни его накопления разными видами животных и растений [15]) рассмотрены довольно подробно. Убедительно показаны и тенденции изменения числа видов разных экологических групп в биоценозах в зависимости от степени загрязненности последних фтором, а также связанные с этим закономерные изменения самих биогеоценозов [14, 16].

В то же время другие аспекты этой проблемы не получили пока однозначной трактовки. Таков, в частности, вопрос о численности насекомых-фитофагов при разных уровнях загрязненности биоценозов фтором, привлекший внимание большого числа исследователей. Значительное число работ выполнено на базе лесных биогеоценозов, расположенных в зоне промышленных предприятий. Однако если одни авторы сообщают, что численность видов фитофагов по мере увеличения загазованности резко падает [6, 9], то другие отмечают массовое размножение лесных вредителей в местах, подвергшихся действию фтористых выбросов [1]. При этом довольно трудно сравнивать данные по разным группам насекомых.

Исследуя влияние фтористых выбросов на комплексы членистоногих в березовых лесах Среднего Урала, мы пришли к следующим выводам. Действие уровня загрязнения территории фтором на численность насекомых-фитофагов не является однонаправленным. Фтор, с одной стороны, оказывает непосредственное отрицательное влияние на их численность (рис. 1, линия АВ), с другой — отрицательно влияет и на кормовые объекты насекомых-фитофагов — растения. А поскольку ослабление растений в связи с уменьшением их способности противостоять

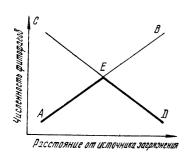


Рис. 1. Теоретическая схема изменения численности фитофагов по мере удаления участка от источника загрязнения.

действию фитофагов благоприятно для насекомых [11], то численность последних по мере приближения к источнику загрязнения должна повышаться (рис. 1, линия $C\mathcal{L}$). Результирующее влияние двух противоположно направленных тенденций

выражается в том, что кривая численности насекомых-фитофагов по мере увеличения концентрации фтора должна идти сначала вверх, а затем вниз (рис. 1, линия $AE\mathcal{I}$).

Вполне понятно, что приведенные выше теоретические соображения имеют отношение не только к фтористым загрязнениям. Это могут быть другие виды загрязнений и вообще любые факторы, которые одновременно неблагоприятно действуют как на самих фитофагов, так и на их кормовые объекты.

Подобную картину можно проиллюстрировать на примере лесных вредителей разных экологических групп. До сравнительно недавнего времени было принято разделение их на «первичных» и «вторичных»; к первым относили листогрызущих, ко вторым — стволовых вредителей. Считалось, что между ними имеется четкое различие, заключающееся в том, что «первичные» вредители могут нападать на здоровые, неослабленные деревья, в то время как «вторичные» — лишь на ослабленные по тем или иным причинам. Исследования 50-70-х годов показали, что это различие не абсолютно. С одной стороны, оказалось, что диапазон ослабления дерева, необходимый для различных видов «вторичных» вредителей, весьма широк. Кроме того, было доказано, что некоторые виды «вторичных» вредителей в фазе имаго выступают как «первичные», ослабляя деревья и таким образом подготавливая благоприятную почву для будущего потомства [8]. С другой стороны, «первичным» вредителям также благоприятствует определенная степень ослабления кормового растения. Таким образом, граница между «первичными» и «вторичными» вредителями потеряла свою четкость, и лучше говорить о группах листогрызущих насекомых (филлофагов) и стволовых вредителей (ксилофагов).

Рассмотрим сначала ксилофагов. Их массовое размножение начинается при такой степени ослабления хвойных пород, при которой отмирают отдельные ветки деревьев [1, 2]. Однако эти условия складываются в некотором отдалении от источника загрязнения. В более загрязненной зоне, где степень отмирания деревьев выше, кормовая база используется ксилофагами далеко не полностью и массовых размножений уже не наблюдает-

ся [9], так как здесь преобладает токсический эффект фтористых выбросов. Таким образом, материалы нескольких авторов, будучи сведены в единую картину, дают возможность проследить наличие именно такой зависимости численности ксилофагов от степени загазованности терригории, которая была показана выше. Для филлофагов эта форма зависимости также продемонстрирована; показано [12], что наибольшее повреждение хвои сосны *Pinus contorta* четырьмя видами насекомых приходится на участки со средней концентрацией фтора в хвое.

Разнобой в литературных данных по обсуждаемому вопросу объясняется тем, что, беря пробы вдоль трансекты в направлении от источника загрязнения, исследователь в зависимости от выбора места проб может проследить лишь часть кривой динамики численности — восходящую или нисходящую ее ветвь. Если же использовать не трансекту, а сравнение загрязненного и контрольного (свободного от фтора) участков, то в зависимости от уровня загрязнения фтором может быть получен любой результат — более высокая или более низкая численность насекомых-фитофагов по сравнению с контролем.

Мы считаем, что при изучении этого вопроса наиболее подходит метод трансект. Следует, однако, помнить о том, что на численность насекомых оказывает воздействие целый ряд факторов, нам же требуется проследить действие только одного из них. Одновременное взятие проб позволит избавиться от разногодичной сезонной изменчивости. Несколько сложнее обстоит дело с фенологическими различиями в сезонной динамике численности, которые бывают довольно высокими в сильно пересеченной местности. Если пробы, многократно повторяющиеся в течение сезона, нежелательны, то их берут в конце вегетационного сезона, причем объектом изучения следует выбирать не самих насекомых, а оставляемые ими повреждения. В этом случае исследователь имеет в своем распоряжении картину, как бы суммирующую все происходящее в течение целого вегетационного сезона, что нивелирует возможные фенологические различия.

Еще сложнее обстоит дело с локальной изменчивостью, которая у насекомых бывает очень высокой [4]. Обусловливается она различиями, которые обязательно будут иметься в рельефе выбранных площадок, их почве, растительности и т. д. Необходимо, чтобы выбранные площадки были по возможности более сходными. Однако как бы тщательно мы ни выбирали площадки, между ними обязательно останутся различия, имеющие отношение к уровню численности насекомых. Наконец, имеется и просто случайная изменчивость. Частично компенсировать влияние как локальных, так и случайных различий можно лишь путем увеличения числа площадок.

Работы по изучению воздействия фтористых загрязнений на комплексы членистоногих в березовых лесах Среднего Урала

мы проводили на базе Полевского криолитового завода. Для изучения был выбран комплекс членистоногих — обитателей березового леса. Работу вели в основном методом трансект. Поскольку березовый лес — один из наиболее распространенных биоценозов Свердловской области, то вдоль трансекты нетрудно было подобрать площадки, сходные по рельефу и составу растительности всех ярусов. В 1982 и 1983 гг. были заложены шесть таких площадок на расстоянии 3,0; 4,5; 6,5; 9,0; 11,5 и 14,0 км от источника загрязнения.

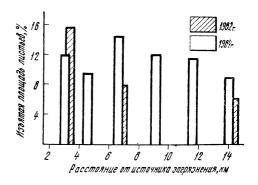
Представление о населении березовых крон, в том числе и о березовых фитофагах, было получено методом энтомологического кошения. Оно проводилось на нижних ветвях берез и на березовом подросте. В 1982 г. такое обследование было проведено 16 июня и 27 июля, в 1983 г.— 15 июня и 1 августа, т. е. практически в одни и те же календарные сроки. Объем пробы, взятой на каждой площадке, составлял 25 взмахов сачком. Было выявлено, что основными грызущими филлофагами являются: чешуекрылые сем. Geometridae (около 10 видов, до 5 экз/пробу) и Drepanidae (Drepana falcataria, до 7 экз/пробу), а также Microlepidoptera (до 4 экз/пробу); слоники Polydrusus sp. (до 3 экз/пробу), а также пилильщики Tenthredinidae (до 5 экз/пробу). Меньшее значение в качестве потребителей березовой листвы имели также чешуекрылые сем. Noctuidae, Notodontidae и Orgyidae, встречающиеся единично; жесткокрылые сем. Chrysomelidae и Attelabidae, пилильщики Cimbicidae. Массовых размножений в годы изучения не наблюдалось. Более высокой, как обычно, была численность популяций сосущих фитофагов — Ноmoptera (тли, цикадки) и Hemiptera. Это естественно, так как дерево может выдержать высокую плотность сосущих фитофагов без заметного вреда для себя [13]. Численность тли (два вида) доходила до 182 экз/пробу, цикадок (восемь видов) до 60 экз/ пробу, клопов (пять видов) — до 12 экз/пробу. Из других групп фитофагов в кронах берез встречались минирующие насекомые (в основном Lepidoptera) и семяеды (Apion sp.).

В конце вегетационного сезона 1982 и 1984 гг. было определено потребление листьев березы листогрызущими насекомыми и минерами. Для этого с каждой площадки брали пробу, содержащую около 1000 листьев, и производили оценку по методике, описанной нами ранее [3]. Суть этой методики состоит в следующем. Сначала проводится оценка повреждений каждого листа балльным методом, затем цена каждого балла выражается в процентах изъятой площади листа, и далее производится перевод балльной оценки всей пробы в проценты изъятой площади. Этот способ прост как для работы в поле, так и при дальнейшей лабораторной обработке собранных материалов, не требует фактически никакого оборудования и позволяет обрабатывать большой объем материала. Результаты представ-

лены на рис. 2.

рис. 2. Потребление листьев березы филлофагами на площадках, расположенных в направлении от источника загрязнения.

На основе данных 1984 г. ясно прослеживается кривая уровня численности насекомых, форма которой была ранее обоснована теоретически. Наивысший уровень чис-



ленности насекомых, судя по повреждениям листьев, достигался не в непосредственной близости от источника загрязнения, а в некотором отдалении от него. Однако и там этот уровень оставался в пределах, безопасных для лесных экосистем [11].

Другие группы лесных насекомых-фитофагов мы не изучали. однако, что повышение численности стволовых вредителей должно наблюдаться в зоне, более близкой к источнику загрязнения, так как для них необходима большая степень ослабленности деревьев [5]. При этой степени ослабления его признаки (отмирание отдельных ветвей) заметны уже визуально, так что нет смысла выбирать эту группу вредителей индикатором ослабления деревьев. Группа грызущих фитофагов, напротив, увеличивает свою численность еще при отсутствии видимых признаков ослабления деревьев и может служить первым сигналом такого ослабления. Для хвойных пород характерно такое же соотношение между их стволовыми и хвоегрызущими вредителями. Однако увеличение численности вредителей хвойных пород должно происходить в зонах, более далеких от источника загрязнения фтором, так как они более чувствительны к такого рода загрязнениям, чем лиственные породы [7, 10, 14].

Для изучения влияния фтористых загрязнений во временном аспекте было бы полезно сравнить между собой данные разных лет. Например, сопоставление данных 1982 и 1984 гг. (рис. 2) показывает, что зона наивысшей численности насекомых-филлофагов в 1984 г. отодвинулась дальше от источника загрязнения. Возможно, что в этом году к фтористым загрязнениям добавились еще какие-то факторы, неблагоприятные для растений (например, погодные условия). Правомерность такого вывода покажут дальнейшие исследования.

ЛИТЕРАТУРА

^{1.} Анисимова О. А. Особенности формирования экологических комплексов ксилофагов в лесах, ослабленных фтористыми выбросами алюминиевых заводов.— В кн.: Роль дендрофильных насекомых в таежных экосистемах. Дивногорск, 1980, с. 5—6.

2. Анисимова О. А., Соков М. К. Роль насекомых в древостоях, ослабленных токсичными выбросами алюминиевых заводов. В кн.: Влияние антропогенных и природных факторов на хвойные деревья. Иркутск, 1975, c. 61—84.

3. Богачева И. А. Упрощенный метод определения доли листовой поверхности, изъятой листогрызущими насекомыми. В кн.: Применение ко-

личественных методов в экологии. Свердловск, 1979, с. 110-116.

4. Богачева И. А. Состав группировок насекомых-фитофагов на некоторых древесных растениях Приобского Севера и его локальные различия. В кн.: Фауна и экология насекомых Полярного Урала. Свердловск, 1980, c. 45-68.

5. Васечко Г. И. Оценка роли факторов смертности в динамике численности короедов. В кн.: Чтения памяти Н. А. Холодковского. Л., 1981,

c. 54—91.

6. Волкова Л. М., Васильева Т. Г. Особенности биохимического состава листьев березы и ее энтомофауны в насаждениях, загазованных выбросами алюминиевых заводов. В кн.: Роль дендрофильных насекомых в таежных экосистемах. Дивногорск, 1980, с. 22—24. 7. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. М.: Мир, 1979. 200 с.

8. Исаев А. С., Хлебопрос Р. Г., Недорезов Л. В. Качественный анализ феноменологической модели динамики численности лесных насекомых: Препринт. Красноярск, 1979. 56 с.

9. Катаев О. А., Голутвин Г. И., Кондратьев В. И. Развитие стволовых насекомых в загазованных сосняках.—В кн.: Роль дендрофильных насекомых в таежных экосистемах. Дивногорск, 1980, с. 60—62.

10. Рамад Ф. Основы прикладной экологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 543 c.

11. Рафес П. М. Роль и значение растительноядных насекомых в лесу.

M.: Наука, 1968. 235 с.
12. Carlson C. E., Bousfield W. E., McGregor M. D. The relationship of an insect infestation on lodgepole pine to fluorides emitted from a nearby aluminium plant in Montana. Fluoride, 1977, vol. 10, N1,

13. Llewellyn M. The effects of the lime aphid, Eucallipterus tiliae L. (Aphididae), on the growth of the lime Tilia vulgaris Hayne I. Energy requirements of the aphid population.—J. Appl. Ecol., 1972, vol. 9, N 1, p. 261—282.

14. Murray F. Effect of fluorides on plant communities around an aluminium smelter.—Envir. Poll., Ser. A, 1981, vol. 24, p. 45—56.

15. Murray F. Fluoride cycles in an estuarine ecosystem.—Sci. total

Envir., 1981, vol. 17, p. 223-241.

16. Pandey G. P. A survey of fluoride pollution effects on the forest ecosystem around an aluminium factory in Mirzapur, U.P., India.— Environmental Conversation, 1981, vol. 8, N 2, p. 131-137.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

Е. И. СУХАЧЕВА

К ОБМЕНУ ХРОМА В ЖИВОТНОМ ОРГАНИЗМЕ

Соединения хрома нашли широкое применение в различных отраслях промышленного производства [1] и в медицине для диагностических целей [2]. Являясь жизненно важным микроэлементом, хром в небольших количествах постоянно присутствует в крови и тканях [12, 13], однако избыточное поступление его с водой, воздухом, пищевыми продуктами вызывает серьезные заболевания. Изучению токсикологии хрома посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов [1, 5, 13, 15]. В работах других авторов уточнены детали токсического действия металла на организм. При интратрахеальном поступлении соединений хрома развивается пневмосклероз, раковые новообразования [6, 9]. Внутрижелудочно введенный хром вызывает сдвиги функциональных и биохимических показателей, анемию, перерождение клеток паренхиматозных органов, склероз сосудов [5]. Возможен переход хрома через плаценту, материнское молоко [12].

Поведение хлорида хрома в организме после внутривенного введения определяется весовой дозой стабильного носителя; при дозах свыше 0,05 мг на крысу он преимущественно накапливается в органах ретикулоэндотелиальной системы [7]. При внутрижелудочном поступлении основное количество металла выделяется с калом, уровень всасывания его составляет от одного [14] до нескольких процентов [11], причем трехвалентный хром резорбируется в меньшей степени, чем шестивалентный. Имеются сведения о том, что у молодых особей он всасывается в больших количествах, чем у половозрелых и старых [10]. При интратрахеальном попадании наблюдали более быстрое выбывание из легких шестивалентного хрома по сравнению с трехвалентным [9]. По данным Л. А. Петросовой [4], кривая выбывания трехвалентного хрома из легких удовлетворительно описывается двухэкспоненциальным уравнением. Вместе с тем некоторые вопросы обмена хрома в организме остаются неясными. Так, почти неизвестно влияние весовой дозы хрома на величину его резорбции из кишечника, не изучен характер распределения резорбированной доли металла. Этим вопросам и посвящена работа.

Материал и методика

Опыты проводили на половозрелых крысах Вистар стадного разведения. Животным перорально вводили разные весовые количества шестивалентного хрома, меченого по хрому-51, из расчета 0,24—0,40 мБк на крысу в 0,4—1,0 мл раствора (рН 6,0) в виде хромата или бихромата натрия. Крыс содержали в обменных клетках, позволяющих собирать раздельно мочу и кал, и умерщвляли в разные сроки под эфирным наркозом. Ткани и кал высушивали или озоляли, растирали в порошок, из которого готовили пробы для радиометрии на стандартных алюминиевых тарелочках. Мочу вместе со смывами с клеток выпаривали до 25-30 мм, делали по две параллельных пробы. Кровь отбирали из нижней полой вены в гепаринизированные пробирки, центрифугировали при 3000 об/мин в течение 10 мин. Взвешенные или отмеренные образцы крови, плазмы, эритроцитов на стандартных тарелочках сушили на воздухе до постоянного веса.

Гельфильтрацию образцов плазмы проводили на сефадексе Γ -75 в колонках размером $1,2\times53,0$ см, элюировали трис-буфером (рН 7,4) со скоростью протекания 16 мл/ч, объем фракций элюата был 1,0-1,2 мл. Оптическую плотность элюата определяли спектрофотометром «Спектроном» (Венгрия) при длине волны 285 ммКм. Содержание хрома-51 в пробах пересчитывали на полный объем элюата, результаты выражали в процентах от внесенной в колонку активности.

Радиометрию всех проб тканей и экскретов проводили сцинтилляционным датчиком NaI(Tl) на установке Тесла (ЧССР). Содержание хрома-51 в образцах пересчитывали на всю ткань или объем и выражали в процентах от введенного крысе количества радиоизотопа. Результаты подвергали статистической обработке, достоверность различий устанавливали по t-критерию Стьюдента при 95-ном % уровне.

Результаты и обсуждение

Изучение дозовой зависимости величины всасывания шестивалентного хрома из желудочно-кишечного тракта проводили на самках крыс при пероральном введении доз от 0,00046 до 10,837 мг/кг массы тела в виде хромата натрия. О величине резорбции хрома-51 в кровь судили по уровню его выделения через почки (табл. 1). Достоверные различия в выделении радиохрома с мочой установлены лишь для доз 0,00096 и 0,41 мг/кг (P=0,005), т. е. для доз, различающихся более чем в 400 раз. При меньшей разнице доз экскреция хрома-51 через почки, начиная с 0,41 мг/кг и выше, была практически одинаковой (P=0,17—0,32). Поскольку в этих опытах одно и то же количество радиоактивного хрома использовали как метку, то со-

отношения его со стабильным носителем для разных весовых доз были неодинаковыми. Поэтому близкие по величине показатели содержания радиохрома на самом деле характеризовали разные количества стабильного металла. Так, при дозах 0,41 и 10,837 мг/кг уровень экскреции радиоактивной метки с мочой составил одинаковые величины, а в пересчете на весовые количества стабильного хрома он различался в 27 раз (0,019 и 0,53 мг/кг). Аналогичная зависимость выявлена и при рассмотрении результатов по экскреции хрома через кишечник. Так, в процентном выражении достоверная разница содержания радиоизотопа в кале на 27 % наблюдалась при дозах 0,41 и 4,33 мг/кг (P=0,02), весовые же количества стабильного хрома при дозах различались более чем на порядок величин. При этом с увеличением дозы повышалось количество хрома, не только выделившегося с калом, но и задерживающегося в слепой кишке, мг/кг:

Доза	Қал	Слепая кишка
0,41	0,22	0,13
4,33	3,48	0,58
10.83	5.90	3,63

В опытах по изучению характера распределения резорбированной из кишечника доли хрома-51 по тканям при дозах 0,0009 и 4,33 мг/кг подтверждена дозовая зависимость обмена этого металла в организме крыс (табл. 2). Величины резорбции хрома из кишечника при низкой и высокой дозах стабильного носителя на 24 и 72 часа были близкими (3,84 и 5,21 %; 2,74 и 4,82 % соответственно), однако весовые количества резорбированного хрома различались более чем на четыре порядка величин, мг/кг:

Доза	24 часа	72 часа
0,0009	0.35×10^{-4}	0.25×10^{-4}
4.3300	0.23	0,21

выраженного разброса данных не представлялось возможным выявить достоверные различия в уровнях депонирования хрома-51 по тканям, однако тенденция к их снижению при низкой дозе стабильного носителя прослеживается. Основными депо накопления хрома-51 за первые сутки после введения дозы 4,33 мг/кг были печень и тушка, в почках и селезенке его содержалось меньше. В скелете отложение излучателя составляло 0,24 % от введенного, в шейных лимфоузлах, щитовидной, зобной и поджелудочной железах, брыжейке и матке радиоактивная метка определялась лишь в следовых количествах. Во всех тканях к 72 часу наблюдалось снижение содержания хрома, исключением была селезенка, в которой отмечено накопление излучателя, что согласуется с литературными данными [3]. В крови содержание хрома-51 к 72 часу также снижалось с 0,4 до 0,2 %, но если при этом излучатель на шесть часов находился преимущественно в плазме, то на 72 часа — в

			Доза хро	ома, мг/кг массы
Ткань, экскрет	0,00046	0,00096	0,41	0,904
	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$
Тушка Слепая кишка Моча Кал	$28,92\pm1,40*$ $0,79\pm0,20$ $70,29\pm1,43$	$5,64\pm1,49$ $26,16\pm5,29$ $0,59\pm0,35$ $67,71\pm4,94$	9,38±2,84 32,56±5,58 4,58±1,10 53,48±8,21	11,42±6,69* 2,97±0,91 74,19±7,02
Баланс, %	95,42±0,52	$91,92\pm 2,51$	98,15±1,44	$95,68 \pm 0,88$

^{*} Тушка вместе со слепой кишкой.

эритроцитах. В желудочно-кишечном тракте наиболее высоким количество радиохрома на 6 часов было в желудке, тонком кишечнике и химусе слепой кишки. Через 24 часа радиоактивность всех отделов кишечника резко падала, за исключением слепой кишки, где к этому сроку задержалось почти 14 % радиохрома. Через 48 часов содержание излучателя в ней снижалось до 2,7 %, а через 72 часа оно составляло 1,04 %. При дозе хрома 0,0009 мг/кг через 24 часа в химусе слепой кишки находилось 20 % хрома-51, а на 72 часа оставалось 5,7 % при колебаниях 0,2—22 %.

Повышенная задержка хрома-51 в химусе слепой кишки отмечалась при пероральном введении и катиона хрома, когда через 24 часа в нем находилось свыше 15 %, от введенной дозы. При таком же способе введения иттрия, стронция, кальция в слепой кишке по сравнению с другими отделами желудочно-кишечного тракта повышенного содержания излучателей не наблюдалось. Возможно, что задержка хрома в химусе слепой кишки играет роль в обмене этого металла в организме и наряду с водой, некоторыми аминокислотами и витаминами [8] здесь происходит всасывание и хрома. В других отделах кишечника на 72 часа содержались сотые и десятые доли процента от введенного количества радиохрома.

Суммарное выделение хрома-51 при обоих дозах за трое суток составило с калом свыше 90 %, с мочой — 3,272 и 1,312 % при дозах 4,35 и 0,0009 мг/кг соответственно, что в пересчете на весовые количества равно, мг/кг:

Доза	Моча	Қал
0,0009 4,3300	$1,18\times10^{-5}$ $0,142$	0.82×10^{-3} 4.061

Таблица 1 самок крыс натрия, крыс)

тела	
4,33	10,837
$\overline{X}\pm m$	$\overline{X} \pm m$
$3,25\pm0,96$ $13,42\pm4,69$ $2,94\pm0,68$ $80,39\pm5,50$	$6,99\pm3,06$ $33,77\pm7,56$ $4,85\pm1,68$ $54,39\pm12,05$
99,83±1,31	$96,82\pm0,67$

Из приведенных данных следует, что обмен хрома в организме в пределах испытанных нами доз и через трое суток имеет выраженный дозозависимый характер.

На самцах было также изучено влияние двух доз биохромата натрия на уровень резорбции хрома из кишечника (табл. 3). Существенной разницы в величинах всасывания и экскреции радиоактивного хрома при данных дозах не установлено, однако содержание стабильного носителя в слепой кишке при дозе 5,536 мг/кг оказалось в два раза большим, чем при дозе 3,724 мг/кг. Выделившееся с мочой и калом количество хрома также было большим при дозе 5,536 мг/кг, в то время как в тушке оно существенно не различалось

при обоих дозах.

Величина всасывания катионной формы хрома из кишечника, по литературным данным [14], ниже, чем анионной. Однако как влияет форма химического соединения на резорбцию шестивалентного хрома из кишечника, не установлено. Поэтому представляло интерес изучить зависимость скорости и величины всасывания в кровь хрома-51 при пероральном введении его одинаковых доз в виде хромата и бихромата натрия. Как показали данные (табл. 4), существенных различий уровней резорбции хрома-51 в кровь у крыс обоих групп нет (P=0,3—0,9). Следовательно, при поступлении в желудочно-кишечный тракт соединений, хорошо растворимых в его содержимом, величина всасывания хрома мало зависит от формы химического соединения.

Изучение обмена хрома при пероральном его поступлении в организм представляет практический интерес. В одних случаях его соединения попадают непосредственно в желудочно-кишечный тракт, в других (при ингаляторном введении) — до 27 % хрома может переноситься в ротовую полость ресничным эпителием бронхов и трахеи [9]. О размерах резорбции хрома из кишечника в кровь в литературе нет единого мнения. По данным [14], резорбция составляет менее одного процента, другие авторы считают, что она в несколько раз выше [11]. В наших опытах величина резорбции хрома-51 за 24 часа после введения в зависимости от дозы стабильного носителя была 3,8-5,2 % Невысокий уровень резорбции хрома-51 в кровь делает затруднительным анализ закономерностей распределения всосавшегося металла по тканям. Поэтому, допуская, что закономерности обмена резорбированной из кишечника в кровь доли хрома и введенного непосредственно в кровь аниона могут быть

Показатели обмена хрома-51 в зависимости от весовой дозы стабильного носителя при пероральном введении хромата натрия, %

		Сроки посл	е введения, ч	
Ткань, экскрет	6	24	48	72
	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X} \pm m$
Печень	$1,39\pm0,24$	$0,775 \pm 0,148$	$\frac{0,599\pm0,082}{-}$	0.531 ± 0.070 0.298 ± 0.086
Почки	0.099 ± 0.025	$0,121\pm0,026$	$\frac{0,097\pm0,025}{-}$	$0,124\pm0,030\\0,074\pm0,018$
Селезенка	$\frac{0,005\pm0,001}{-}$	$\frac{0.011 \pm 0.007}{-}$	$0,015\pm0,003$	$0,024 \pm 0,003$ $0,059 \pm 0,016$
Скелет	$0,326\pm0,070$	$0,244 \pm 0,044$	$\frac{0,135\pm0,061}{-}$	$0,325 \pm 0,050 \\ 0,230 \pm 0,132$
Тушка		$\frac{1,118 \pm 0,354}{2,964 \pm 0,635}$		$0,770 \pm 0,179$
Желудок		$0,425 \pm 0,132 \\ 0,388 \pm 0,194$		$0,017 \pm 0,003$
12-перстная кишка		$\frac{0,069 \pm 0,025}{0,009 \pm 0,003}$		$0,010\pm0,002$
Тонкий кишечник		$0,444 \pm 0,216 \\ 0,176 \pm 0,055$		$0,016 \pm 0,004$
Стенка слепой кишки		$0.032 \pm 0.007 \\ 1.101 \pm 0.283$		$0,045 \pm 0,020$
Химус слепой кишки		$\frac{13,395 \pm 4.688}{20,050 \pm 7,040}$		$5,733 \pm 5,325$
Толстая кишка		0.037 ± 0.008 0.101 ± 0.067		$\overline{0,007\pm0,002}$
Моча	_	$\frac{2,942 \pm 0,675}{0,880 \pm 0,119}$		$1,312 \pm 0,140$
Кал	$\frac{6,656\pm3,876}{-}$	$\frac{80,387 \pm 5,504}{74,331 \pm 7,350}$		$93,879 \pm 1,421$ $91,432 \pm 5,200$
		i		

Примечание. Тушка — все ткани за исключением указанных в табл. В числителе — данные по дозе 4,33 мг/кг при балансе $99.825\pm1,312\,\%$ и среднем весе крыс $265,6\pm4,4$ г, в знаменателе — данные по дозе 0,0009 мг/кг при балансе $93,973\pm1,806\,\%$ и среднем весе крыс $264,2\pm5,2$ г.

Распределение хрома-51 в организме самцов крыс при пероральном введении бихромата натрия, % от баланса (на точку пять и шесть крыс)

	Доза хрома, мг	/кг массы тела
Ткань, экскрет	3,724	5,536
	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$
Тушка	$16,763\pm 8,843$ $33,008\pm 4,581$ $3,555\pm 0,913$ $46,674\pm 8,941$	$9,725\pm3,821$ $47,953\pm6,773$ $3,429\pm0,853$ $38,893\pm9,374$
Баланс, % Вес крыс, г	$96,597 \pm 0,852$ $405,5 \pm 43,9$	92,033±3,411 401,0±26,0

близкими, для их выяснения были проведены опыты с внутривенным введением шестивалентного хрома-51. Полученные результаты позволяли выявить сходство в характере распределения хрома-51 при обоих способах введения его. Как и при пероральном поступлении на 24 часа, наиболее высоким был уровень депонирования изотопа в печени и тушке, одна треть от введенного выделялась с мочой (табл. 5). Отложение радиохрома в скелете было относительно стабильным в пределах 24 часов, а в селезенке, как и при пероральном введении, со временем содержанием хрома повышалось. Кривая выбывания хрома-51 из крови удовлетворительно аппроксимировалась трехэкспоненциальным уравнением:

 $A_t = 75.7 \exp(-42.91 \ t) + 8.8 \exp(-84 \ t) + 15.5 \exp(-0.018 \ t)$, где A_t — содержание хрома-51 в крови, t — время после введе-

Таблица 4
Всасывание хрома-51 в кровь из кишечника после перорального введения
10,1 мг/кг хромата и бихромата натрия, % от введенной дозы

		Срок отбора	крови, мин	
Форма с оединения	15	30	60	120
<u> </u>	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X\pm}m$	$\overline{X}_{\pm m}$	$\overline{X}\pm m$
Хромат натрия Бихромат натрия	0,204±0,067 0,646±0,212	0,217±0,153 0,841±0,276	0,533±0,186 1,005±0,427	1,396±0,352 1,841±1,441

ния, ч. Основная доля радиохрома (75,5 %) выбывала из русла крови в течение первых минут после внутривенного введения с $T_{1/2} = 1$ мин. Можно полагать, что она представлена диффузибельной фракцией излучателя, легко проникающей в межклеточное пространство. Если это так, то наиболее высокой будет концентрация радиохрома в тканях с большим объемом интерстициального пространства. Действительно, как показало сопоставление величин, характеризующих относительный объем межкдеточной воды и концентрацию металла в тканях, такая зависимость выявляется (коэффициент корреляции 0.95 ± 0.05). Определенную роль в депонировании металла тканями играет и скорость кровотока в них. Данные табл. 6 показывают взаимосвязь указанных параметров, которая особенно четко проявляется в первые минуты после введения. В последующие сроки хотя и наблюдалось некоторое перераспределение хрома по тканям, однако в целом описанная зависимость сохранялась. Вторая компонента уравнения характеризует значительно меньшую долю хрома, очищение от которой происходит с $T_{1/2} = 49$ мин. Третий член уравнения описывает долю хрома, длительно задерживающуюся в крови $(T_{1/2} = 37,7 \text{ ч})$. Кривые клиренса плазмы и эритроцитов удовлетворительно описываются суммами двух экспонент, что позволяет предполагать в них наличие двух форм связи хрома, имеющих разную прочность и, соответственно, разную скорость выбывания из русла крови. Гельфильтрацией на сефадексе Г-75 выявлены две основные фракции хрома в плазме, соотношение которых во времени изменяется. Выделяющаяся из колонки с белками плазмы первая фракция через 2,5 мин после введения хрома-51 содержала 30 %, а через 1 ч свыше 60 % от хрома-51 плазмы. Вторая фракция, выделяющаяся из колонки в объеме вымывания меченых аминокислот, наоборот, к первому часу после введения снижалась до 35 %. Это указывает на большую подвижность низкомолекулярной фракции хрома в плазме, выбывающей в ткани или с мочой быстрее, чем связанной белками. Установлено также наличие еще одной фракции радиоизотопа, выделяющейся из колонки лишь при ее промывании 0,1 М раствором ЭДТА и составляющей всего 1—2 %, от хрома-51 в плазме. В эритроцитах также установлены две фракции хрома, одна из них, лабильно связанная, легко отмывалась физиологическим раствором, другая, прочно фиксированная, выделялась из клеток крови лишь после их разрушения.

Выводы

1. Обмен шестивалентного хрома у крыс при пероральном введении носит выраженный дозозависимый характер. Величина резорбции хрома из желудочно-кишечного тракта повышается с увеличением введенной дозы металла.

Распределение и экскреция шестивалентного хрома-51 у крыс после внутривенного введения, % от баланса

Ę			Срок пос	Срок после инъекции		
лкань, экскрет	2,5 мин	30 мин	l q	ъ 2	ų 4	24 ч
Печень	30, 25 ± 4, 45 8, 22 ± 1, 02 0, 42 ± 0, 05 4, 27 ± 0, 24 56, 84 ± 5, 29	21, 17±3, 73 6, 81±0, 26 0, 50±0, 03 5, 06±0, 15 60, 46±3, 70	23, 26±2, 23 18, 03±1, 32 0, 53±0, 12 7, 47±0, 22 50, 61±1, 32 0, 10±0, 05	21, 10±1, 35 17, 75±1, 35 0, 57±0, 05 6, 49±0, 90 48, 69±1, 72 5, 32±1, 13 0, 08±0, 06	22, 86±3,04 13,74±0,42 0,54±0,04 3,56±0,29 44,47±2,49 13,00±2,03 1,83±0,89	11, 62 ± 0, 99 7, 02 ± 0, 46 1, 12 ± 0, 04 4, 73 ± 0, 20 36, 85 ± 0, 68 30, 33 ± 1, 61 8, 33 ± 2, 08

Примечание. Баланс 105,06±1,55 %, масса тела 259,8±7,46 г.

Зависимость концентрации хрома-51 в тканях от объема, межтканевой воды и скорости кровотока, % от баланса (на 1 г ткани)

Таблица 6

	Объем меж-	Скорость			Срок после инъекции	инъекции		V
Ткань	клеточной воды, мл	кровотока, мл/мин	2,5 мин	30 мин	1 4	h 7	4 t	24 ч
Скелет Селезенка Печень Почки	0,18 0,48 0,30 0,44	0,03 0,70 1,50 5,80	0, 16 0, 54 2, 91 5, 01	0,19 0,64 2,61 4,15	0,29 0,68 2,23 11,00	0,25 0,73 2,03 10,82	0,14 0,69 2,20 8,38	0,18 1,44 1,12 4,28

- 2. Скорость и величина всасывания аниона хрома в кровь при пероральном введении одной и той же дозы не зависят от формы соединения.
- 3. Основным путем экскреции шестивалентного хрома из организма при пероральном введении является путь через кишечник, через почки выделяется значительно меньше металла.
- 4. Обмен резорбированной доли хрома в организме определяется его физико-химическим состоянием в крови, объемом интерстициальной воды и скоростью кровотока в тканях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грушко Я. М. Соединения хрома и профилактика отравлений ими. М.: Медицина, 1964, 304 с.

2. Зедгенидзе Г. А., Зубовский Г. А. Клиническая радиоизотоп-

ная диагностика. М.: Медицина, 1968. 356 с.

3. Ковальчук Н. Д. Поведение в организме животных хрома-51 при внутривенном его введении.— Мед. радиология, 1966, № 11, с. 30—35. 4. Петросова Л. А. Метаболизм радиоактивного хрома в организме

крыс. — Гигиена и санитария, 1975, № 6, с. 26—28.

- 5. Сигова Н. В. Сравнительная токсикологическая характеристика некоторых соединений трехвалентного хрома: Автореф, дис. ... канд. биол. наук. Свердловск, 1972.
- 6. Спасская М. Г., Ларкина Г. А. Морфологические изменения в легких животных при различных способах введения бихромата калия.-В кн.: Вопросы профпатологии в эксперименте и клинике. Свердловск, 1969, c. 27—34.
- 7. Сухачева Е. И., Трегубенко И. П., Семенов Д. И. Влияние весовой дозы носителя на поведение радиактивных металлов в организме. — В кн.: Комплексообразование и метаболизм радиоактивных изотопов. Свердловск, 1976, с. 82-98.

8. Физиология пищеварения. Руководство по физиологии. Л.: Наука,

1974. 531 c.

- 9. Baetjer A. M., Dawdon C., Budach V. The distribution and retention of Chromium in Men and Animals.—Arch. Ind. Heal., 1959, vol. 20,
- 10. Ynaba J., Nishimura V., Ychikava R. Effect of age on the
- intestinal absorption and whole-body retention of some important radionuclides in rats.—Rad. Res., 1980, vol. 21, N 1, p. 72—74.

 11. MacKenzie R. D., Auwar R. A., Bjerrum R. U., Hoppert C. A. Absorption and Distribution of 51Cr in the Albino Rat.—Arch. Bioch. Bioph., 1959, vol. 79, p. 200—205.

 12. Mertz W. Chromium Occurence and Function in Biological Sys-

tems.— Physiol. Rev., 1969, vol. 49, p. 163.

13. Mertz W., Toepfer E. W., Roginski E. E., Polanski M. M. Present knowledge of the role of chromium.—Fed. Proc., 1974, vol. 33. p. 2275-2280.

14. Shiraishi Yoshiynki, Ychikava Ryushi. Absorption and Retention of ⁵¹Cr by Rats in Relation to its chemical state.— Nat. Ynst. Rad. Sci. Ann. Rep. 1977—1978, p. 67—68.

15. Visek W. Y., Whitney A. B., Kuhn V. S., Comar S. L.—

Proc. Soc. Exp. Biol. Med., 1953, vol. 84, p. 610-615.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

Л. К. КОНЫШЕВА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКСИКОКИНЕТИКИ ХРОМА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПОСТУПЛЕНИЯ ЕГО В ОРГАНИЗМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЖИВОТНЫХ

Математическое моделирование — один из центральных моментов изучения кинетики ядов в организме. Математическая, в частности камерная, модель позволяет прогнозировать накопление и выделение яда по его поступлению в организм, устанавливать закономерности влияния различных факторов на кинетику яда и т. п. Структура камерной модели, степень ее сложности определяется как закономерностями распределения и экскреции яда, так и количеством и качеством экспериментального материала, на основании которого оцениваются ее параметры.

Кинетику хрома в организме и влияние на нее различных факторов оказалось возможным описать одно-, двух- и четырехмерными моделями.

Однокамерная модель токсикокинетики хрома. Экспериментальные данные показывают, что выведение хрома из организма при внутрибрюшинном введении его подопытным животным (крысам) может быть описано одноэкспоненциальной функцией $y = y_0 e^{-kt}$, что справедливо для случаев однократного изолированного поступления хрома, хром-марганцевой смеси, а также для длительной затравки хромом экспериментальных животных. Это означает, что поступление, накопление и выведение хрома могут быть описаны однокамерной моделью и соответствующими ей дифференциальными уравнениями:

$$\begin{vmatrix} \frac{\downarrow f(t)}{x} \\ x^* = -kx + f(t); \\ \frac{\downarrow k}{x_1} \\ x_1 = kx. \end{vmatrix}$$

^{*} x — производная x по времени, x — депо яда в организме.

Интенсивность выведения яда в этой модели характеризуется коэффициентом скорости k, поступление определяется функцией f(t), которая в случае внутрибрюшинных инъекций имеетвид:

$$f(t) = \sum_{t_i < t} a_i \delta(t - t_i),$$

где a_i — доза яда, введенная животному в момент t_i ; δ (t— t_i) — символическая дельта-функция Дирака. Содержание хрома в организме в момент времени t равно x, а скорость выведения его с мочой и калом x_1 , причем $x_1 = kx$.

При других способах затравки, например подкожных инъекциях [3], описать выведение хрома одноэкспоненциальной функцией не удается. Это указывает на то, что при подкожном пути поступления необходима по крайней мере еще одна камера — депо яда в организме, рассасывающееся на протяжении значительного промежутка времени:

$$\underbrace{\begin{vmatrix} \downarrow f(t) \\ x \end{vmatrix}}_{\downarrow} \underbrace{\begin{vmatrix} k_1 \\ k_2 \end{vmatrix}}_{k} \underbrace{\begin{vmatrix} x \\ x_2 \end{vmatrix}}_{l} \underbrace{\begin{vmatrix} \dot{x} = -(k+k_1)x + f(t);}_{\dot{x}_2 = k_1x;} \\ \dot{x}_1 = kx.$$

Значения коэффициента скорости выведения k, рассчитанные для различных условий интоксикации, приведены ниже:

№ режима затравки п. п.	Условия интоксикации	k, cyr-1
1	Ежедневное внутрибрюшинное введение в	
	течение 40 сут	0,0276
2	Ежедневное внутрибрюшинное введение сме-	
	си хрома и марганца в течение 40 сут	0,0113
3	Однократное внутрибрюшинное введение	
	меченого хрома в дозе, близкой к порогу	
	острого действия	0,5000
4	Однократное внутрибрюшинное введение	
	меченого хрома совместно с марганцем в	
_	изоэффективных дозах	0,4500
5	Хроническое отравление пороговыми дозами	
	хрома*	0,3000

^{*} Распределение хрома по органам в этой группе животных было изучено по радиоактивной метке, введенной животным в конце хронической затравки.

Значения k, найденные по режимам 1 и 2, более чем на порядок отличаются от значений k в последних трех режимах. Такое несоответствие можно, вероятно, объяснить различием в ежедневных дозах вводимого яда: при режимах 1 и 2 яд вводили в минимально действующих дозах, при режимах 3—5 животные получили дозы, приводящие к их гибели в конце экспе-

римента. Естественно, что столь высокие дозы яда подавляли экскреторные функции печени и почек.

Моделирование влияния марганца на кинетику хрома с помощью одно-двухкамерных моделей. Изменение камерной модели токсикокинетики хрома под влиянием марганца первоначально было изучено по экспериментальным материалам. Суммарное (с мочой и калом) выведение хрома из организма уменьшается под влиянием присутствия в организме марганца, причем в основном такое снижение происходит за счет сокращения количества хрома, выводимого с калом. Если при изолированном воздействии отношение количества хрома в суточной моче к его количеству в суточном кале приближенно равно 0,92, то при комбинированном воздействии это отношение увеличивается до 2,26. Такое изменение соответствует повышенному содержанию хрома в печени, которое наблюдалось в эксперименте.

Уменьшение скорости выведения яда из организма можно моделировать различными способами.

- 1. Уменьшением доли яда, выводимого из организма за единицу времени, т. е. снижением коэффициента k. Модель при этом остается однокамерной.
- 2. Сокращением количества яда, доступного для экскреции при сохранении коэффициента k. При этом открывается депо захоронения яда в организме, которое на модели имитируется новой камерой x_2 .
- 3. Комбинацией первых двух способов, что приводит к уменьшению как коэффициента выведения яда, так и количества яда, доступного для экскреции.

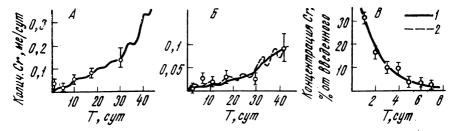
По экспериментальным данным были проверены первый и второй варианты. Проверить третий вариант оказалось невозможным из-за недостаточного объема экспериментального материала.

Были найдены следующие значения коэффициентов скоростей: для однокамерной модели k=0.0113 сут⁻¹; для двухкамерной k=0.0276 сут⁻¹, $k_1=0.0994$ сут⁻¹.

Степень соответствия расчетных кривых экспериментальным данным для одно- и двухкамерной модели можно оценить по прилагаемому рисунку.

Отдать предпочтение какой-либо одной модели на основании статистических критериев оказалось невозможным: суммы квадратов отклонений теоретических результатов от экспериментальных данных не имеют значимого отличия для обеих моделей.

Таким образом, формальное математическое моделирование, опирающееся на статистические критерии, не всегда позволяет однозначно выбрать структуру модели. С нашей точки зрения, при разработке камерной модели необходимо в первую очередь учитывать особенности поведения яда в организме.



Динамика выведения хрома из организма животных при хроническом отравлении хромом (А) и хром-марганцевой смесью (Б).

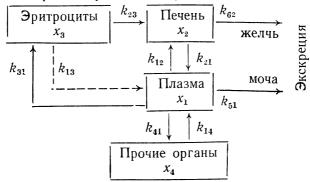
Кривая 1 рассчитана по однокамерной модели, кривая 2 — по двухкамерной. B — однократное введение минимально действующей дозы хрома.

Именно возможность анатомо-физиологической интерпретации модели и результатов, которые она позволяет получить, должна служить основным критерием выбора ее структуры.

Поэтому в рассмотренном случае предпочтительней более простая однокамерная модель, так как уменьшение скорости экскреции яда можно объяснить подавлением желчевыделительной функции печени в результате повреждения марганцем гепатоцита. В то же время для образующегося под воздействием марганца депо x_2 найти приемлемую анатомическую локализацию не удалось: повышенное накопление хрома печенью, наблюдавшееся в эксперименте, не соответствовало содержанию хрома в камере x_2 , рассчитанному по модели.

Четырехкамерная модель токсикокинетики хрома. С помощью однокамерной модели невозможно выявить особенности распределения хрома в организме и механизмы воздействия марганца на его кинетику. Для решения этих задач была разработана четырехкамерная модель кинетики хрома, основанная на экспериментальном материале по однократному (группа 1) и хроническому (группа 3) введению хрома, а также однократному введению хром-марганцевой смеси (группа 2).

Ниже показаны блок-схема и система дифференциальных уравнений четырехкамерной модели:



$$x_{1} = -(k_{21} + k_{31} + k_{41} + k_{51}) x_{1} + k_{12}x_{2} + k_{13}x_{3} + k_{14}x_{4};$$

$$\dot{x}_{2} = -(k_{12} + k_{62}) x_{2} + k_{21}x_{1} + k_{23}x_{3};$$

$$\dot{x}_{3} = k_{31}x_{1} - (k_{13} + k_{23}) x_{3};$$

$$\dot{x}_{4} = k_{41}x_{1} - k_{14}x_{4}.$$

При выборе структуры модели учитывались как закономерности поведения хрома в организме, так и те задачи, которые предполагалось решить с помощью модели.

В ряде работ [1, 2] отмечается, что большая часть хрома крови обнаруживается в эритроцитах, где он прочно связан с глобиновым комплексом гемоглобина. Такая неоднородность кровяного пула требует, чтобы в модели кровь была представлена по крайней мере двумя камерами, соответствующими плазме x_1 и эритроцитам x_3 .

Органами, в наибольшей степени концентрирующими хром, являются печень и почки. Самое большое содержание яда наблюдается в печени. Кроме того, одной из задач исследования было изучение влияния марганца на накопление хрома в этом органе. Это послужило основанием для выделения печени в отдельную камеру x_2 .

Наличие в модели еще одной камеры — камеры почек, хотя и представляло бы определенный интерес при изучении кинетики хрома в различных условиях его поступления, однако потребовало бы дополнительных экспериментальных данных для оценки параметров модели. Вот почему все остальные органы, в том числе и почки, были объединены в одну камеру x_4 . Правомерность такого объединения была в дальнейшем подтверждена удовлетворительным соответствием расчетных и экспериментальных результатов по всем имеющимся камерам и по данным выведения.

Предполагалось, что камера плазмы обменивается потоками хрома со всеми остальными камерами. Одной из задач исследования было изучение характера и интенсивности потока хрома из эритроцитов. Попадание хрома в печень из эритроцитарного пула требовало введения потока яда из камеры x_3 в камеру x_2 , определяемого коэффициентом k_{23} . Особый интерес с этой точки зрения представлял также коэффициент k_{13} .

Как показали исследования, хром выделяется примерно в равной степени с мочой и калом. Пути экскреции хрома представлены в модели потоками с коэффициентами k_{51} и k_{62} . Из плазмы хром удаляется через почки с мочой, из печени— с желчью и калом.

В таблице приведены параметры четырехкамерной модели для трех указанных выше способов затравки.

Анализ данных таблицы для случая однократного введения яда (группа 1) показывает, что для кинетики хрома характерна большая интенсивность потоков яда из плазмы в орга-

Коэффициенты скоростей обменных потоков хрома между камерами и скоростей элиминации с мочой и калом для четырехкамерной модели

Қоэффициент	Коэффициенты скоростей, сут ⁻¹			
	Группа 1	Группа 2	Группа 3	
$egin{array}{c} k_{12} & & & & & & & & & & & & & & & & & & &$	$\begin{array}{c} 0,194\pm0,247\\ 0,846\pm0,275\\ 2,943\pm2,074\\ 1,287\pm0,854\\ 12,499\pm9,928\\ 0,247\pm0,098\\ 3,095\pm1,703\\ 0,683\pm0,085\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,194\pm0,247\\ 0,846\pm0,275\\ 2,943\pm2,074\\ 1,287\pm0,854\\ 12,499\pm9,928\\ 0,329\pm0,076\\ 3,095\pm1,703\\ 0,498\pm0,062\\ \end{array}$	$\begin{array}{c} 0,445\pm0,198\\ 1,152\pm0,462\\ 1,982\pm0,792\\ 0,387\pm0,171\\ 4,474\pm2,655\\ 0,136\pm0,098\\ 2,074\pm0,660\\ 0,317\pm0,051\\ \end{array}$	

Примечание. Животным группы 1 была введена $^{1/10}$ LD $_{50}$ хрома, меченого излучателем хром-51 путем внутрибрюшинной инъекции $K_2C_{\mathbf{r}_{\mathbf{p}}}^{\mathbf{r}_{\mathbf{p}}}$ О $_{7}$. Животным группы 2 была введена $^{1/10}$ LD $_{50}$ радиоактивного хрома совместно со стабильным марганцем путем внутрибрюшинной инъекции. Животным группы 3 в течение двух месяцев интраперитониально вводили четыре — пять раз в неделю бихромат калия по $^{1/10}$ LD $_{50}$. После этого животные получали однократную внутрибрюшинную инъекцию хрома, далее производились наблюдения по выведению меченого хрома и распределению его по органам.

ны и внешнюю среду (k_{21} , k_{31} , k_{41} , k_{51} , характеризующие эти потоки, значительно превосходят другие коэффициенты).

Сравнение коэффициентов k_{51} и k_{62} , которые определяют потоки хрома во внешнюю среду с мочой и калом, свидетельствует о том, что через почки плазма очень интенсивно освобождается. Выведение же хрома с калом за счет печени происходит значительно медленнее. Количественной характеристикой такого сравнения может служить отношение k_{51}/k_{62} —4,5 для животных группы 1. Этот вывод оказалось возможным сделать лишь с помощью модели, так как количество хрома, выводимого с мочой и калом, примерно одинаково: за весь наблюдаемый период отношение этих величин равнялось 1:0,8.

Обращает на себя внимание малая величина коэффициента k_{12} для группы 1. С учетом большого стандартного отклонения ее можно считать практически равной нулю. Таким образом, все потоки из печени малы. Это обусловливает значительное накопление яда в этом органе и медленное (по сравнению с плазмой) освобождение его от элемента.

Поток хрома из эритроцитов в плазму отсутствует. Все попытки сделать коэффициент k_{13} отличным от нуля вносили сильное искажение в картину поведения хрома в эритроцитах. Поскольку коэффициент k_{13} оказался равным нулю для всех групп животных, в таблице он опущен. В то же время коэффициент k_{23} значимо отличен от нуля, то есть имеется достаточно большой прямой поток хрома из эритроцитов в печень. Этот результат хорошо согласуется с механизмом освобождения эритроцитарного пула от яда. Показано, что металл покидает эритроциты в основном при их разрушении, а освободившийся из эритроцитов хром вновь ими не реутилизируется. Процесс утилизации гемоглобина начинается в селезенке, окончательный распад глобина и освобождение связанного с ним хрома происходят в печени. Селезенку при этом можно рассматривать как своеобразный регулятор интенсивности потока хрома из эритроцитов в печень: ускорение утилизации ею гемоглобина увеличивает этот поток.

Сравнение экспериментальных результатов для групп 1 и 2 показало, что в присутствии марганца увеличивается содержание хрома в печени и уменьшается в эритроцитах и кале. Такой сдвиг оказалось возможным описать, изменив значения коэффициентов k_{23} и k_{62} при сохранении значений всех остальных, что является косвенным подтверждением механизма воздействия марганца на кинетику хрома. Предполагается, что в ответ на комбинированное токсическое действие хрома и марганца в селезенке происходят реактивные изменения, сопровождающиеся усиленным разрушением эритроцитов крови, что приводит к дополнительному поступлению в печень глобина разрушившихся эритроцитов, с содержащимся в нем хромом, т. е. к интенсивному накоплению хрома в печени. Это, в свою очередь, ведет к усиленному повреждению гепатоцита и далее — к задержке выделения хрома из печени с желчью.

Для животных группы 3, подвергавшихся длительной затравке хромом, характерно уменьшение всех коэффициентов, характеризующих потоки яда из плазмы: k_{21} , k_{31} , k_{41} , k_{51} приблизительно в два — четыре раза меньше соответствующих коэффициентов для групп 1 и 2. Суммарный коэффициент ($k=k_{21}+k_{31}+k_{41}+k_{51}$) уменьшается примерно в два раза. Это говорит о том, что отравление организма хромом подавляет потоки яда из плазмы. В то же время коэффициенты k_{12} и k_{14} , характеризующие потоки яда в плазму, несколько увеличиваются. Особенно это относится к k_{12} : в группе 3 он примерно в 2,3 раза больше, чем в группах 1 и 2. Такие изменения объясняют перераспределение хрома между плазмой и другими тканями. Ниже приведены отношения содержания хрома в эритроцитах к содержанию его в плазме крови экспериментальных животных:

Срок иссле- дования, сут	Группа 1	Группа 2	Группа 3
1	4,4	3,62	1,41
3	11,3	9,51	2,20
7	28,4	28,1	3 ,52

Как видно из вывода, отношение x_3/x_1 значительно ниже для группы 3, чем для первых двух, причем этот сдвиг нарастает со временем. По всей видимости, это является отражением изменений лигандных свойств белков плазмы по отношению к хрому (в результате токсического действия хрома на печень) либо

обусловлено накоплением в плазме белков, специфически связывающих этот металл по типу металлотионинов.

При хронической затравке хромом (см. таблицу) снижается коэффициент k_{62} , что говорит о подавлении экскреторной функции печени. Рассматривая отношение k_{51}/k_{62} , можно обнаружить, что оно приблизительно в 1,5 раза выше, чем в первых двух группах. Это указывает на то, что при хроническом отравлении хромом освобождение печени от яда резко замедляется.

Таким образом, четырехкамерная модель позволяет установить, что присутствие марганца приводит как к уменьшению потока хрома из печени, так и к дополнительному поступлению яда в этот орган из эритроцитарного пула. Кроме того, с помощью модели оказалось возможным выявить и объяснить некоторые особенности кинетики хрома при хроническом отравлении этим ядом.

Однако четырехкамерная модель не дает возможности ответить на ряд вопросов, связанных с кинетикой хрома под воздействием марганца при хроническом отравлении. По экспериментальным данным были найдены параметры модели для слухронического отравления животных хром-марганцевой смесью. Оказалось, что изменения коэффициентов k_{23} и k_{62} имеют то же направление, что и при однократном введении ядов: k_{23} под воздействием марганца увеличивается, k_{62} — уменьшается. Но эти сдвиги менее выражены, чем в случае однократного воздействия. Кроме того, при хроническом отравлении адекватное опыту описание кинетики хрома в присутствии марганца потребовало изменения значений и всех остальных коэффициентов. Некоторые из этих сдвигов не поддаются физиологической интерпретации в рамках четырехкамерной модели. Последнее вполне объяснимо, поскольку воздействие марганца на распределение хрома по органам, выявленное в эксперименте, касается в основном почек, головного мозга и сердца. Учесть же эти органы в четырехкамерной модели невозможно, поскольку содержание и концентрация хрома в них значительно ниже, чем в печени и эритроцитах. Для выявления с помощью модели особенностей кинетики хрома на фоне длительной хром-марганцевой затравки необходима более сложная модель, включающая почки и ряд других органов. Однако мы не располагаем экспериментальным материалом, необходимым для построения такой модели.

Выводы

1. Кинетика шестивалентного хрома в организме может быть описана моделями различных структур. Выбор структуры определяется как особенностями распределения и выведения яда, так и задачами, которые предполагается решить методом математического моделирования. Возможность усложнения модели связана с наличием экспериментального материала.

- 2. Простейшей моделью токсикокинетики хрома при внутрибрюшинном введении является однокамерная модель. Она позволяет описать динамику выведения хрома из организма при различных условиях интоксикации. Так, удалось установить, что увеличение дозы яда ведет к резкому уменьшению коэффициента скорости экскреции.
- 3. Влияние марганца на кинетику хрома можно моделировать либо уменьшением скорости экскреции, либо образованием нового депо хрома в организме при сохранении скорости экскреции. Однокамерная модель не позволяет обнаружить механизмы воздействия марганца на кинетику хрома.
- 4. Четырехкамерная модель кинетики хрома дает возможность описать особенности поведения яда в организме как при разовом введении, так и при хронической затравке, а также влияние марганца на кинетику хрома.
- 5. Наиболее существенными особенностями кинетики хрома, отраженными четырехкамерной моделью, можно считать следующие:
- отсутствие потока хрома из эритроцитов в плазму (эритроциты — «ловушка» для хрома);
- увеличение под влиянием марганца потока хрома в печень вместе с глобином разрушившихся эритроцитов;
 - задержку хрома печенью под влиянием марганца;
- уменьшение потока хрома из плазмы при хронической интоксикации организма этим ядом;
- резкое замедление экскреции хрома с желчью в случае хронического отравления организма.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Ковальчук Н. Д. Поведение в организме животных хрома-51 при внутривенном введении.— Мед. радиология, 1966, № 11, с. 30—35. 2. Цфасман А. З. Применение радиоактивного хрома в клинике. М.,
- 1964, c. 5—13.

 3. Yamaguchi S., Sano K., Shimojo N. On the Biological Hallf-Time of Hexavalent Cromium in Rats.—Ind. Health., 1983, vol. 21, p. 25—34.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

Н. М. ЛЮБАШЕВСКИЙ, С. В. ЩЕРБАКОВ, В. И. ТОКАРЬ, Е. Е. РОЗЕНБЕРГ, А. А. МОКРОНОСОВ, Т. К. СЕМЕННИКОВА, Е. П. ЖОВТЯК

МЕХАНИЗМЫ НАРУШЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ОБМЕНА ПРИ ХРОНИЧЕСКОЙ ФТОРИСТОЙ ИНТОКСИКАЦИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Хроническая фтористая интоксикация (флюороз) возникает у людей и животных, живущих в природных зонах с повышенным содержанием фтора в почвах и водах. Эта биогеохимическая эндемия широко распространена среди населения земного шара [1, 6]. Минеральные удобрения повышают концентрацию водорастворимых фторидов в почве и в трофических цепях, ведущих к человеку и животным. Профессиональный флюороз может возникнуть при производстве минеральных удобрений, стали, алюминия и криолита.

Несмотря на обширную литературу, посвященную флюорозу, ряд важнейших вопросов диагностики, клиники и лечения его остается остроактуальным. Так, ранняя диагностика этого заболевания позволила бы провести ряд эффективных мероприятий по его предупреждению. В настоящее время среди ранних признаков флюороза решающее значение придается симптомам дисфункции внутренних органов неспецифического характера (особенно печени, поджелудочной железы, желудочнокишечного тракта), и только отдельные проявления поражений зубов и остеалгии иногда обнаруживаются на начальной стадии. Симптомы костного флюороза возникают на относительно более поздней стадии. Затруднения в их диагностике объясняются тем, что рентгенологически можно определить не менее чем 30 %-ное уменьшение или увеличение плотности кости.

Указания на первичные биохимические и физико-химические реакции, возникающие в животном организме при поступлении фтор-иона (ингибирование или активация ряда ферментных систем, связывание кальция и магния и др.), приводящие к развертыванию цепной патологической реакции на макроуровне тканей, органов и целостного организма, не могут быть использованы в прикладных целях. Однако очевидно, что функциональные сдвиги наступают значительно ранее обнаруживаемых

морфологических изменений. При этом вполне вероятно, что ключевым звеном ряда прикладных проблем, возникающих при хронической фтористой интоксикации, являются еще не изучавшиеся по тем или иным причинам (например, методического характера) механизмы макрофизических процессов. В этой связи мы обратили внимание на то, что уже при начальном анализе кинетики фтора можно предположить наличие на самых ранних стадиях поражения клеточного аппарата скелета. Последний подвергается воздействию фтора в более высоких концентрациях, чем клетки из любой другой области тела, и если даже его чувствительность не отличается от средней чувствительности других клеточных элементов, их функциональная полноценность должна нарушаться ранее. Действительно, в скелете кумулируется до 96 % фтора, депонированного в организме. Фтор внедряется в кристаллическую и аморфную фракции минеральной фазы кости. Согласно современным представлениям о механизмах минерализации костной ткани, значительная часть потока кальция, фосфора и других минеральных компонентов, в том числе фтора, проходит через остеобласты. Другая крупная группа остеогенных клеток — остеокласты — участвует в относительно медленном процессе морфологической перестройки кости. У взрослых крыс за год перестраивается около 80 % скелета [8]. Таким образом, поражающее действие фтора на остеогенный клеточный аппарат пролонгируется при переотложении фтора в костной ткани.

Однако поражение даже значительного числа остеогенных клеточных элементов может длительное время существенно не проявляться. Простые расчеты с привлечением данных по темпам перестройки показывают, например, что нарушение оссификации на значительных площадях костной ткани, которые могут быть отмечены рентгенологически, может быть достигнуто только через несколько лет.

В литературе нет однозначного мнения по динамике минералов кости при флюорозе, которое могло бы дать направление в разработке диагностических тестов. Например, в одних работах [11, 26] найдено ускорение обмена кальция и фосфора, в других [17, 24] — снижение темпов выведения кальция из костей при действии как больших, так и малых доз фтора.

Не найдено также достоверных и, следовательно, применимых в диагностике изменений уровня кальция в плазме крови. В связи с уменьшением растворимости минеральной фазы кости при насыщении ее фтором [29] можно было бы ожидать падения уровня кальция в крови. Однако авторы работы [23] нашли, что кальций и неорганический фосфор крови при хроническом флюорозе остаются в пределах физиологических величин. Данные целого ряда авторов могут свидетельствовать о том, что явная гипокальциемия при флюорозе не развивается в результате реализации больших резервных возможностей до-

вольно значительного по массе и метаболической активности остеогенного клеточного аппарата, а также эндокринной системы, участвующих в выполнении жизненно важной функции прецизионного сохранения кальциевого гомеостаза. Если в результате поражения кости происходит падение уровня кальция плазмы крови, оно служит прямым стимулом активации паращитовидных желез, секретирующих паратиреоидный гормон (ПТГ), что приводит к увеличению потоков кальция в кровь и нормализации или даже превышению его нормального уровня. Так, в ходе эксперимента [18] при воздействии фтора найдено начальное снижение кальция и повышение фосфатов крови. Но через полтора месяца восстановительного периода отмечены уже противоположно направленные сдвиги. О компенсагиперпаратиреоидизме торном сообщается В работах 19, 271.

Влияние фтора на другие процессы эндокринной регуляции освещено также недостаточно, однако в ряде работ [12, 13] выявлены существенные гормональные нарушения в функционировании системы гипоталамус — гипофиз — гонады. Картина гормональных нарушений представляет собой результат действия сложного механизма изменений как продукции, так и обмена половых гормонов. Некоторые признаки нарушения функционального состояния гипофиза носят вторичный характер.

Таким образом, несмотря на достаточно обоснованные, на наш взгляд, представления о раннем поражении скелетных клеток фтором, в распоряжении исследователей нет пока методов прямого его распознавания в этом критическом органе. Неизвестен также эффективный способ прижизненной оценки количества и концентрации фтора в организме. На основании такой оценки можно было бы судить о токсическом эффекте и прогнозировать развитие поражения.

Цель данной работы — определить динамику и механизмы нарушения функционального состояния минерального обмена у экспериментальных животных при хронической фтористой интоксикации. Для этого следовало найти и применить адекватные подходы к прижизненной оценке обменной функции скелета и механизмов ее регуляции, т. е. оценить наиболее чувствительные метаболические реакции и вовлекаемые в них элементы. В частности, требовалось проследить фоновые изменения минерального обмена и эндокринной системы, а также реакции пораженного организма на эндокринную стимуляцию резорбции кости как наиболее специфической физиологической реакции скелета позвоночных, а также оценить вовлеченность эндокринной системы в реакцию на тест-агенты.

Теоретической основой для разработки комплексной оценки послужили работы [7—9, 20] по индуцированной экзогенными фармакологическими агентами резорбции скелета, а также исследования по функциональной физиологии костной ткани [22,

28]. Известно, что резорбция кости тесно сопряжена с кальциевым обменом организма. В его регуляции участвует не менее 60 гормонов и эндогенных веществ. Среди них основное значение имеют: паратиреоидный гормон (ПТГ) околощитовидной железы, поднимающий уровень кальция плазмы крови, увеличивающий резорбцию костной ткани и реабсорбцию в почках; кальцитонин (КТ), вырабатываемый С-клетками щитовидной железы, гормон — антагонист ПТГ, понижающий уровень кальция плазмы крови и уменьшающий резорбцию кости; витамин Д и его модификации, образуемые в печени и почках и играющие роль истинных гормонов (усиливают всасывание кальция из желудочно-кишечного тракта и нормальную минерализацию костной ткани, в больших дозах стимулируют резорбцию кости).

Исследователи [7—9, 20] вводили животным экзогенный ПТГ или натриевую соль ЭДТА (этилендиаминтетрауксусная кислота), вызывающую вследствие понижения уровня кальция крови усиленную продукцию и инкрецию в кровь эндогенного ПТГ. В результате депонированные в костной ткани радиоактивные вещества и стабильные элементы в значительной степени выводились из кости с мочой. Был вскрыт механизм этого процесса: при резорбции растворяется весь материал кальцифицированной костной матрицы и все заключенные в нем биогенные и чужеродные вещества подвергаются ферментативному гидролизу и в растворенном виде выносятся в кровоток.

В то же время эффективность такой индуцированной резорбции зависит от реактивности остеокластов и других остеогенных клеток, чьи рецепторы служат мишенью для паратиреоидного гормона. Ожидается, что под влиянием токсического агента эта реактивность может быть в значительной степени модифицирована как в сторону понижения, так и в сторону повышения.

Таким образом, теоретически представляется возможным изучение функционального состояния клеточно-резорбтивного аппарата скелета с использованием экзогенного ПТГ как тестагента, играющего роль функциональной нагрузки.

Для решения вопроса о приложимости такого рода соображений к исследованию фтористого поражения костных клеток следует получить конкретные данные по эффективности паратиреоидина или другого фармакологического агента, вызывающего резорбцию костной ткани и выделение содержащихся в ней минеральных веществ, в том числе фтора, а также исследовать вовлечение внескелетных механизмов минерального обмена.

Материал и методы исследований

В экспериментах были использованы белые крысы линии Вистар стадного разведения весом $354,9\pm4,2$ г. О состоянии минерального обмена у интактных животных судили по содер-

жанию в крови и выделению с мочой кальция, фосфора, магния, цинка, свинца, фтора под влиянием функциональных нагрузок, а также при длительной интоксикации фтор-ионом. Выбор изучаемых элементов был обусловлен несколькими посылками. Для характеристики минерального обмена нам представлялось важным изучение поведения в организме элементов, принадлежащих по биологическим и химическим критериям к различным категориям: элементам из различных групп системы Менделеева, катионам и анионам; макро-(кальций, магний, фосфор) и микроэлементами (фтор, цинк, свинец); физиологически важным эндогенным элементам (кальций, магний, фосфор, цинк) и чужеродным, абиогенным, накапливающимся в организме В результате техногенного загрязнения (свинец); элементам, служащим в данных условиях опыта индикаторами минерального обмена, в противоположность фтору, который мы вводили в заведомо токсичных концентрациях; различным по остеотропности продуктам (высокотропные свинец, фтор, кальций, менее кумулирующиеся в кости фосфор и цинк и неостеотропный магний); веществам, прецизионно регулируемым специальными, в том числе эндокринными, железами (кальций, фосфаты), и веществам, для которых такие механизмы пока твердо не установлены, но вероятны (цинк) или маловероятны (свинец). Кроме того, эти элементы должны быть хорошо доступны для аналитического определения в биосредах.

Проведено три серии исследований. В первой (ориентировочной) изучали возможность определения выделения фтора, накопленного скелетом, при стимулируемой паратиреоидином резорбции кости. Исследовали также эффект ЭДТА на выведение из организма фтора и способность ЭДТА модифицировать выведение фтора с мочой при совместном применении его с паратиреоидином. При постановке эксперимента руководствовались представлением об отсутствии прямого взаимодействия молекулы ЭДТА с фтор-анионом, рассчитывая на косвенное влияние кальциевого обмена на эндокринные механизмы (связывание кальция крови и включение тем самым реакции паращитовидных желез).

В течение шести месяцев 24 крысы получали фтористый натрий в питьевой воде в концентрации 500 мг/л, затем фтор был исключен на шесть месяцев, и крысы разделены на три основные и одну добавочную группы. В первые сутки у всех животных определили фоновое содержание фтора, фосфора, кальция и креатинина в суточном количестве мочи. Животным первой группы двукратно с двухчасовым интервалом было введено внутрибрюшинно 60 ед. паратиреоидина. Крысам второй группы при таком же количестве паратиреоидина через три, шесть и девять часов подкожно инъецировали по 50 мкМ ЭДТА в 1 мл. Крысам третьей (контрольной) группы двукратно внутри-

брюшинно вводили по 3,0 мл физиологического раствора. Через 24 ч после введения паратиреоидина крысы были забиты под эфирным наркозом. Суточную мочу, а также кровь, взятую при забое, исследовали на содержание кальция и неорганического фосфора; бедренную кость — на содержание фтора. В моче также исследовали фтор и креатинин.

Добавочная группа состояла из семи интактных крыс того же возраста и пола, что и затравленные фтором. У этих животных одновременно с крысами основных групп данной серии оп-

ределяли суточную элиминацию фтора с мочой.

Во второй серии на 133 животных исследовали эндокринный статус крыс, о котором судили по концентрации в крови ПТГ, КТ, тестостерона, эстрадиола, прогестерона, пролактина и альдостерона.

Определение гормонов в сыворотке крови проводили методом радиоиммунологического анализа, в котором в качестве связующего компонента используются специфические к исследуемому гормону антитела. По своей чувствительности, специфичности (обусловленной степенью сродства антигена и антитела) и точности этот метод значительно превосходит известные биологические и физико-химические методы определения гормонов в крови. Использовали коммерческие наборы фирмы «CIS» (Франция), «Вук-Mallinckrod» (ФРГ), «Pharmacia» (Швеция). Измерение радиоактивности осуществляли на спектрометре «Ultrogamma-1280» фирмы «LKB-Wallac» (Швеция).

В третьей серии экспериментов использовались 82 крысы. Изучали состояние минерального обмена кости и внескелетного минерального обмена при хронической ингаляционной затравко животных фтором в заведомо токсичных концентрациях при раз личных сроках воздействия. Применяли те же методически подходы и исследовали такие же параметры, как и в предыдущих сериях, а также ряд дополнительных.

Крысы были разделены на пять групп, в каждой из которы: животных хронически затравливали фтористым водородом в течение трех, семи, двенадцати и девятнадцати недель. Концентрация фтористого водорода в течение всего периода затравки показана ниже:

Неделя	Концентрация, мг/м³	Неделя	Концентрация, мг/м³
2-я 4-я 6-я 8-я 10-я	$\begin{array}{c} 1,8\pm0,3\\ 1,2\pm0,2\\ 2,8\pm0,2\\ 3,6\pm0,2\\ 2,0\pm0,2 \end{array}$	12-я 14-я 16-я 18-я 19-я	$3,0\pm0,2$ $2,6\pm0,3$ $2,4\pm0,2$ $3,6\pm0,4$ $3,1\pm0,5$

Группа интактных животных представляет исходный фон и соответствует начальному моменту затравки.

За трое суток перед забоем все группы разобщили с фтором и разделили на подгруппы по пять — семь животных, к которым

применялись различные варианты воздействия ЭДТА (разовая доза 50 мкМ на крысу) и паратиреоидина (разовая доза 100 ед.). При варианте I животных в течение трех суток не подвергали воздействиям. При варианте II на вторые и третьи сутки делали подкожное введение паратиреоидина. При варианте III осуществляли инъекции ЭДТА в течение трех суток. При варианте IV производили инъекции ЭДТА в первые сутки, на вторые и третьи сутки применяли паратиреоидин и ЭДТА в комплексе.

Разделение на подгруппы каждой из групп представлено ниже (в дальнейшем мы будем именовать такие подгруппы «ФОН», «ПТГ», «ЭДТА» и «ТЕСТ» соответственно):

Неделя	n	Подгруппы							
0-я	6		ЭДТА	ПТГ	TECT				
3-я	6	ФОН	_	ПТГ	TECT				
7-я	· 5	ФОН		ПТГ	TECT				
12-я	7	ФОН		ПТГ	TECT				
19-я	5	ФОН			TECT				

После трехсуточного содержания в обменных клетках и последующего забоя декапитацией под эфирным наркозом от каждого животного получали стандартный набор проб: костная ткань (бедро), кровь, моча. Образцы исследовали на фтор, свинец и цинк. Кроме того, в пробах мочи определяли содержание магния и фосфора, а в пробах крови — магния, фосфора, кальция и щелочной фосфатазы. Измерение свинца и цинка проводили из одних и тех же проб различными атомно-абсорбционными методами. Для определения цинка и свинца использовали пламенный метод сжигания аликвоты соответственно в воздушно-ацетиленовой смеси и в графитовой кювете. Для измерения свинца в пробах крови использовали метод Львова (сжигание аликвоты в графитовой кювете с платформой). Эти способы в порядке их перечисления обладают все большей разрешающей способностью.

Пробы крови и мочи для атомно-абсорбционного исследования приготовляли однотипно. Известные объемы исходного субстрата подвергали при нагревании мокрому озолению концентрированной азотной кислотой (марки ОСЧ) до ликвидации помутнения раствора при разбавлении его дистиллятом. Использование кислоты марки ОСЧ позволило не замерять объем расходуемой на каждую пробу кислоты для внесения поправок на содержание в ней свинца и цинка. Конечное содержание кислоты в пробах доводили разведением до уровня 20—30 об.%. После элементоопределения сделали перерасчет на исходный субстрат.

Приготовление проб костной ткани отличалось от вышеприведенной схемы: перед кислотным озолением при нагреве навески костной ткани, залитые концентрированной азотной кислотой марки ОСЧ, выдерживали в течение суток при комнатной температуре. Приготовление всех проб производили в специальной стеклянной посуде, подвергнутой длительному нагреванию в растворе 50 %-ной азотной кислоты и проконтролированной на отсутствие выщелачивания.

Все элементоопределения по цинку и свинцу проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Перкин-

Элмер-403».

Камеральную ингаляционную затравку крыс фтористым водородом осуществляли в течение 19 недель по пять раз в неделю в течение четырех часов. Фтористый водород подавали в камеру объемом 0,9 м³ из сконструированного нами диффузионного генератора со скоростью около 4 л/мин с помощью компрессора марки УК-402М.

Контроль содержания НГ в воздухе затравочной камеры проводили каждый час во все дни затравки. Пробы отбирали на специальные сорбирующие фильтры с рабочей поверхностью 18 см² со скоростью 5 л/мин в течение 10 мин. Сорбирующий фильтр, изготовленный из трех слоев материала ФПП-70-0,2 с напылением мелкодиспергированного углекислого натрия на среднем слое [5], испытан нами в условиях камеральной затравки и производства фтор-солей для улавливания фтор-иона. Установлена высокая эффективность этого способа отбора проб: коэффициент проскока фтор-иона в среднем составлял 1,5± ±0,1%.

Десорбцию вещества с сорбирующих фильтров проводили при их обмывании в 10 мл дистиллированной воды. К этому объему добавляли 10 мл буфера, регулирующего ионную силу раствора с рH=5,0-5,5. Измерение содержания фтор-иона в пробе проводили с помощью отечественного фтор-селективного электрода $\Im F\text{-VI}$ на милливольтметре pH-121 с хлорсеребряным электродом сравнения. Фтор в пробе количественно определяли по калибровочному графику (при содержании 1-20 мкг). Концентрацию фтора в затравочной камере пересчитывали на 1000 л и выражали в мг HF/m^3 .

В течение 19-недельного эксперимента средняя концентрация фтористого водорода составляла 2,6±0,2 мг/м³. Еженедельно исследовали содержание фтора в моче экспериментальных животных. Для анализа брали 10 мл мочи из суточного объема, добавляли 10 мл буфера tisad-I. Потенциометрию и дальнейшую оценку вели аналогично вышеописанной методике для определения фтора в воздухе. Перерасчет фтора в моче вели на суточный диурез.

Фтор в сыворотке крови определяли потенциометрически по методу [21]. Для этого к 3 мл сыворотки крови добавляли 3 мл свежеприготовленного 0,1 М ацетатного буфера, рН = 5,2. Калибровочный график для определения фтора в сыворотке крови строили на основании определения величины потенциала растворов с содержанием фтор-иона от 0,5 до 5,0 мкг в трех миллилитрах стандартных растворов и трех миллилитрах 0,1 М аце-

татного буфера. Минимальный объем сыворотки интактных животных установлен нами экспериментально и соответствует нижней границе чувствительности отечественных фторселективных электродов. Для повышения точности определения количества фтора проводили добавки известного количества фтора (0,5—1,0 мкг/0,1 мл). В этом случае из полученной по калибровочному графику величины количества фтора в пробе с добавкой вычитали величину добавки. Концентрацию фтора выражали в мг/л сыворотки крови.

Фтор в костях экспериментальных животных определяли в многокамерном диффузионном приборе, разработанном [4] и модифицированном [10]. Сорбцию фтористого водорода в приборе осуществляли покрытыми спиртовым щелочным раствором

центральными резервуарами и крышкой.

В кольцеобразную камеру ячейки помещали навеску (20—50 мг) измельченной и высушенной при 105°С бедренной кости и 1 мл 20%-ного раствора азотнокислого серебра в хлорной кислоте. Ячейки закрывали крышкой и завинчивали прижимным уплотнительным стаканом. Прибор помещали на 24 ч в термостат при 52°С.

Фтор замеряли фотометрически с помощью эриахромцианина по калибровочному графику (содержание фтора 1—12 мкг)

при длине волны 530 нм.

Определение фосфора, магния, креатинина в моче проводили только в сроки забоя крыс: через 3, 7, 12 и 19 недель от начала ингаляционной затравки. Животных забивали путем декапитации под наркозом, кровь собирали в центрифужные пробирки, получали сыворотку крови, в которой определяли фтор, фосфор, магний, кальций, щелочную фосфатазу, цинк, свинец.

Фосфор в сыворотке крови и моче замеряли фотометрически по модифицированному методу Дузе [2]. Метод основан на получении фосфорно-молибденовой кислоты и восстановлении последней в молибденовую при добавлении амидола. Для исследования брали 0,2 мл крови и 0,2 мл мочи, разведенной дистиллированной водой в соотношении 1:5. Через 20 мин после смешивания всех необходимых растворов пробы фотометрировали на спектрофотометре (длина волны 630 нм). Расчет производили по калибровочной кривой (содержание фосфора 4,0—20,0 мкг). Результат выражали в кг/л сыворотки крови или мочи.

Магний в сыворотке крови и моче определяли с помощью набора химических реактивов фирмы «La chema» (ЧССР). Раствор 1-/2-оксиазо/-2-нафтол-3-/2,4 диметил/-карбоксанилид образует с магнием в щелочной среде окрашенный комплекс, который определяется фотометрически. Оценку анализов проводили методом параллельно обрабатываемого эталонного раствора с известным содержанием магния [25]. Для исследования брали 0,02 мл сыворотки крови и мочи. Пробы и эталонный

раствор фотометрировали на спектрофотометре при длине волны 505 нм. По полученным значениям оптической плотности пробы A и эталона Б рассчитывали содержание магния в мМ/л сыворотки крови по формуле $C = A/B \cdot 0.823$. В моче содержание

магния выражали в миллимолях на суточный диурез.

Кальций в сыворотке крови определяли по методу [3] с использованием щелочного мурексид-глицеринового реактива. Мурексид образует с ионами кальция в щелочной среде комплексное соединение, окрашенное в красно-фиолетовый цвет. Расчет концентрации кальция проводили по калибровочной кривой (концентрация кальция 1—5 мМ/л). Для исследования 0,1 мл сыворотки крови смешивали 0,3 мл дистиллированной воды и добавляли 3,0 мл указанного реактива. Фотометрировали на спектрофотометре при длине волны 490 нм.

Щелочная фосфатаза сыворотки крови определялась по методу [14, 16] с использованием в качестве субстрата *p*-нитро-

фенилфосфата.

Результаты и обсуждение

Исследование животных в первой серии экспериментов показало, что фоновая элиминация фтора через почки крыс в конце полугодового разобщения составила в среднем 26.8 ± 2.8 мкг, что всего вдвое выше показателей интактных крыс четвертой группы $(12.3\pm1.9 \text{ мкг/сут})$.

Данные эксперимента приведены в табл. 1. В абсолютных показателях экскреция фтора в контроле составила 62,3 мкг/сут, а в группе крыс, получавших ПТГ и ЭДТА,— 36,8 и 48,9 мкг/сут соответственно. Этот феномен объясняется, с одной стороны, различием содержания фтора в организме, с другой — разным диурезом. Поясним каждую из этих причин.

В скелете крыс контрольной группы кумулировано фтора значительно больше (18 200 мкг), чем у животных опытных групп (11 750 и 12 824 мкг). Поэтому оценка экскреции должна быть соотнесена с количеством накопленного в организме фтора.

На выведение фтора значительное влияние оказывают кровоток через почки, фильтрация и реабсорбция. Фтор в значительной степени подвергается обратной реабсорбции в почечных канальцах. При высоком диурезе, который наблюдается в нашем опыте в контрольной группе, реабсорбция заметно снижена. Неравномерность реабсорбции можно учесть с помощью веществ, практически не реабсорбируемых почечным эпителием, например, инулином или креатинином (в нашем опыте определялся эндогенный креатинин главным образом мышц). Действительно, если в одной из групп почки выделяют больше креатинина, это означает, что по тем или иным причинам (например, вследствие высокого кровотока через кору почек) увеличено образование первичной мочи. Концентрация креатинина, таким

Результаты первой серии опытов *

Элемент	ФОН ** (n=17)	ПТГ (n=6)	TECT (n=6)	КОНТРОЛЬ (n=5)
Фтор, моча, % к скелету к скелету на 1 мг креатинина кратинина мкг/мг креатинина мг	1,91±0,96 1,96±0,88 326±32 3,18±0,31 — 17,0±2,12 1,74±0,22 —	$3,11\pm1,36$ $2,71\pm1,18$ 910 ± 209 $10,46\pm2,40$ $3,25\pm0,09$ $15,7\pm1,24$ $1,36\pm0,11$ $1,61\pm0,07$	$3,82\pm1,83$ $2,98\pm1,43$ 264 ± 74 $3,38\pm0,95$ $2,87\pm0,06$ $13,9\pm1,31$ $1,09\pm0,10$ $1,50\pm0,04$	$3,48\pm1,57$ $1,46\pm0,66$ 409 ± 41 $9,77\pm0,97$ $3,0\pm0,7$ $20,7\pm1,40$ $0,87\pm0,06$ $1,63\pm0,04$

^{*} Данные добавочной серии (интактные крысы) приведены в тексте. ** Содержание элементов в группах ПТГ+ТЕСТ+КОНТРОЛЬ.

образом, отражает интенсивность реабсорбции, и количество фтора в пересчете на 1 г креатинина в большей степени показывает начальное его выведение в мочу.

Для расчета на абсолютное количество выведенного из скелета фтора мы нормализовали его выведение к 20 мг креатинина в суточной моче. С введением данных поправок выявлен отчетливый эффект паратиреоидного гормона: выведение в первой группе (ПТГ) превышает фон на 20 %, во второй группе (ПТГ+ЭДТА) — на 38 %, в контроле оно практически не изменилось.

Из сопоставления данных первой и второй групп следует, что введение натриевой соли ЭДТА значительно усиливает эффект паратиреоидного гормона на выведение фтора. Механизм данного явления предполагается следующим: поступление в кровь комплексона сопровождается связыванием кальция плазмы и таким образом предотвращает повышение уровня кальция в крови, которое «запускает» выработку и выход в кровь антагониста ПТГ — кальцитонина, подавляющего резорбцию кости. В этих условиях действие ПТГ проявляется в более полной мере. В кровь, а затем в мочу выводится больше резорбированного фтора из скелета.

В первой группе через 24 ч после введения ПТГ в сыворотке крови концентрация кальция статистически выше, чем в контроле. Концентрация кальция во второй и третьей группах практически одинакова. Уровень фосфора в крови животных всех групп через 24 ч после ПТГ совпадает. Экскреция кальция

лод влиянием ПТГ возрастает вдвое, выведение фосфора в этом случае также статистически значимо превышает контроль (в 1,5 раза).

Результаты первой серии экспериментов интерпретированы как обеспеченные эндокринными реакциями, регулирующими кальциевый метаболизм, что прямо подтверждено данными второй серии. Так, при внутрибрющинном введении паратиреоидина через 30 мин уровень ПТГ в крови заметно повышается (от $2,24\pm0,48$ до $9,66\pm3,67$ МЕ/л), что хорошо объясняется происходящим в это время интенсивным всасыванием паратиреоидина, обладающего высокими иммунореактивными свойствами. Через четыре часа концентрация паратгормона в крови несколько снижается (до 1,43±0,17 МЕ/л), увеличивается уровень кальцитонина (от 486 ± 170 до 1069 ± 126 нг/л), наблюдаются количественные сдвиги концентраций некоторых других гормонов: альдостерона (от 1013 ± 246 до 1397 ± 106 пмоль/л), эстрадиола (от 157 ± 22.5 до 82 ± 19.0 пмоль/л), тестостерона (от $5,16\pm2,12$ до $0,89\pm0,03$ нмоль/л), пролактина (от $629,3\pm$ $\pm 136,2$ до $866,4\pm 209,8$ мМЕ/л), прогестерона (от $14,5\pm 4,3$ до 22.8 ± 1.0 нмоль/л).

Внутривенное введение Na₂ ЭДТА вызывает быстрое (через 30 мин) снижение уровня кальцитонина до 294 ± 55 нг/л, достоверное повышение концентрации паратгормона. Этот факт показывает, что влияние ЭДТА через связывание ионизированного кальция сыворотки, стимулирующего выброс в кровь собственного паратгормона организма, в то же время подавляет выведение в кровь кальцитонина. Наблюдается также ряд разнонаправленных сдвигов в концентрации некоторых других гормонов сыворотки, в том числе альдостерона.

Большие дозы хлористого кальция уже через 30 мин приводят к падению концентрации паратгормона, изменению уровня кальцитонина, тестостерона, эстрадиола, альдостерона, прогестерона.

Количественные результаты по каждой из подгрупп третьей серии экспериментов сведены в табл. 2. Представлены средние и стандартные отклонения в соответствии с вариантами применения паратгормона и комплексона на различных сроках от начала интоксикации фтором. Такое представление материала позволяет оценить изменения реакций в ответ на воздействие тестагентов ПТГ и ЭДТА в зависимости от продолжительности затравки животных фтористым водородом.

На рис. 1—7 показана динамика содержания минеральных веществ в скелете, крови и моче. Видна линейная зависимость содержания фтора в костях от времени затравки. Наблюдается также тенденция к повышению со временем содержания свинца (что можно объяснить перемещением подопытных животных к началу опыта из зоны ботанического сада в более загазованный центр города). Содержание цинка за этот период в скелете практически не изменилось.

Результаты третьей серии опытов

n	ФОН	n	ЭДТА	n	птг	n	TECT			
	Фтор, моча, мкг/24 ч									
5 23 15 26 14	$\begin{array}{c} 24.7 \pm 1.40 \\ 45.1 \pm 5.15 \\ 133.6 \pm 12.68 \\ 138.4 \pm 14.5 \\ 173.0 \pm 18.0 \end{array}$	22 5 5 7 5	$32,5\pm1,74$ $98,8\pm6,40$ $134,5\pm18,20$ $155,8\pm17,3$ $165,9\pm16,1$	11 12 10 12 —	20,2±1,67 45,7±3,81 79,7±17,40 117,6±13,0	11 11 9 11 9	$\begin{array}{c} 18,4\pm1,57\\ 51,6\pm4,50\\ 108,0\pm16,50\\ 145,7\pm12,3\\ 161,0\pm19,4 \end{array}$			
			Фтор, кровь,	, мкг/	100 мл					
6 5 7 5	7,37±0,88 9,60±1,68 8,00±0,66 14,50±0,97	6 - - -	6,3±0,47 — — — — —	6 5 7 —	$4,2\pm0,16$ $8,93\pm1,70$ $17,48\pm4,85$ $13,13\pm0,75$	5 6 5 7 5	4,4±0,43 4,07±0,26 15,18±3,69 9,91±0,85 14,70±0,65			
		•	Свинец, моч	іа, мк	г/24 ч					
23 17 28 13	$-4,5\pm0,54$ $5,6\pm0,60$ $3,3\pm0,42$ $1,8\pm0,55$	23 5 5 7 5	$\begin{array}{c} 25,8\pm3,27 \\ 53,8\pm14,77 \\ 35,5\pm9,14 \\ 50,2\pm5,49 \\ 27,9\pm11,28 \end{array}$	10 10 10 14 —	11,4±1,61 7,8±0,86 2,2±0,81	11 12 8 14 10	27,9±4,84 92,1±26,67 82,9±11,81 87,0±29,75 71,6±17,48			
•	•	•	Свинец, кр	ОВЬ, М	ікг/мл		•			
6 5 5	0.63 ± 0.04 0.53 ± 0.11 0.94 ± 0.17	6 - - -	0,69±0,10 — — — — —	6 5 -	0,40±0,04 0,72±0,07 0,63±0,12 —	6 6 5 - 5	0,45±0,07 1,18±0,10 0,60±0,06 — 0,87±0,20			
			Цинк, моч	а, мк	г/24 ч					
2 23 17 26 13	$5,6\pm1,55$ $17,1\pm4,05$ $20,1\pm5,53$ $8,3\pm0,52$ $9,6\pm1,53$	23 5 5 7 5	$91,3\pm6,39$ $94,4\pm16,66$ $75,8\pm17,82$ $103,1\pm14,48$ $15,3\pm2,27$	11 11 10 14 —	$7,3\pm1.25$ $19,3\pm2,78$ $12,7\pm2,82$ $8,4\pm1,03$	11 12 8 14 10	$ \begin{vmatrix} 47,1\pm6,14\\ 113,2\pm11,72\\ 86,5\pm8,40\\ 77,2\pm6,57\\ 129,2\pm9,13 \end{vmatrix} $			
			Цинк, кро	вь, мі	кг/мл					
6 5 - 5	$\begin{array}{c} - \\ 37,4\pm7,23 \\ 63,9\pm15,18 \\ - \\ 97,3\pm20,22 \end{array}$	5 - - -	54,3±5,48 — — — — —	6 5 4 —	81,8±30,40 39,6±2,57 99,7±16,85 —	6 5 - 4	39,5±6,43 51,7±2,04 50,4±18,68 — 69,0±16,78			

n	ФОН	n	ЭДТА	n	птг	n	TECT			
Фосфор, моча, мкМ/24 ч										
6	$712,0\pm35,2$	18	$601,2\pm45,8$	12	$504,9 \pm 40,9$	12	443,6±40,7			
5 20 15	502.3 ± 40.4 316.1 ± 23.7 373.2 ± 30.7	5 7 15	$\begin{array}{c}$	10 14 —	779,6±59,0 295,0±36.2	8 14 10	728,7±66,4 896,4±55,5 1008,6±8 4,3			
			Фосфор, кро	вь, м	кМ/мл					
6 5 7 5	- 2,70±0,17 4,00±1,08 2,89±0,24 2,38±0,14	6 - - -	2,58±0,10 ———————————————————————————————————	6 6 5 7	2,20±0,10 2,70±0,16 2,42±0,33 2,16±0,04	6 6 5 7 5	$\begin{array}{c} 2,32 \pm 0.06 \\ 2,19 \pm 0,41 \\ 2,71 \pm 0,56 \\ 2,37 \pm 0,17 \\ 2,41 \pm 0,09 \end{array}$			
			Магний, моч	а, мк	М/24 ч					
6 18 15 20 15	$49,1\pm8,80$ $44,1\pm5,38$ $35,6\pm6,84$ $36,6\pm3,93$ $44,2\pm6,25$	12 - 5 7 5	57,7±10,10 	12 12 — 14 —	65,7±7,40 56,1±5,79 — 29,6±2,83	6 12 10 14 10	$18,8\pm8,40$ $51,0\pm4,76$ $47,3\pm6,35$ $62,4\pm4,39$ $60,6\pm6,89$			
			Магний, кро	вь, м	кМ/мл					
6 5 - 5	$ 0.61\pm0.04$ 0.59 ± 0.04 $ 0.82\pm0.2$	6	1,02±0,09 — — — — —	6 6 5 —	0,71±0,05 0,57±0,03 0,54±0,02 —	6 6 5 5	$\begin{array}{c} 0,97 \pm 0,05 \\ 0,55 \pm 0,04 \\ 0,53 \pm 0,04 \\$			
			Қальций, кр	овь, в	икМ/міл					
6 5 - 5	- 1,97±0,10 3,4±0,15 $-$ 2,7±0,05	6 - -	5,45±0,16 — — —	6 6 5	2,15±0,12 1,8±0,05 4,1±0,25	6 5 - 5	$2,58\pm0,37$ $2,17\pm0,22$ $4,3\pm0,13$ $ 2,99\pm0,08$			
"	2,7 ±0,00	-					2,00 - 0,00			
			Ц елочная фосфо							
6 5 7 5	$-2,50\pm0,16$ $1,42\pm0,09$ $1,66\pm0,23$ $1,76\pm0,17$	6 - - - -	1,47±0,08 — — — — —	6 5 7 —	1,51±0,09 1,00±0,14 1,19±0,16 1,26±0,11	6 6 5 7 5	0.86 ± 0.09 1.28 ± 0.13 0.70 ± 0.05 1.13 ± 0.10 0.86 ± 0.08			

Примечание. Строчки в каждом разделе соответствуют срокам затравки фтором в течение 0, 3, 7, 12 19 недель.

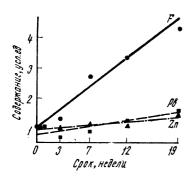


Рис. 1. Динамика содержания фтора, свинца и цинка в скелете крыс (нормировано к фоновому содержанию).

В ходе исследования по суточной экскреции фтора с мочой и содержанию его в крови не выявили достоверных различий между опытными сериями ФОН, ПТГ, ЭДТА, ТЕСТ. Отсутствие различий может быть объяснено высоким фоновым уровнем содержания фтора в сериях ФОН (по моче и крови), высокой

вариабельностью реакции внутри подгрупп, а также малым изменением реакции, лежащим за пределами чувствительности метода. В то же время обнаружили корреляцию на уровне 0,9—0,94 между суточной экскрецией фтора с мочой и содержанием фтора в скелете. Все эти величины находятся в линейной зависимости от продолжительности затравки. Углы наклонов линий регрессии по сериям данных содержания фтора в моче и скелете достоверно отличаются от нулевых.

Содержание фтора в крови и скелете коррелируется на уровне 0,6—0,7, и, хотя тенденция к увеличению содержания фтора в крови при увеличении его содержания в скелете прослеживается (различие между крайними значениями в сериях значимо на уровне 0,05 в серии ФОН, 0,01 в серии ПТГ и 0,001 в серии ТЕСТ), статистический анализ не позволяет сделать вывод о линейной зависимости содержания фтора в крови от уровня затравки. Это можно объяснить высоким содержанием его в мягких тканях в связи с малым сроком разобщения животных с фтором. При этом на высоком фоне неуловимы относительно небольшие изменения концентрации.

На рис. З объединены данные по экскреции с мочой фтора, свинца, цинка, магния и фосфора. Результаты по экскреции каждого элемента соотнесены с его выведением интактными животными серии ФОН. Для цинка значение нормирующей величины получено из другого опыта на идентичных животных (n=12), для свинца — экстраполяцией серии ФОН. Привлечение элементов-маркеров свинца и цинка позволяет оценить изменения реакции скелета на действие тест-агентов при поражении скелета. Абсолютные показатели суточной экскреции свинца с мочой дают значимое отличие между сериями ФОН, ПТГ, ЭДТА и ТЕСТ, что указывает на отчетливый эффект ПТГ и ЭДТА.

Количественное сопоставление данных позволяет расположить серии в возрастающей последовательности. Как и ожидалось нами, совместное введение животным ПТГ и натриевой соли ЭДТА резко усиливает эффект паратиреоидного гормона:

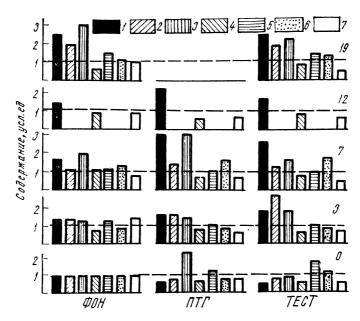


Рис. 2. Содержание элементов в сыворотке крови: 1 — фтора, 2 — свинца, 3 — цинка, 4 — фосфора, 5 — магния, 6 — кальция, 7 — щелочной фосфатазы; продолжительность эксперимента в неделях.

средние показатели серий ФОН и ПГТ различаются примерно в два раза (3,8 и 7,16 мкг соответственно), тогда как средние показатели серий ФОН и ТЕСТ различаются примерно в 20 раз (3,8 и 72,3 мкг). Очевидно, что сопоставление данных по выведению свинца показывает те реакции костной ткани на действие тест-агентов, которые не были выявлены при анализе выведения фтора. Уровень свинца в крови животных всех серий совпадает. В отличие от свинца на выведении с мочой цинка не сказывается эффект паратиреоидного гормона. Статистически не отличаются друг от друга серии ФОН и ПТГ, ЭДТА и ТЕСТ. В остальных случаях различия значимы. Не различаются по сериям уровни цинка в крови.

На рис. 3—6 сопоставлены в относительных единицах данные по экскреции с мочой фтора, свинца и цинка. Для всех трех элементов общим является несомненная фазовость реакции на действие паратиреоидного гормона. Наиболее четко эффект выражен в сериях ЭДТА и ТЕСТ. В серии ЭДТА введение одного комплексона подхлестывает активность паращитовидной железы и блокирует секрецию кальцитонина, элиминируя кальций крови. Заметна фазовость реакции на эндогенный ПТГ в серии ФОН. Имеются сведения [1] о заметном повышении активности паращитовидной железы при введении фтора в средних концентрациях. Экскреция элементов с мочой, содержание их в крови

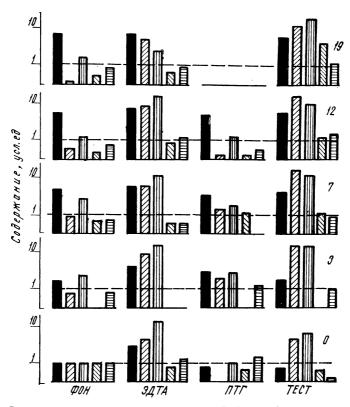


Рис. 3. Суточная экскреция элементов с мочой (усл. обозн. см. на рис. 2).

и скелете обусловлены совокупным действием всех механизмов обмена, в той или иной степени подвергнутых фторному воздействию. Фазовость реакции костной ткани на тест-агенты при возрастающих уровнях накопления в ней фтора можно дополнительно трактовать как неодинаковость его действия на разные группы остеогенных клеток. Репрезентативность представляемых данных недостаточна для персонификации реакций на фоне суммарного ответа всех групп остеогенных клеток.

На вариантах б и в (см. рис. 4—6) представлены простейшие примеры формализации зависимостей, изображенных на вариантах а. По варианту б можно судить об обобщенной динамике процессов, линеаризация данных по методу наименьших квадратов (вариант в) позволяет представить для обсуждения ряд общих свойств процессов выведения элементов (несмотря на то, что для отдельных серий линейная зависимость — весьма грубое приближение). Данные варианты интерпретации показывают, что доля выводимого фтора растет, углы наклона линий регрессии достоверно отличаются от нулевых. По цинку и свинцу про-

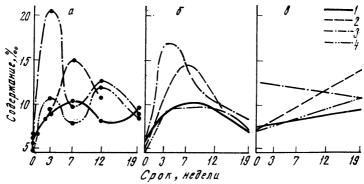


Рис. 4. Динамика фтора в моче в течение затравки фтором. 1— ФОН, 2— ПТГ, 3— ЭДТА, 4— ТЕСТ; a— фактические данные; b— интерпретация, II вариант.

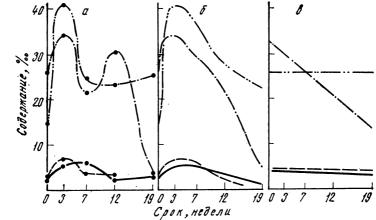


Рис. 5. Динамика цинка в моче в течение затравки фтором (усл. обозн. см. на рис. 4).

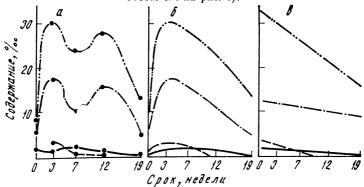


Рис. 6. Динамика свинца в моче в течение затравки фтором (усл. обозн. см. на рис. 4).

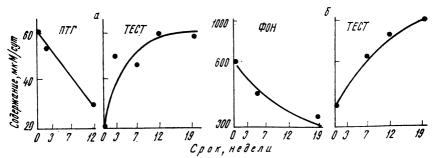


Рис. 7. Динамика суточной экскреции с мочой магния (a) и фосфора (б) в течение затравки фтором.

является тенденция к снижению доли выводимого элемента, что говорит об изменении реактивности костной ткани под влиянием затравки (чем длительнее срок, тем слабее эффект паратиреоидного гормона). К сожалению, максимальный достигнутый срок затравки, видимо, недостаточен для того, чтобы ослабление эффекта проявилось более отчетливо. Взаимное расположение линий регрессии всех серий по свинцу и цинку хорошо вписывается в рамки представлений о действии тест-агентов ПТГ и ЭДТА. Незначительное отличие друг от друга линий ФОН и ПТГ обусловлено мощным противодействием механизма поддержания кальциевого гомеостаза.

Существенные изменения обмена фосфора и магния (см. табл. 2, рис. 2, 3, 7) весьма сложны для интерпретации. С одной стороны, в серии ФОН выведение фосфора с мочой достоверно убывает, с другой — в серии ТЕСТ экскреция фосфора столь же достоверно возрастает, коррелируя с продолжительностью затравки фтором на уровне 0,98. В серии ПТГ наблюдается фазовость реакции выведения фосфатов на паратиреоидный гормон, причем пик приходится на семинедельный уровень затравки. Фоновое содержание магния при фторной интоксикации несколько понижается. Реакция выведения его на паратиреоидин при этом снижается более значительно, а на сочетанное воздействие паратиреоидина и ЭДТА (ТЕСТ) — повышается (см. рис. 7).

Отсутствие сдвигов фонового выведения кальция с мочой и заметной реакции на тест-агенты можно объяснить высокой прецизионностью регуляции кальциевого метаболизма.

Исследование уровня эндокринной активности при фторной интоксикации не выявило достоверных сдвигов уровней паратгормона в сыворотке крови, (ME/π): фоновый уровень — $2,69\pm0,21$; через три недели затравки — $2,24\pm0,71$; через семь недель — $2,99\pm0,56$; через 12 недель — $3,30\pm0,21$; через 19 недель — $2,96\pm0,32$. Эти изменения можно расценить как указание на тенденцию к повышению функциональной активности паращитовидных желез.

Выводы

- 1. Получено экспериментальное подтверждение существенного поражения минерального обмена при хронической фтористой интоксикации.
- 2. Признаками поражения служат фоновые изменения концентрации ряда эндогенных и абиогенных остеотропных и неостеотропных элементов (кальция, магния, фосфора, свинца, цинка, фтора) в организме и изменения обмена остеотропных свинца, цинка и фтора под влиянием нагрузочных тестов.
- 3. На начальном этапе интоксикации фтором (три недели) наблюдается повышение по сравнению с контролем интенсивности резорбции кости с выведением депонированного в ней свинца, фтора, цинка под влиянием паратиреоидина и ЭДТА. Затем эффективность ответа на гормональный стимул постепенно значительно снижается.
- 4. Остеотропные элементы в различной степени участвуют в реакции на ПТГ; на поведение неостеотропных элементов ПТГ и ЭДТА заметного влияния не оказывают.
- 5. Первичным звеном нарушения минерального обмена является непосредственное поражение фтором остеогенного клеточного аппарата.
- 6. Обнаруженные сдвиги в функциональном состоянии эндокринной системы и в обмене неостеотропных элементов объясняются вовлечением их в нарушения минерального обмена первичного звена и носят преимущественно вторичный характер.
- 7. Наряду со связыванием металлов в тканевых жидкостях установлен дополнительный механизм усиливающего влияния комплексона на выведение элементов из скелета под влиянием паратгормона. Он состоит в подавлении компенсаторной секреции в кровь кальцитонина в результате понижения концентрации в ней ионизированного кальция.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авцын А. П., Жаворонков А. А. Патология флюороза. Новосибирск: Наука, 1981. 116 с.

2. Алимова М. М. Микрометод определения органического фосфора, щелочной фосфатазы в сыворотке крови и неорганического фосфора в моче.—

Лаб. дело, 1964, № 6, с. 346—348.

- 3. Вишневская Т. Н., Лешевская Т. И. Колориметрическое определение содержания кальция в сыворотке крови с помощью мурексид-кальциевого комплекса, фиксированного глицерином.— Лаб. дело, 1976, № 7, с. 444—445.
- 4. Голутвина М. М., Кононыкина Н. Н., Рябикин Р. П. Определение микроколичеств фтора в моче и воде. Гигиена и санитария, 1971, № 5, с. 63—66.

 Индик В. С., Курочкин В. С., Лобаров В. Н. и др. Способ определения концентрации паров фторидов.— А. с. № 919985, 1981.

6. Книжников В. А. Қальций и фтор. Радиационно-гигиенические аспекты. М.: Атомиздат, 1975. 199 с.

7. Любашевский Н. М., Окунева М. К. Исследование участия

эндокринного аппарата кальциевого обмена в метаболизме инкорпорированного иттрия-91. В кн.: Комплексообразование и метаболизм радиоактивных изотопов. Свердловск, 1976, с. 125-144.

8. Любашевский Н. М. Метаболизм радиоизотопов в скелете позво-

ночных. М.: Наука, 1980. 255 с.

9. Любашевский Н. М., Безель В. С., Попов Б. В., Белова М. Н. Роль эндокринного аппарата кальциевого обмена в выведении комплексоном цинка. В кн.: Моделирование поведения и токсического действия радионуклидов. Свердловск, 1978, с. 16-22.

10. Радовская Т. Л., Круглова Н. В., Казюнь Т. К. Усовершенствование методики выделения в диффузионном приборе фтор-иона и

его определение. — Гигиена и санитария, 1980, № 8, с. 47—49.

11. Садилова М. С., Петина А. А. О гигиеническом значении малых концентраций фтора при различных путях поступления в организм.—

Гигиена и санитария, 1970, № 8, с. 14—17. 12. Токарь В. И., Щербаков С. В., Розенберг Е. Е. Сравнительная характеристика нарушения гормональной функции у рабочих производств алюминия и фторичных солей. — В кн.: Вопросы гигиены и профпатологии в цветной и черной металлургии. М., 1981, с. 36—39.

13. Токарь В. И. Состояние системы гипофиз-гонады у мужчин в условиях хронической фтористой интоксикации: Автореф. дис. ... докт. мед.

наук. М., 1983, 34 с.

Berger L., Guilford G. R., Bowers G. N. Alkaline and acid

phosphatase standart methods.—Clin. Chem., 1965, vol. 5, p. 211—221.

15. Bernstein D., Cohen P. Use of sodium fluoride in the treatment of osteoporosis.—J. Clin. Endocr., 1967, vol. 27, p. 197—210.

16. Bessey O. A., Lowry O. Ho, Brock M. J. A method for the rapid determination of alkaline phosphatase with five cubic millimetres of serum.—J. Biol. Chem., 1946, vol. 164, p. 321—330.

17. Deshmukh D. S., Maranger J. C., Shab B. The effect of dietary fluoride on Ca and P metabolism of rats.—Can. J. Physiol. Pharm., 1970, vol. 48, N.8, p. 503—509

1970, vol. 48, N 8, p. 503-509.

18. Elsair J., Merad R., Denine R. at al. Boron as an antidote in acute fluoride intoxication in rabbits: its action on the fluoride and calcium-phosphorus metabolism.— Fluoride, 1980, vol. 13, N 1, p. 30-38.

19. Faccini J. M. Fluoride and bone (review).—Calc. Tiss. Res., 1969,

N 3, p. 1—16. 20. Fisher D. R., Mays Ch. W., Dockum J. G. Decorporation of $^{241}\!Am$ from mouse bone using Zn-DTPA and parathyroid hormone.—Health.

Phys., 1976, vol. 30, N 4, p. 1220—1223.

21. Hall L. L., Smith F. A., De Lopez O. H., Gardner D. E. Direct potentiometric determination of total ionic fluoride in biological fluids.—

Clin. Chem., 1972, vol. 18, p. 1455—1458.

22. ICRP publication 20.—Health. Phys., 1973, vol. 24, N 2, p. 129-221. 23. Jolly S. S., Singla V. P., Sharma R. et al. Endocrine aspects of endemic fluorosis.—Fluoride, 1974, vol. 7, N 4, p. 208-219.

24. Strikantia S. G., Siddiqui A. H. Calcium metabolism studies in fluorosis.— Clin. Sci., 1965, vol. 28, p. 477—485.

25. Svoboda V. The physiology of mineral metabolism.— Anal. Chim.

acta, 1971, vol. 54, p. 121. 26. Teotia S. P. S.,

26. Teotia S.P.S., Teotia M. Secondary hyperparathyreoidism in patients with endemic sceletal fluorosis.—Brit. Med. J., 1973, N 1, p. 637—640.

27. Teotia S.P.S., Teotia M., Burns R. R., Heels S. Circulating plasma immunoreactive parathyroid hormone levels (IPTH) in endemic sceletal fluorosis with secondary hyperparathyroidism.— Fluoride, 1974, vol. 7, N 4, p. 200-208.

28. Vaughan J. M. The physiology of bone. Oxford, 1975. 319 p.

29. Zipkin J., Schraer R., Schraer H., Lee W. A. The effect of fluoride on the citrate content of the bone of the growing rat.— Arch. Oral. Biol., 1963, N 8, p. 119.

В. И. СТАРИЧЕНКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ОБМЕНА ТЕХНОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СКЕЛЕТЕ ПОЗВОНОЧНЫХ

К классу остеотропных техногенных элементов следует отнести фтор, бериллий, свинец, хром и другие токсические минеральные вещества и их радиоизотопы; производные тетрациклинового ряда и некоторые красители (например, ализарин), кумулирующиеся в кости; естественные и искусственные радионуклиды стронция, кальция, радия, фосфора, редких земель и других трансурановых элементов.

Анализ метаболизма остеотропных веществ и кальция позволил сделать вывод о качественной общности их путей обмена и применить системный подход к отбору факторов, в первую очередь влияющих на скелетный метаболизм. Морфологические структуры и физиологические процессы, ответственные за обмен остеотропных веществ в скелете позвоночных животных, были названы морфофизиологическими факторами обмена (МФФ). Из всего многообразия факторов была выделена система из 10 лимитирующих морфофизиологических факторов обмена (ЛМФФ) [6, 9].

Накопление остеотропных веществ в скелете определяют четыре фактора: кровоток через скелет, диффузибельность в крови, депонирующий агент и интенсивность обмена во внескелетных тканях и органах. Процесс выведения лимитируется шестью факторами: удельной десорбционной способностью, площадью поверхности скелета, интенсивностью роста и резорбции, обменом остеогенных клеток, соотношением «поверхность — объем» скелета.

Через систему ЛМФФ опосредуется влияние других процессов жизнедеятельности и внешней среды. Степень опосредования может быть весьма сложной и проявляться через действие на морфофизиологические факторы регуляторных систем организма и различных видов обмена веществ и энергии.

Данная работа посвящена изучению количественных параметров таких морфологических ЛМФФ, как величина площади поверхности скелета, соотношение «поверхность — объем» костной ткани, и таких физиологических факторов, как интенсивность процессов роста и резорбции. Эти факторы наиболее доступны для изучения с помощью морфометрических методов, и для количественного определения их параметров разработаны методы получения индивидуальных показателей.

Материал и методика

В работе использовали белых лабораторных крыс стадного разведения линии Вистар, а также костный материал от некоторых других видов (мышь линии ВАLВ/с, лягушка *R. ridibunda*, беспородные курица и собака). За исключением раздела работы по определению интенсивности роста и резорбции костной ткани все исследования проводили на взрослых животных, преимущественно самцах. Забой осуществляли с помощью эфирного наркоза.

Определение площадей нативных сорбирующих поверхностей. К нативным сорбирующим поверхностям относятся: внешняя (периостальная) всей кости, внутренняя (эндостальная), состоящая из поверхностей компактной кости и трабекул губчатой костной ткани, а также поверхность сосудистой системы. Все эти поверхности непосредственно прилежат к кровотоку.

В губчатой кости крысы имеются лишь единичные гаверсовы каналы, поверхность которых, по нашим расчетам, составляет менее 0,1% всей поверхности трабекул и поэтому может не учитываться. В компактной кости крыс площадь поверхности сосудистой системы достигает 790±60 мм²/г [4]. Данную цифру использовали для получения значения общей площади поверхности отдельных костей и всего скелета в целом, не определяя эту величину в каждом отдельном случае.

Отсутствие литературных указаний методического характера потребовало разработки собственной методики определения величин нативных поверхностей костей. Для измерения внешних поверхностей применяли метод коллодиевых реплик, внутренние поверхности вычисляли после аппроксимации отдельных участков костей правильными геометрическими фигурами [5]. Для площади поверхности трабекул в губчатой костной ткани в качестве промежуточных величин использовали показатель трабекулярности и значение удельной поверхности (см. ниже). Отдельно определяли плотность кости взрослой крысы, в среднем принятую нами за 1,8 г/см³ и использованную в расчетах, где требовалось сопоставление объемных и весовых единиц.

Площадь внешней поверхности костей определяли методом реплик из коллодия, который, высыхая на структурах сложного профиля, снимается с них в виде тонкой пленки, легко поддающейся измерению на миллиметровой бумаге. Использовали стандартный медицинский коллодий, который слегка подкрашивали ацетонрастворимой краской. Для лучшего снятия пленки кость перед опусканием в коллодий покрывали тонким слоем

косметического крема. Закрепленную на тонкой игле кость опускали несколько раз в коллодий, каждый раз давая высохнуть образовавшейся на поверхности пленке. Нарощенную таким образом пленку высушивали и снимали, делая разрезы глазным скальпелем. Части реплики, соответствующие выпуклостям кости, подрезали для придания пленке одноплоскостного положения, затем пленку фиксировали на бумаге.

Для оценки поверхностей внутренних структур из мелких костей готовили шлифы по методу Фроста [22]. Шлифование производили на мелкозернистой шлифовальной бумаге с последующей дошлифовкой на матовом стекле. Для контрастирования костной ткани шлифы окрашивали в течение 3—5 мин раствором ализаринового красного или дошлифовывали их с добавлением тонкого порошка цветного графитового стержня, заполняющего межтрабекулярные полости и оставляющего бесцветной костную ткань. Шлифы зарисовывали под микроскопом на рисовальном аппарате РА-4 в масштабе, рассчитанном при помощи объектмикрометра. Определяли параметры внутренних полостей костей. Отдельные части костей аппроксимировали правильными геометрическими фигурами, например, дистальный эпифиз бедренной и проксимальный эпифиз большеберцовой костей рассматривали как полушария, а эндостальную поверхность диафиза — как цилиндр [5].

Изучив распределение и форму трабекул в эпифизах бедренной и большеберцовой костей, позвонке и других содержащих спонгиозную ткань участках скелета, нашли, что, несмотря на имеющиеся различия в форме трабекул и плотности их распределения в отдельных участках скелета, существует высокая корреляция между площадью поверхности и массой и поэтому поверхность спонгиозной ткани может быть определена по массе.

Плоские кости в том месте, где они полностью лишены спонгиозы, рассматривали как две параллельные пластинки, между которыми вставлены единичные трабекулы. Суммируя полученные значения площадей поверхностей и учитывая значение площади поверхности для сосудистой системы соответственно массе костной ткани данной кости, находили величину общей сорбирующей поверхности отдельных костей и всего скелета. Количественные данные по распределению структур в различных костях скелета использовали также для оценки соотношения губчатой и компактной костной ткани в отдельных костях и во всем скелете.

Определение величины удельной поверхности (S/V). Нахождение данного параметра в компактной кости аналогично определению площадей внешних поверхностей костей. Измерение площадей поверхностей производили на образце, выпиленном из середины диафиза. Поверхности спила не учитывали. Объем образца определяли непосредственно или косвенно через плотность кости.

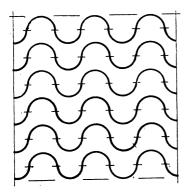


Рис. 1. Сетка для одновременного измерения площадей и длин отрезков [29].

Получение количественных данных, характеризующих губчатую кость, сопряжено с определенными трудностями, связанными с особенностями ее строения. В последние годы в ряде исследований была показана возможность количественной оценки структуры губчатого вещества различных костей на основе сте-

реологического анализа [2, 16, 28, 33].

Стереологические методы, базирующиеся на законах геометрической вероятности, представляют собой сложные методы исследования трехмерных структур с помощью двухмерного среза через объемное тело. В двухмерной поверхности (срез, шлиф, проекция) пространственные объекты проявляются как площади, поверхности — как линии, линии — как точки.

Согласно принципу Делиссе [29], части объема смешанной структуры относятся друг к другу как их площади в поверхности среза (шлифа, проекции), поэтому допустимо из величины площадей составляющих среза делать вывод об объемах, а из длин линий раздела компонентов — о площадях поверхностей изучаемых структур. Этот вывод справедлив для предположения, что определяемые структуры расположены и ориентированы случайно. Губчатая костная ткань — образец именно такой структуры, составляющими которой являются трабекулы и костный мозг, заполняющий межтрабекулярные полости, а линиями раздела компонентов в срезе служат поверхности трабекул.

Для одновременного измерения площадей и длин отрезков может служить предложенная Мерцем [29] сетка, состоящая из 36 точек и решетки полукружий (рис. 1). Сетка накладывается на изображение среза (шлифа), подсчитывается число линий пересечения с костными трабекулами и количество точек сетки, расположенных на костной ткани. Величину удельной поверхности (см²/см³, т. е. см $^{-1}$) находят по формуле $S/V = N/P \times 1,273/d$, где N— количество точек пересечения; P— число попаданий сетки на костную ткань; d— константа сетки, равная диаметру полукружий; 1,273— константа, учитывающая случайность ориентирования трабекул.

Измерения производили непосредственно под микроскопом. Сетку Мерца фотографировали на пленку «Микрат-300» и помещали в фокусе окуляра. Ее константу для рабочего увеличения устанавливали с помощью объектмикрометра. Исследовали шлифы эпифизов длинных трубчатых костей, проходящие перпендикулярно длинной оси кости. Шлифы мелких костей при-

готовляли аналогично описанному выше, крупные кости предварительно озоляли в муфельной печи до черного цвета и для получения высокого контраста шлифовали с добавлением на матовое стекло талька.

Измерения проводили на бинокулярном микроскопе МБС-2 при общем увеличении × 56. Исследовали всю поверхность препарата, причем выбирали участки с неповрежденными костными структурами. Поверхность каждого шлифа изучали при трех — восьми произвольных положениях сетки (в зависимости от величины поверхности шлифа). У мелких животных (мыши, лягушки) общее количество изученных участков в эпифизе отдельной кости не превышало 10, у крысы и курицы оно равнялось 20—40, доходя у собаки до 90. При таком количестве измерений величина относительной погрешности измерений не превышает 5 % [29].

Среднее значение для данной кости индивида находили при суммировании всех результатов по этой кости, независимо от места расположения изучаемых участков.

Определение доли костного объема в губчатой кости. Данную величину находили одновременно с удельной поверхностью, определяя ее как отношение поверхности шлифа, занятой костью, к общей поверхности, численно равное отношению числа точек сетки, попадающих на костную ткань, к их общему числу.

Определение весового соотношения губчатой и компактной костной ткани (показатель трабекулярности, или трабекулярность кости). Данное соотношение представляет собой промежуточный параметр для определения величины нативной сорбирующей поверхности спонгиозы. В физиологии скелета оно служит показателем степени порозности губчатой кости: чем выше остеопороз, тем сильнее сдвинуто это соотношение в сторону компактной кости.

Нами разработан метод определения данной величины. Отпрепарированные и подсушенные кости распиливали вдоль и озоляли в муфельной печи при температуре 500—700 °С до серого каления (при озолении кости до черного каления она сохраняет известную прочность, мешающую работе; озоление до белого каления придает образцу излишнюю хрупкость). Проведенное в подобных условиях озоление навесок костного мозга показало, что в этом случае выгорает около 99 % его массы. Оставшийся один процент массы костного мозга, хотя и может быть учтен при дальнейших расчетах, составляет ничтожную величину от массы самой кости, и им можно пренебречь. Однако для уменьшения ошибки, вносимой присутствием костного мозга, перед озолением доступные массы его удаляли.

Озоленные образцы очищали от остатков костного мозга и костной крошки и взвешивали. Выламывали трабекулы, ставшие в результате озоления достаточно хрупкими, кортикальный «каркас» взвешивали. Для перевода относительных величин в абсолютные необходимо знать коэффициент озоления костной

ткани, легко получаемый при параллельном озолении образца компактной кости и равный $K_k = P/P'$, где P, P' — масса образца до и после озоления соответственно. При работе с мелкими костями для учета потерь костной ткани при распиле должна быть известна также величина массы золы симметричной кости того же индивида (для крупных костей костные опилки могут быть собраны и взвешены). Тогда сырая масса трабекул может быть высчитана по формуле $P = \operatorname{Tp} P_c K_h$, где Tp — трабекулярность, $P_c = \operatorname{Tp} P_c K_h$ масса симметричной кости после озоления, K_k — коэффициент озоления компактной кости. Данная методика пригодна только для костей с хорошо развитым слоем компактной кости.

Определение интенсивности роста и резорбции. В настоящее время в качестве маркеров ростовых процессов в кости и зубах широко используются антибиотики тетрациклинового ряда, которые, попадая в организм, откладываются на поверхностях скелета, подверженных в данный момент процессу новообразования [1, 27]. Обнаружение антибиотика производится в ультрафиолетовом свете, при котором тетрациклин флуоресцирует желтым цветом, а интактная кость — слабо-голубым. Однако при большом увеличении видно, что отложение тетрациклина имеет также место на костных поверхностях сосудистой и каналикулярно-лакунарной систем, но кумулирование его этими поверхностями незначительно, поэтому при малом увеличении микроскопа объем кости кажется не содержащим антибиотика. При введении в организм двух меток, отстоящих во времени, на шлифах кальцифицированных тканей скорость аппозиционного отложения костного вещества или дентина определяется как частное от деления расстояния между метками на время между их введением. На процесс резорбции указывают прерывистость линий, изменение их конфигурации.

С целью определения роста и резорбции и соответствующего им распределения тетрациклина в костях крысы [10] в онтогенезе опыты ставили на потомстве двух одновременно родивших крыс (16 детенышей), которым дважды с интервалом 3—7 сут подкожно вводили раствор тетрациклина из расчета 20 тыс. ед./100 г массы тела. Животные были разделены на пары. Первой паре первую инъекцию производили на третьи сутки жизни, другим — на 5-, 7-, 10-, 17-, 24-, 30- и 37-е сутки. Животных забивали через 3—4 дня после второй инъекции. Фиксацию костного материала производили в этиловом спирте, шлифы приготовляли аналогично описанному выше. Были полготовлены поперечные и продольные шлифы большинства костей скелета. От каждого животного получали 25-30 шлифов, которые изучали в отраженном свете на микроскопе МБР-3 с люминесцентной приставкой ОСЛ-1. Учитывали наличие одинарных и двойных тетрациклиновых меток, их локализацию. После качественной оценки распределения антибиотика во всем скелете в разные возрастные сроки в качестве репрезентативных участков выбрали длинные трубчатые кости, а именно: бедренную и большеберцовую, а для сравнения — постоянно растущую часть скелета — резец нижней челюсти. В этих костях изучали темпы новообразования костной ткани, для чего окулярмикрометром измеряли расстояние между двумя метками. Одновременно в длинных трубчатых костях делали промеры ширины костномозговой полости и толщины стенки на уровне середины диафиза.

Прослежено распределение тетрациклина в аналогичных участках скелета у 2—3- и 6—10-месячных животных (всего 12), которые практически перестали расти (масса тела 400—500 г), а также в скелете 10 животных, которым была произведена одна инъекция в 1—1,5-месячном возрасте и забитых через разные сроки после нее (от одной недели до двух месяцев).

Весь материал, приводимый в данной статье, подвергали статистической обработке с использованием общепринятых методов.

Результаты и обсуждение

Удельная поверхность, показатель трабекулярности и доля костного объема спонгиозы. В табл. 1 приведены средние данные и границы колебаний величины удельной поверхности в губчатой и компактной костной ткани, показатель трабекулярности и доля костного объема спонгиозы бедренной кости у пяти изученных нами видов. Не найдено какой-либо закономерности в изменении этих параметров при увеличении размеров и массы тела животных (исключая удельную поверхность кортикальной кости диафиза).

Сравнение собственных данных с литературными представлено в табл. 2. При этом из табл. 1 вынесены только результаты по видам, имеющим аналогичные характеристики в литературе. Видно сходство между нашими данными и данными других авторов. Различия значений, полученных в разных работах на сходном материале, могут быть связаны как с индивидуальными особенностями строения костей, так и с точностью применяемых методик. Однако достаточно близкое совпадение собственных результатов с литературными свидетельствует об адекватности примененного метода.

В табл. З представлены индивидуальные параметры исследованных факторов у тринадцати половозрелых крыс-самцов. Умеренный размах индивидуальных показателей внутри групп связан с однородностью выборки животных по полу, возрасту и несколько меньшей — по массе тела. Характерно уменьшение с возрастом показателя трабекулярности и величины удельной поверхности как спонгиозы, так и кортикальной кости, что несомненно связано с увеличением размеров костей. Ограниченность имеющихся в литературе данных для этого вида животных

Параметры морфологических МФФ у разных видов животных на примере бедренной кости

			Удельная пог см			
Вид	Масса животных, кг	n	спонгиозы дистального эпифиза	корти- кальной кости диафиза	Трабекуляр- ность, %	Костный объем, %
			$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X} \pm m$
Мышь	$0,028 \pm 0,001$	8	342±7 (318—370)	86 ± 4.3	$27,4\pm0,5$ $(25,1-30,2)$	$29,6\pm0,9$ $(27,1-33,7)$
Лягушка .	$0,094\pm0,017$	5	251 ± 15 (230—290)	54 ± 1.9 (48-56)	$8,6\pm0,8$ (7,1—11,0)	$(21,1)$ $(32,3\pm2,4)$ $(38,9-49,4)$
Крыса .	$0,317 \pm 0,009$	8	382 ± 7 (360-414)	$30\pm1,2$ (27-34)	$28,6\pm1,1$	$31,0\pm0,6$ (27,6-34,8)
	$0,542 \pm 0,038$	5	260 ± 6 (241—280)	23 ± 1.7 (19-26)	$21,2\pm1,6$	$33,3\pm0,8$ (26,9-40,0)
Курица	1,8±0,1	3	430 ± 13 $(415-450)$	$25\pm2,2$ (20-30)	$31,8\pm2,1$	33.8 ± 1.0 (32.3 + 34.7)
Собака	10,6—18,8	5	$ \begin{array}{c c} (415-450) \\ 230\pm 4 \\ (207-260) \end{array} $	$\begin{pmatrix} 10\pm0.5 \\ 18.5-11 \end{pmatrix}$	$30,5\pm0,6$ (27,0-32,8)	$(27,7\pm0,5)$ (23,5-30,1)

Примечание. В скобках — диапазон значений для последующего сравнения с литературными данными.

не позволяет сделать достаточно полное сопоставление. Приводимые в одной из работ [31] значения удельной поверхности и доли костного объема спонгиозы бедренной кости крысы двухмесячного возраста представляют собой сильно варьирующие величины (см. табл. 2), что связано с выделением метаэпифизарной пластинки роста в самостоятельную область исследования. Результаты, полученные нами, занимают промежуточное положение или несколько ниже сравниваемых, что связано с принадлежностью животных к более старшим возрастным группам, а также исследованием преимущественно в области эпифиза и метафиза.

Площади поверхности отдельных костей и всего скелета крысы. Общая величина площади поверхности отдельных костей и всего скелета в целом для пяти взрослых крыс представлена в табл. 4. У животных массой 342 ± 20 г площадь поверхности скелета, измеренная методом реплик и аппроксимации отдельных участков костей правильными геометрическими фигурами, составляет 775 ± 15 см². К сожалению, полное отсутствие в литературе аналогичных данных не дает материала для сравнения.

С целью верификации результатов мы попытались получить площадь поверхности всего скелета расчетным путем, используя в качестве промежуточных собственные данные по массе кост-

Удельная поверхность (см $^{-1}$) и доля костного объема спонгиозы (%) взрослых особей разных видов по собственным и литературным данным

						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
dr.				Вид	τ		
Параметр	Кость	Человек	Собака	Макака- резус	Мини- свинья	Крыса	Мышь
ы	LV	147 [14], 150 [17], 210 [20], 120 [28]	225 [28]			-	250—350 [28]
Удельная поверхность спонгиозы	F	96 [28]	207—260 (собств. данные)		_	360—640 [31] 240—414 (собств. данные)	318—370 (собств. данные)
онхдэвс	P	78 [16], 41 [28]				_	_
ыная по	Н		180 [30]		_	_	
Удел	М	190 [16]	185 [16]	190 [16]	130 [16]		380—460 [23]
	·S	231 [33]		_	_		
Доля костного объема спонгиозы	LV	25 [14], 15,3 [16], 15±4 [17], 25 [19], 12 [20], 27 [28], 13 [33]	37,3 [16], 35 [2 8]	19,8[16]			- ;
я костного об	F	15,5 [16], 25—30 [28], 8—35 [33]	41,4[16], 24—30 (собств. данные)	32,6[16]	46,1 [16]	28—50 [31], 27—40 (собств. данные)	_
Дол	Н	14,6[16]	29,8[16], 33,7[30]	24,2[16]	45,7 [16]		_

Примечание. LV — поясничный позвонок, P — теменная кость, F — бедренная кость, S — грудина H — плечевая кость, M — среднее значение по нескольким костям.

		Удельная пове	рхность, см-1		
№ п. п.	Масса, г	спонгиозы дистального эпифиза	кортикальной кости диафаза	Трабекуляр- ность, %	Костный объем спонгиозы %
		$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$		$\overline{X} \pm m$
1 2 3 4 5 6 7 8	325 315 325 285 280 335 315 355	359±14 407±16 381±20 365±17 414±22 374±24 383±28 370±24	$\begin{array}{c} 29 \pm 3,4 \\ 31 \pm 4,2 \\ 27 \pm 1,9 \\ 32 \pm 2,2 \\ 34 \pm 2,1 \\ 29 \pm 4,9 \\ 30 \pm 5,0 \\ 27 \pm 3,1 \\ \end{array}$	26,2 22,7 29,6 31,9 27,9 28,8 29,1 33,0	$\begin{array}{c} 33,7\pm1,4\\ 27,6\pm0,9\\ 30,1\pm1,6\\ 31,4\pm1,6\\ 28,3\pm1,8\\ 30,7\pm1,8\\ 32,0\pm1,8\\ 34,8\pm1,8 \end{array}$
Среднее	317±9	382±7	30±1,2	28,6±1,1	31,0±0,6
9 10 11 12 13	445 540 675 545 505	$\begin{array}{c} 280 \pm 14 \\ 266 \pm 26 \\ 252 \pm 12 \\ 241 \pm 12 \\ 272 \pm 11 \end{array}$	$26 \pm 3,5$ $22 \pm 2,9$ $19 \pm 2,0$ $24 \pm 4,4$ $23 \pm 5,1$	26,5 19,8 17,3 22,8 19,6	$40,0\pm1,4$ $28,6\pm3,3$ $35,8\pm1,0$ $30,6\pm1,7$ $26,9\pm1,5$
Средн ее	542±38	260±6	23±1,7	21,2±1,6	33,3±0,8

Примечание. 1—8 — молодые взрослые животные, 9—13 — прекратившие рост.

T аблица 4 Площадь поверхности отдельных костей и всего скелета крысы, см 2

•						
Масса, г	бедренная	больше- берцовая	нижне- челюстная	тазов ые	лопатка	Весь скелет
351 270 398 347 344	30,3 30,8 40,7 27,5 31,8	21,5 20,2 24,3 17,5 19,8	17,9 14,4 20,0 18,8 17,8	40,3 35,7 49,4 38,1 37,9	9,8 8,2 11,9 8,8 8,8	783 738 828 759 767
Среднее 342±20	32,2±2,2	20,7±1,1	17,8±0,9	40,3±2,4	9,5±0,6	775±15

Величина площади поверхности скелета животных разных видов, полученная расчетным путем

_	Исход	цные показател	И	Площадь поверхности	Macca		
Вид	Масса, г	Объем, см³	S/V, cm-1	всего скелета, см²	тела, кг	Источник	
Мышь Крыса	0,428/1,712 3,133/10,087	0,214/0,856 1,741/5,604	300/30 380/30	89,9 830	0,03 0,32	[25] Собствен- ные данные	
Собака Человек	128/512 1000/4000	64/256 500/2000	210/30 120/30	21120 120000	9 70	[25] [13, 25, 26]	

^{*} В числителе — трабекулярная костная ткань, в знаменателе — компактная.

ной ткани и величине удельной поверхности спонгиозы и компактной кости у достаточно близких по массе тела крыс (см. табл. 3). Получение площади поверхности всего скелета расчетным путем стало возможно только после детального изучения распределения в скелете губчатой костной ткани. У описываемых животных трабекулы составляют 23,7 % от массы собственно костной ткани всего скелета. Разные авторы дают различные оценки процентного отношения компактной и трабекулярной тканей преимущественно в скелете человека. По данным Международной комиссии по радиологической защите [13, 26], для условного человека была выбрана величина 20 % сырой массы кости для трабекулярной ткани и 80 % — для компактной. Этим же соотношением пользуются авторы при исследованиях на других видах позвоночных [16, 25, 28].

Величина площади поверхности, полученная расчетным путем, представлена в табл. 5 в ряду аналогичных литературных данных для мыши, собаки и человека. Хотя наши результаты (как конечные, так и промежуточные) попадают в интервал между мышью и собакой, слишком большой масштаб различий, существующий между представителями этих видов, не позволяет делать достаточно определенные количественные выводы. В то же время близкое совпадение результатов (775 и 830 см²), полученных разными методами, указывает на их достоверность.

Интенсивность роста и резорбции в скелете крыс в разные возрастные периоды. При качественном анализе установлено, что характер распределения тетрациклина в костном материале на первой неделе постэмбрионального развития резко отличается от распределения его в более поздние сроки. Кость в это время окрашивается диффузно; только в середине диафизов длинных трубчатых костей очень редко встречается метка в виде отчетливой полосы. Со второй недели жизни такая метка постоянно присутствует в диафизах. Поэтому животные, которым

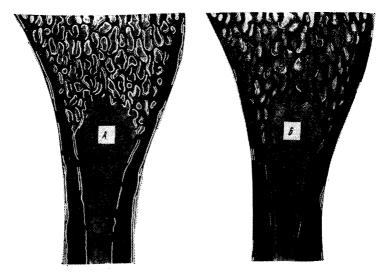


Рис. 2. Схема расположения тетрациклиновых меток (белые линии) в длинных трубчатых костях молодых интенсивно растущих (A) и старых прекративших рост (E) животных.

первая инъекция тетрациклина была произведена в первую неделю жизни, оказались носителями лишь второй метки, и интенсивность роста у них не определялась. Такое диффузное проникновение тетрациклина в кость может быть связано с меньшей, чем у старших возрастных групп, минерализацией кости [8, 13], что отражается на ее проницаемости. Поэтому наряду с диффундированием по каналикулам может осуществляться диффузия по недообызвествленной матрице. В то же время диффузность распределения может быть связана также с перестройкой костной ткани, что ведет к «перемешиванию» и «замуровыванию» более молодых участков кости.

Отмечены большие внутрискелетные различия по темпам перестройки кости. Каждая кость в определенный возрастной период имеет свою характерную картину расположения меток, которая не совпадает с картиной распределения в другой кости, что может быть связано с периодичностью роста отдельных костей, с процессами формообразования, специфичными для каждого отдела скелета, с физической нагрузкой. В качественном отношении происходящие процессы однотипны во всем скелете. Наиболее изученные нами длинные трубчатые кости являются репрезентативными образцами ростовых процессов костной ткани. Новообразование кости в диафизе идет в основном со стороны периоста (рис. 2, A), где наблюдаются одна или две светящиеся полосы, расстояние между которыми зависит от возраста и направленности формообразовательных процессов.

В некоторых случаях одна светящаяся полоса может быть знаком одной из произведенных инъекций (если вторая метка к моменту забоя на данном участке уже резорбировалась), в других — результатом слияния обеих меток, если интенсивность костеобразования в данном месте мала.

Темпы роста со стороны периостальной поверхности у молодых растущих животных колеблются в довольно широких пределах (от 3—4 до 20—30 мкм/сут) не только у отдельных особей,

но и в различных участках одной и той же кости.

Появление двойной метки с эндостальной поверхности по сравнению с периостальной несколько запаздывает. До конца второй недели здесь наблюдается одинарная прерывистая метка, указывающая на протекающий в этом месте процесс резорбции. На более поздних сроках отмечено появление двойной метки, сдвинутой к метафизарным концам. По мере взросления животного происходит увеличение протяженности двойной метки со стороны эндоста, например, у двух-трехмесячных животных она может на продольном шлифе тянуться не прерываясь от одного метафиза к другому, что наиболее выражено для большеберцовой кости.

Скорость эндостального костеобразования в группе молодых растущих животных находится в интервале 4—15 мкм/сут, редко отклоняясь в сторону увеличения.

В губчатой кости эпифизов и метафизов по краю трабекул встречается как одинарная, так и двойная метка. Балки в зоне роста кости, т. е. в области метаэпифизарной пластинки, несут больше меток, чем окружающая их костная ткань; поэтому при изучении препарата при малом увеличении зона роста имеет вид полосы, люминесцирующей несколько ярче соседних участков.

Измерение ширины костномозгового канала и толщины костной стенки на уровне середины диафиза показало, что, несмотря на сильное изменение размеров и формы костей при сравнении 10-дневных и полуторамесячных животных, увеличение диаметра костномозгового канала не превышает двукратной величины. Утолщение кости в середине диафиза происходит за счет наложения новой кости с периостальной поверхности и умеренной резорбции со стороны эндоста.

Картина распределения тетрациклиновых меток в костях 6—10-месячных животных резко отличается от их распределения у молодых животных (рис. 2, Б). Сильно сокращается интенсивность флуоресценции каждой метки, несмотря на одинаковую дозу введенного тетрациклина в расчете на единицу массы тела. Уменьшается и количество встречающихся меток. Одинарная или двойная метки уже не представляют собой продолжительной непрерывной линии со стороны эндоста или периоста, а располагаются разрозненными участками. Двойная метка чаще всего встречается в трабекулярной кости, в кортикальной кости

Скорость периостального костеобразования на уровне середины диафиза, мкм/сут

Возраст, сут.	Бедренная кость ————————————————————————————————————	Большеберцо- вая кость $\overline{X} \pm m$	Возраст, сут.	Бедренная кость ————————————————————————————————————	Большеберцовая кость $\overline{X} \pm m$
10	8,5±0,5	7,9±0,8	34	6,4±0,4	6,1±0,5
14	8,2±0,7	8,1±0,6	40	5,6±0,4	5,2±0,2
20	7,8±0,9	7,3±0,6	60—65	4,4±0,5	4,3±0,2
27	6,9±0,5	6,5±0,4	80—90	2,9±0,2	2,7±0,2

она редка, и ее местоположение не связано с определенными локусами. Видимо, в этом случае имеет место включение тетрациклина в места костных перестроек, индивидуальных не только для каждого животного, но и для каждой кости. Метаэпифизарная зона роста на препарате в виде полосы светит несколько ярче, что связано с продолжительным ростом скелета крыс [7].

Скорость аппозиционного формирования костной ткани в локусах перестройки составляет 0,5—2,8 мкм/сут, существенно не отличаясь в кортикальной и трабекулярной кости. Хотя известно, что характер новообразования кости имеет прерывистый характер (сезонные, суточные и другие ритмы роста), мы считаем, что в рамках используемого временного интервала между инъекциями тетрациклина (3—7 сут) процесс костного новообразования отражает только индивидуальные особенности организмов.

В качестве примера приводится скорость периостального костеобразования на уровне середины диафиза бедренной и большеберцовой костей (табл. 6). Видно закономерное снижение с возрастом скорости прироста костной ткани. В начальный период исследования эта величина составляла $8,5\pm0,5$ мкм/сут в бедренной кости и $7,9\pm0,8$ мкм/сут в большеберцовой; к 34-м суткам наблюдалось снижение до $6,4\pm0,4$ и $6,1\pm0,5$ мкм/сут соответственно и прогрессирующее убывание к трем месяцам до $2,9\pm0,2$ и $2,7\pm0,2$ мкм/сут.

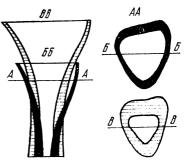
По литературным данным [12], величина периостального костеобразования на уровне середины диафиза большеберцовой кости у крыс линии Вистар СПФ в возрасте 2,5—3 месяцев составляет $2,1\pm0,2$ мкм/сут, уменьшаясь через 25 суток до $1,4\pm0,2$ мкм/сут. При достаточно хорошем совпадении с нашими данными, относящимися к животным той же возрастной группы, имеющаяся разница результатов может быть обусловлена использованием несколько отличающихся животных.

Все полученные нами картины распределения тетрациклина

Рис. 3. Схема Y-образного роста длинной трубчатой кости [21, 24].

в различных участках одной и той же кости хорошо объясняются наличием трех механизмов роста.

1. В середине диафиза расширение его просвета и утолщение стенки происходят за счет резорбции со стороны эндоста и аппозиционного наложения со стороны периоста (рис.



- 3) [21, 24]. При введении радионуклида молодому растущему животному он диффузно откладывается в кортикальной кости. Через некоторое время часть радионуклида со стороны эндостальной поверхности «уходит» вследствие резорбции. За счет перераспределения новая нарастающая костная ткань намного слабее помечена радиоактивностью [6]. Действительно, в середине диафиза у интенсивно растущих животных не бывает двойной метки тетрациклина со стороны эндоста, зато она постоянно наблюдается со стороны периоста (см. рис. 2, 4).
- 2. В области метафизов, напротив, с эндостальной поверхности часто наблюдается двойная метка. Это объясняется Y-образным механизмом роста [21, 24]. На рис. З изображена его схема. Видно, что рост происходит вследствие надстраивания со стороны эндоста и резорбции с наружной стороны.
- 3. Трубчатые кости растут в длину вследствие энхондрального окостенения.

Наблюдаемая нами неравномерность аппозиционного роста кости не только в разные возрастные периоды и в различных отделах скелета, но и в пределах одной и той же кости неоднократно описана как у животных, так и у человека. Так как рост трубчатой кости в длину и ширину происходит пропорционально, то полученные нами результаты вполне согласуются с утверждением о том, что разная скорость аппозиционного роста в различных отделах одной и той же кости связана в первую очередь с функциональными особенностями данных отделов. Будучи хорошо объяснимым с точки зрения постнатального развития скелета, явление неравномерности аппозиционного роста даже в пределах одной кости обусловливает большие трудности при попытке количественно оценить прирост костной ткани в целом организме.

Качественные выводы по данному разделу работы, совпадающие с другими исследованиями в этой области, можно свести к следующему: у молодых животных скорость аппозиционного роста больше, чем у взрослых; во все возрастные периоды велики внутрискелетные вариации не только у разных животных, но и у одной и той же особи и в пределах одной кости;

в диафизах длинных трубчатых костей молодых индивидов имеет место активное периостальное костеобразование и относительно небольшое эндостальное, в то время как у взрослых прекративших рост животных — очень небольшое как эндостальное, так и периостальное костеобразование; в губчатой кости молодых животных большая часть поверхности трабекул занята тетрациклиновыми метками, у взрослых животных количество меток значительно меньше; процесс костеобразования возможен с любой поверхности кости и в любом ее участке.

Скорость аппозиционного роста не является показателем ростовых и обменных процессов во всем скелете. Таким индикатором мог бы служить объем ежедневно прирастающей кости. Однако для количественного определения этой величины кроме скорости аппозиционного роста необходимо также знать площадь костной поверхности, занятой перестройкой. Широкий диапазон активности роста, наблюдаемый в различных участках одной и той же кости, наряду с неправильной формой костей и сложностью определения площади костного новообразования в губчатой ткани затрудняет установление величины скорости костного формирования даже в отдельно взятой кости или ее участке [12, 27].

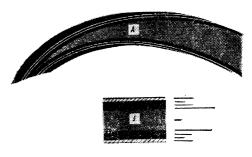
В некоторых работах приводится эта величина, высчитанная для целого скелета или отдельных его участков [13, 26, 28], однако она опирается на множество допущений, которые не правомерны при оценке индивидуальных особенностей роста. Отдельно же взятая кость, как было показано выше, лишь приближенно отражает процессы роста и физиологической перестройки, происходящие в организме. У молодых животных индивидуальные особенности распределения тетрациклина оказываются завуалированными возрастными особенностями, в то время как у взрослых закончивших рост животных индивидуальные особенности перестройки костной ткани проявляются наиболее сильно.

Определение скорости резорбции в локальных участках скелета с помощью гистологического метода дает достаточно точные результаты и используется для целей клинической диагностики. Однако в большинстве случаев требуется оценка резорбции во всем скелете. Общее количество резорбированной костной ткани в организме может быть определено с помощью кинетических методов, базирующихся на основе различных моделей обмена радиокальция и радиостронция в организме животных и человека, и с применением биохимических тестов по продуктам распада кости, выводимым в кровь и мочу.

Для крысы резорбция оценена гистологически в 0,52±0,17 мм³ кости/сут (при массе животных 130 г) [15] и кинетически в 48 мг Са/сут (при массе животных 200 г) [32]. По данным [18], прирост и резорбция у взрослой крысы равны приблизительно 50 мг Са/сут.

Рис. 4. Схема распределения тетрациклина и радиокальция в резце нижней челюсти крысы. А—продольный шлиф (белые линии—тетрациклин); Б—поперечный шлиф и диаграмма накопления радионуклида.

В связи с трудностью количественной оценки процесса резорбции костной ткани во всем орга-



низме нами выбран возрастной период от 6 до 10 месяцев, когда рост скелета крысы прекращается и процессы новообразования и резорбции находятся в состоянии динамического равновесия. Имеются указания на сильное замедление роста скелета крыс линии Вистар в эти же сроки, несмотря на наличие тонкой прослойки эпифизарного хряща.

Отдельно изучен резец нижней челюсти крысы как совершенно специфический, растущий всю жизнь отдел скелета. На рис. 4, А представлена картина распределения тетрациклина на продольном шлифе резца. Включение тетрациклина наблюдается всегда только со стороны пульпы. Метки идут параллельно пульпарной полости, со временем отодвигаясь от нее к внешнему краю. Расстояние между двумя метками на протяжении от дистального к проксимальному концу практически одинаково. До месячного возраста интенсивность новообразования дентина составляет 6—12 мкм/сут, в старших возрастных группах—16—20 мкм/сут. Через два месяца после введения тетрациклина 1—1,5-месячным животным метку можно было обнаружить лишь на самом конце резца (скорость роста резца определена нами в 400—430 мкм/сут).

На рис. 4, *Б* показана для сравнения диаграмма распределения кальция-45 на радиоавтограмме поперечного среза резца. Длина горизонтальных линий справа соответствует количеству включенного радионуклида. Основное количество радионуклида проникает в дентин со стороны пульпы, небольшое количество присутствует также в ранее сформированном дентине и заметно увеличивается в эмали. Объяснение этому находится в факте проникновения радионуклида по дентинным канальцам вглубь и в выделении его после внутривенного введения в слюну, из которой путем осаждения часть радионуклида попадает в эмаль резца [11].

Качественная картина распределения тетрациклина в резце и полученные нами количественные данные находятся в хорошем соответствии с известным механизмом роста резца крысы и с данными [3].

Мы считаем, что накопление в резцах остеотропных веществ не может расцениваться как показатель физиологического со-

стояния костной ткани, поскольку они обладают совершенно уникальными особенностями роста. Однако для радиологических целей может представлять значительный интерес тот факт, что количественные изменения содержания остеотропных веществ в резце могут быть показателем времени, прошедшего с момента поступления их в организм.

Таким образом, рассматривая судьбу тетрациклиновой метки в скелете крыс разного возраста, мы смогли оценить интенсивность ростовых процессов на протяжении жизни, а также выбрать возрастную группу животных, у которых процессы роста и резорбции уравновещены и об интенсивности резорбции костной ткани которых можно судить на основании более прецизионных измерений скорости костеобразования.

Выводы

- 1. Нами показана возможность получения наряду с групповыми индивидуальных количественно репрезентативных параметров нескольких важнейших лимитирующих морфофизиологических факторов обмена остеотропных веществ в скелете позвоночных.
- 2. Не найдено существенных различий параметров морфологических МФФ у представителей пяти изученных видов позвоночных. В то же время индивидуальные особенности этих параметров внутри разнородной по массе и возрасту группы особей одного вида могут превосходить их межвидовые различия.
- 3. Оценена интенсивность ростовых процессов в скелете крыс линии Вистар на протяжении жизни, а также выбрана возрастная группа животных, у которых процессы роста и резорбции костной ткани уравновешены и об интенсивности резорбции можно судить на основании скорости костеобразования.
- 4. Показано, что резцы крысы не являются представительными участками скелета при изучении физиологического состояния костной ткани. Однако они могут служить индикатором времени, прошедшего с момента поступления в организм остеотропных веществ (например, радионуклидов, тетрациклина, фтора, свинца).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко В. И. Определение локализации тетрациклинов в костной ткани флуоресцентным методом.— Антибиотики, 1959, т. 4, № 3, с. 44—49.

2. Докторов А. А., Денисов-Никольский Ю. И. Особенности структуры губчатого вещества позвонков человека в пожилом возрасте.-Арх. анатомии, гистологии и эмбриологии, 1981, т. 80, № 5, с. 5—12.

3. Клевезаль Г. А. Формирование суточных слоев в дентине резцов-

у грызунов.— Онтогенез, 1981, т. 12, № 5, с. 443—452.
4. Любашевский Н. М. Количественная оценка кровотока в костной ткани в эксперименте.— В кн.: Материалы VI Уральской конференцик физиологов, фармакологов и биохимиков. Свердловск, 1969, с. 269—271.

5. Любашевский Н. М., Шарыгин Л. М., Степина В. И. Нативные поверхности и сорбционная способность зрелой и формирующейся костной ткани. — В кн.: Метаболизм радиоизотопов в животном организме. Свердловск, 1974, с. 12—18.

6. Любашевский Н. М. Метаболизм радиоизотопов в скелете позво-

ночных. М.: Наука, 1980. 255 с.

 Мина М. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. М.: Наука, 1976. 291 c.

8. Расин И. М., Пантелеев Л. И., Сарапульцев И. А. и др. Закономерности формирования минеральной части скелета у млекопитаю-

щих.— Журн. общ. биологии, 1981, т. 42, № 1, с. 118—121.

- 9. Стариченко В. И., Попов Б. В., Любашевский Н. М. Анализ индивидуальной вариабельности обменных процессов в скелете крысы Pattus rattus.— В кн.: Грызуны. [Материалы VI Всесоюзного совещания]. Л., 1983, с. 193—194.
- 10. Стариченко В. И. Особенности кумулирования тетрациклина в резцах и кортикальной кости крыс в зависимости от возраста. В кн.: Регистрирующие структуры и определение возраста млекопитающих. М., 1984, c. 68—69.

11. Федоров Ю. А. Клиника и лечение гиперестезии твердых тканей

зуба. Л.: Медицина, 1970. 136 с.

12. Холтон Э. М., Бейлинк Д. Д. Количественный анализ некоторых параметров кости.— В кн.: Влияние динамических факторов космического полета на организм животных. М., 1979, с. 148—157.
13. Человек. Медико-биологические данные. М.: Медицина, 1977. 496 с. 14. Аmstutz H. C., Sissons H. A. The structure of the vertebral spongiosa.— J. Bone Jt. Surg., 1969, vol. 51, N 3, p. 540—550.

15. Вауlink D., Wergedal J., Stauffer M. Formation, mine-

ralisation, and resorption of bone in hypophosphatemit rats.- J. Clin. Invest., 1971, vol. 50, p. 2519—2530.

16. Beddoe A. H. A quantitative study of the structure of trabecular bone in man, rhesus monkey, beagle, and miniature pig.—Calcif. Tiss. Res.,

1978, vol. 25, N 3, p. 273—281.
17. Bromley R. G., Dockum N. L., Arnold J. S., Jee W.S.S. Quantitative histological study of human lumbar vertebrae.— J. Geront., 1966, N 21, p. 537—543.

18. Bronner F. Dynamics and function of calcium.— In: Mineral Meta-

bolism. N.Y.; London, 1964, vol. 2, part A, p. 342-444.

19. Dunnil M. S., Anderson J. A., Whitehead R. Quantitative histological studies on age changes in bone.— J. Path. Bact., 1967, vol. 94,

20. Dyson E. D., Jackson C. K., Whitehouse W. J. Scanning electron microscope studies of human trabecular bone.—Nature, 1970, vol. 225,

march 7, p. 957—959.

21. Enlow D. H. A study of the post-natal growth and remodeling of bone.— Amer. J. Anat., 1962, vol. 110, N2, p. 79—101.

22. Frost H. M. Preparation of thin undecalcified bone sections by rapid manual method.— Stain. Techn., 1958, vol. 33, p. 273—276.

23. Green D., Howells G. R., Thorne M. C. Morphometric studies a computer based image-analysis system.— J. Microsc.

dies on mouse bone using a computer-based image-analysis system.— J. Microsc. (Gr. Brit.), 1981, vol. 122, N 1, p. 49—58.

24. Ham A. W. Some histophysiological problems peculiar to calcified

tissues.— J. Bone Jt. Surg., 1952, vol. 34-A, p. 701—728.
25. Harley N. H., Pasternack B. S. A comparison of the dose to cells on trabecular bone surfaces from plutonium-239 and radium-226 based on experimental alpha absorption measurements.— Health Phys., 1976, vol. 30. N 1, p. 35—46.

26. ICRP Publication 20. Alkaline earth metabolism in adult man. Oxford:

Pergamon Press, 1973. 92 p.
27. Lee W. R., Marshall J. H., Sissons H. A. Calcium accretion

and bone formations in dogs .- J. Bone Jt. Surg., 1965, vol. 47B, N1,

p. 124—169.

28. Lloyd E., Hodges D. Quantitative characterization of bone: a computer analysis of microradiographs.—Clin. Orthopaed, 1971, N78,

p. 230.—250.

29. Merz W. A. Die Streckenmessung an gerichteten Strukturen im Mikroskop und ihre Anwendung zur Bestimmung von Oberflächen-Volumen-Relationen im Knochengewebe.—Mikroskopie, 1967, Bd 22, S. 132—142.

30. Momeni M. H., Pool R. R. Bone and bone marrow spaces in dosimetry of beagle skeletons.—Health Phys., 1975, vol. 29, N 6, p. 877—881.

31. Polig E. The influence of 241-Am and DTPA on morphometric parameters of the rat femur.—Rad. Env. Bioph., 1976, vol. 13, p. 27—41.

32. Stoclet J. C., Cohen Y. Calcium exchanges in the aorta of the rat.—In: Calcified Tissues 1965. Berlin; N.Y., 1966, p. 186—189.

33. Whitehouse W. J. Scanning electron micrographs of cancellous bone from the human sternum.—J. Pathol., 1975, vol. 116, N 4, p. 213—224.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

$B.~\mathit{И}.~\mathit{CTAPИЧЕНКО},~\left|\overline{\mathit{Б}.~\mathit{B}.~\mathit{ПОПОВ}}\right|, \ H.~\mathit{M}.~\mathit{ЛЮБАШЕВСКИЙ},~A.~\mathit{A}.~\mathit{MOKPOHOCOB}$

МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ОЧАГОВОМ НОВООБРАЗОВАНИИ КОСТИ И КИНЕТИКА ОБМЕНА ОСТЕОТРОПНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОРГАНИЗМЕ ПОЗВОНОЧНЫХ

Теоретические представления о существовании комплекса тесно взаимосвязанных лимитирующих морфофизиологических факторов (ЛМФФ), определяющих главные особенности обмена остеотропных элементов в организме позвоночных [3, 4], не только позволяют получить обоснованную интерпретацию и прогноз для обменных процессов на качественном уровне, но и служат основой для количественных (в частности, математических) подходов. Существенная трудность при количественном изучении взаимосвязи обмена остеотропных элементов и ЛМФФ заключается в необходимости точных численных значений всех параметров лимитирующих факторов. В то же время оценить вклад каждого из параметров на уровне целостного организма пока не представляется возможным. Поэтому мы попытались уменьшить количество варьирующих ЛМФФ, поставив опыт на достаточно однородной по полу, возрасту и массе тела выборке линейных животных, полагая, что при этом значения параметров ЛМФФ (интенсивность роста и резорбции костной ткани, величина кровотока, десорбционная способность и депонирующий агент) у них достаточно близки.

Как нами было показано ранее [2], в ряде случаев можно наблюдать линейную зависимость между массой и площадью поверхности губчатой кости, это позволяет по массе оценивать площадь поверхности и коррелирующие с ней параметры лимитирующих факторов. Именно это обстоятельство положено нами в основу опыта, в котором моделью увеличения площади поверхности служило различное количество новообразованной костной ткани в результате репарации переломов. Опыт должен был ответить также на вопрос о минимальных сдвигах параметров ЛМФФ, вызывающих достоверные отличия в кинетике радионуклида, которые можно выявить существующими методами на организменном, тканево-системном (в скелете) или локальном (суммарно по травмированным костям) уровнях.

Материалы и методика

Использовали 29 самцов крыс одного возраста (семь месяцев) и близкой массы тела (448±3 г). Животным наносили закрытые переломы различных костей скелета. Группы различали по количеству переломов, а также костям, на которых они были произведены. Всего выделили пять групп: I — контроль (интактные животные), II — два перелома, III — три, IV — пять, V — десять переломов. У животных подопытных групп ломали большеберцовую и малоберцовую кости, у крыс III группы, кроме того, плечевую, в IV группе — плечевую, лучевую и локтевую кости. В V группе переломы наносили на обеих передних конечностях, а также на двух лопатках. Животных два месяца содержали в условиях вивария. Есть указания, что через такой срок у крыс происходит полное срастание переломов [9, 11]. При множественных переломах, как было во всех наших группах, сроки образования костной мозоли могут как запаздывать, так и быть одинаковыми с одиночными переломами или даже уменьшаться по сравнению с ними [5]. Поскольку в предварительных экспериментах отмечали полное сращение переломов у крыс к двум месяцам, мы остановились на этом сроке репарации, после чего подопытным группам животных ввели иттрий-91. Далее в течение восьми суток проводили прижизненную радиометрию всего тела крыс.

Различия в накоплении радиоиттрия в зависимости от количества новообразованной костной ткани были получены как средние по каждой группе, состоящей из четырех — шести особей. Хотя данные не являются истинно индивидуальными, тем не менее тщательный подбор животных и их относительная генетическая однородность позволили предположить, что влияние очагового поражения — фактор, на фоне которого малосущественны другие особенности обмена.

Пяти животным (по одному от каждой группы), не подвергавшимся радионуклидному мечению и забитым одновременно с остальными, дважды (за 15 и 5 суток до забоя) вводили раствор тетрациклина. На костном материале этих животных произвели определение параметров ЛМФФ.

Результаты

Кривые выведения радиоиттрия по данным прижизненной радиометрии представлены на рис. 1. Кривые, характеризующие поведение иттрия-91 в подопытных группах, лежат несколько выше, чем у контрольной группы животных. Незначительные различия между кривыми по сравнению с погрешностью экспериментов, в которых получены эти кривые (рис. 2), не позволили выделить четкой зависимости между числом переломов

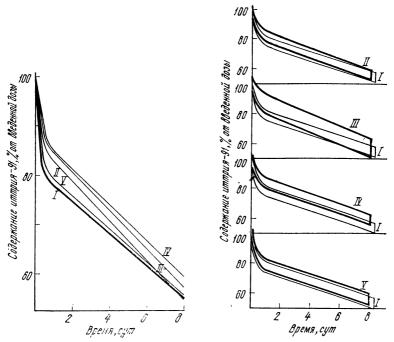


Рис. 1. Динамика содержания иттрия-91 в группах крыс, различающихся количеством переломов. $I-V- \mathrm{группы} \ \mathrm{крыс}.$

Рис. 2. Динамика содержания иттрия-91 в контрольной (I) и подопытных (II-V) группах крыс (с учетом вариабельности экспериментальных результатов).

Ширина зоны вариабельности равна удвоенному приведенному стандарту каждой группы.

и изменением в кинетике поведения радионуклида на уровне целостного организма.

В табл. 1 представлены данные по распределению иттрия-91 в организме подопытных животных. Содержание радионуклида во всем теле и в скелете следует той же закономерности, что и экспериментальные кривые введения, т.е. при выраженной тенденции к замедлению выведения иттрия-91 при увеличении количества нанесенных переломов разница между отдельными группами не достоверна. Накопление радиоиттрия в мягких тканях несколько ниже в контроле и повышается во всех экспериментальных группах. Последняя графа таблицы содержит сведения о количестве радионуклида в группе костей, которая включает большеберцовые, малоберцовые, плечевые, лопаточные, лучевые и локтевые кости обеих конечностей. Этот набор костей позволяет сравнить накопление радионуклида в совер-

Таблица 1 Распределение иттрия-91 в организме крыс, % от введенной дозы

_		Ве сь организм	Скелет	Мягкие ткани	Группа костей *
Группа	п	$ar{\chi}_{\pm m}$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$
I II III IV V	5 4 6 5 4	53,13±8,02 54,90±2,13 58,25±2,14 57,89±4,56 59,43±1,25	$44,90\pm2,93$ $46,02\pm1,74$ $49,49\pm2,30$ $49,39\pm4,62$ $50,29\pm1,35$	8,23±0,44 8,88±0,48 8,76±0,65 8,50±0,27 9,14±0,64	$\begin{array}{c} 6,50\pm0,42\\ 8,12\pm0,57\\ 9,23\pm0,42\\ 10,32\pm0,67\\ 12,22\pm0,75 \end{array}$

^{*} Объяснения в тексте.

Таблица 2 Параметры морфологических МФФ у представителей групп

Группа	Трабекулярность бедра, %	Удельная поверх- ность спонгиозы, см ⁻¹	Костный объем спонгиозы, %
		$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$
I II III IV V	22,8 19,6 22,9 17,6 21,2	237±7 269±3 268±6 272±8 .285±8	$32,2\pm1,1$ $28,6\pm1,1$ $31,9\pm0,8$ $27,8\pm1,1$ $28,3\pm0,6$
Среднее	20,8±1,0	266±3	$29,9 \pm 0,44$

	Δ	P	ΔA		
Группа	г	% от массы костной ткани скелета	% от введенного	% от накоплен- ного в скелете	
	$\Delta \overline{P} \pm m_{\Delta} \overline{P}$	$\Delta \overline{P} \pm m_{\Delta} \overline{P}$	$\Delta \overline{A} \pm m_{\Delta} \overline{A}$	$\Delta \overline{A} \pm m_{\Delta} \overline{A}$	
II III IV V*	0,1256±0,0421 0,1076±0,0268 0,3287±0,0286 0,3410±0,0613	$0,68\pm0,23 \ 0,54\pm0,14 \ 1,63\pm0,18 \ 1,71\pm0,31$	$\begin{array}{c} 1,57\pm0,35\\ 2,52\pm0,12\\ 3,43\pm0,27\\ 5,65\pm0,76 \end{array}$	$3,41\pm0,77$ $5,09\pm0,34$ $6,94\pm0,85$ $11,23\pm1,54$	

^{*} Сравнение произведено с костями контрольной группы.

Разница в содержании иттрия-91 в эксперименте и контроле ΔA , % от введенного

Груп-	Весь	Весь организм		Скелет		Группа костей		и симмет- контроль) сти
па	$\Delta \overline{A}$	$m_{\Delta}\overline{A}$	$\Delta \overline{A}$	$m_{\Delta}\overline{A}$	$\Delta \overline{A}$	$m_{\Delta \overline{A}}$	$\Delta \overline{A}$	$m_{\Delta}\overline{A}$
II III IV V	1,77 5,12 4,76 6,30	9,28 7,62 9,23 9,16	1,12 4,59 4,49 5,39	3,66 3,67 5,47 3,53	1,62 2,73* 3,82* 5,72*	0,69 0,60 0,79 0,81	1,57* 2,52* 3,43* 5,65*	0,35 0,12 0,27 0,76

^{*} Различия с контролем достоверны (p < 0.01).

шенно однотипной части скелета у всех животных и в то же время избежать влияния всех остальных костей, которые «смазывают» действие перелома. При таком сравнении обращают на себя внимание достоверные (p < 0.05) различия между соседними группами (недостоверно отличаются одна от другой лишь II и III группы) и достоверное увеличение накопления в III, IV и V группах по сравнению с контролем (p < 0.01).

Кости, подвергнутые перелому, морфологически различались в зависимости от типа строения. В длинных трубчатых костях наблюдали как сильное укорочение кости за счет смещения обломков и обильное новообразование костной ткани, охватывающей кость в виде муфты, так и срастание обломков «конец в конец», а также небольшое утолщение в месте перелома. Место перелома в лопатке иногда невозможно было обнаружить визуально. О нанесении травмы можно было судить лишь на основании радиометрических данных и после исследования в ультрафиолетовом свете.

Через два месяца после перелома на месте травмы сформировалась настоящая костная ткань. В длинных трубчатых костях новообразованная ткань сверху представлена тонким слоем компактной кости, по периметру переходящим в компакту первичной кости. Полость между этим слоем и перестроившимся травмированным участком диафиза заполнена губчатой костной тканью, строение которой вполне типично и напоминает спонгиозу в центре метафизов трубчатых костей. Прирост костной ткани, образовавшейся в результате репарации отдельных переломов, неодинаков. В некоторых случаях отмечено даже уменьшение массы сломанной кости по сравнению с симметричной костью противоположной конечности, несмотря на явное утолщение в локусе новообразования костной ткани. Поэтому сравнение двух аналогичных костей одного и того же животного не дает абсолютных значений прироста костной массы в

месте перелома, а в случае уменьшения массы кости свидетельствует лишь о резком перераспределении минерального вещества в пределах кости.

Количественное определение параметров ЛМФФ у пяти незатравленных радиоиттрием животных свидетельствует о наличии лишь небольших различий между ними, несмотря на различную тяжесть травмы. Так как эти животные были выбраны из групп совершенно произвольно, результаты, полученные на них, могут рассматриваться в качестве случайной выборки для оценки всей совокупности животных данного опыта.

В табл. 2 представлены индивидуальные и средние показатели таких ЛМФФ, как трабекулярность бедренной кости, удельная поверхность и костный объем спонгиозы, вычисленные суммарно по трем костям (бедренная и обе большеберцовые). Различия параметров служат выражением индивидуальной морфологической изменчивости, но так как размах ее невелик (коэффициент вариации не превышает 5 %), мы сочли возможным для этих ЛМФФ пользоваться средними данными при характеристике каждого отдельного животного.

Величину удельной поверхности новообразованной спонгиозы принимали равной средней величине, определенной в различных костях скелета пяти животных (266±3 см⁻¹). Площадь поверхности новообразованной костной ткани вычисляли как произведение прироста массы костной ткани и величины удельной поверхности (плотность кости принимали равной 1,8 г/см³).

Для определения интенсивности процессов роста и резорбции в качестве метки использовали двойную инъекцию тетрациклина. Кости взрослого животного (визуально с поверхности в ультрафиолетовом свете, на фоне общего слабо-голубого свечения самой кости) имеют ярко флуоресцирующие участки накопления тетрациклина, расположенные индивидуально для каждой кости. Для длинных трубчатых костей общим местом свечения являются участки кортикальной кости, примыкающие к губчатой ткани зон роста (т. е. соседствующие с метаэпифизарной пластинкой). У всех животных на продольных шлифах длинных трубчатых костей картина распределения тетрациклина сходна и типична для распределения тетрациклина у взрослых крыс. Интенсивность аппозиционного роста, измеренная на всех участках, несущих двойную метку, колеблется в пределах 0,9—2,8 мкм/сут.

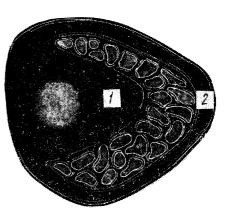
На ломаных костях наблюдали резкую границу между флуоресцирующей слабым голубым светом «старой» костью и ярко светящимся участком новообразованной костной ткани. В некоторых случаях (например, на лопатке) через два месяца после перелома макроскопически не замечали морфологических изменений поверхности, однако в ультрафиолетовых лучах место новообразованной костной ткани вырисовывалось очень четко. Таким же образом выявили два случайных перелома малобер-

Рис. 3. Схема распределения тетрациклиновых меток в новообразованной костной ткани на месте бывшего перелома. Большеберцовая кость. Поперечный шлиф.

I — предсуществовавшая «старая» кость,
 2 — новообразованная костная ткань. Белые линии — тетрациклин.

цовой кости в месте ее срастания с проксимальным концом большеберцовой кости.

Распределение тетрациклина в неповрежденных участках травмированной кости полностью согласовалось с картиной,



наблюдаемой в интактных костях. При рассмотрении шлифов, сделанных в плоскости, перпендикулярной длинной оси кости (рис. 3), и продвижении от одного конца перелома к другому наблюдали, что тетрациклиновая метка появлялась сначала с периостальной поверхности (место охватывания старой кости новообразованной костной тканью), затем возникала с эндостальной поверхности новообразованного участка кортикальной кости. Под новообразованной кортикальной костью располагалась трабекулярная ткань, несущая по всем своим поверхностям одинарную или двойную метку. Двойная метка занимала также значительную часть периостальной и эндостальной поверхности новой кортикальной кости, имея однако гораздо большую протяженность с эндоста. Интенсивность аппозиционного роста в новообразованной ткани колебалась в значительно больших пределах, чем в других участках скелета, и составляла 1,5--5,6 мкм/сут. Таким образом, все поверхности новообразованной костной ткани даже через такой длительный срок после перелома являлись поверхностями интенсивной костной перестройки, играя существенную роль в накоплении остеотропных веществ в скелете.

Обсуждение результатов

В табл. 3 представлены данные, характеризующие суммарный прирост костной массы ломаных костей и увеличение содержания радиоиттрия в них по сравнению с их аналогами на симметричной половине тела. При этом различия между группами в увеличении массы костной ткани были недостоверны, а различия в увеличении накопления радионуклида выражены отчетливо.

Для объяснения этого явления провели корреляционный анализ зависимости увеличения накопления радионуклида от

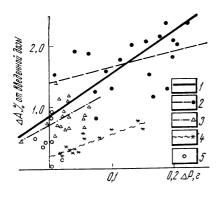


Рис. 4. Корреляция между содержанием радиоттрия (ΔA) и приростом костной массы (ΔP) в костях, подвергнутых перелому.

1 — суммарно по всем костям, 2—4 — кости: 2 — большеберцовая и малоберцовая, 3 — плечевая, 4 — лучевая и локтевая, 5 — лопатка.

прироста массы новообразованной костной ткани (рис. 4). Общий коэффициент корреляции составил 0,74±0,09. При таком значительном разбросе экспериментальных точек это

достаточно большая величина. Сам же разброс можно объяснить различиями в морфологии переломов отдельных костей. При сравнении коэффициентов корреляции отдельно для каждой группы костей обнаружили, что он уменьшается в направлении: лучевая и локтевая кости — плечевая кость — большая и малая берцовые кости — лопатка (0,89; 0,69; 0,41 и 0,12 соответственно). Поэтому увеличение массы ломаных костей не является абсолютной характеристикой группы и показателем числа переломов, оно отражает только тенденцию к общему нарастанию массы новообразованной костной ткани. Если репаративные процессы после перелома большеберцовой кости сопровождались относительно большим приростом массы, при переломе лопатки ее масса в пяти случаях увеличилась незначительно, а в трех стала меньше.

Во всех подопытных группах нами прослежены изменения в соседствующих с переломом участках скелета. Ввиду того, что большеберцовая и малоберцовая кости были сломаны у всех животных экспериментальных групп, прилежащая бедренная кость должна была находиться под непосредственным влиянием данного перелома. Сравнение производили с бедром противоположной конечности, которое принимали за контроль. Обнаружили достоверное уменьшение массы костной ткани на $4.9 \pm 0.5 \%$ от массы костной ткани симметричной бедренной кости. В то же время в контроле различие массы двух бедренных костей составляло $2.5\pm0.9~\%$ (при этом могла быть уменьшена масса костной ткани любой из двух костей, т. е. имела место известная асимметрия). В экспериментальных группах из 19 исследованных животных только у одного наблюдали незначительное увеличение массы костной ткани бедренной кости, прилежащей к перелому, во всех остальных случаях уменьшилась масса. Относительная разница в удельной активности костной золы от обеих бедренных костей у контрольных животных составляла 2,9±0,9 % (по отношению к наименьшей удельной активности), в подопытных группах эта величина

была значительно большей $(9,3\pm1,0\%)$, причем более высоким содержанием радионуклида характеризовалась проба бедренной кости, соседствующей с переломом.

У животных контрольной группы наблюдали некоторую асимметрию в накоплении радиоиттрия бедренными костями одного и того же животного, однако какой-либо зависимости от принадлежности костей определенной стороне тела не обнаружили. Хотя в экспериментальных группах и отмечали четко выраженное увеличение концентрации иттрия-91 в той кости, по соседству с которой был сделан перелом, однако общее содержание радионуклида в отдельных случаях могло быть даже меньше в результате снижения массы костной ткани. У 19 животных наблюдали три случая незначительного понижения общего содержания радиоиттрия в кости, три — равенства и в остальных — повышение.

К сожалению, описанные тенденции возможно было проследить только на бедренной кости. Полученные данные хорошо согласуются с понятием компенсаторной реакции костного органа, под которой понимается мобилизация механизмов, обеспечивающих восполнение частичного снижения функции [10]. Компенсаторные механизмы, вызывающие изменения структуры костей, многообразны. Сюда могут быть отнесены интенсификация обменных процессов, мобилизация «строительного» материала, активация регенераторных процессов. С позиции концепции ЛМФФ мы имеем дело с изменением таких факторов, как величина кровотока, площадь поверхностей, интенсивность роста и резорбции не только в поврежденном органе, но и в близлежащей кости, несмотря на значительный срок после нанесения травмы. Это еще раз подтверждает положение о том, что на местное костное поражение весь скелет в целом отвечает изменением метаболических реакций [6, 7, 9, 11, 121.

Данные исследования фосфорно-кальциевого обмена в организме при наличии перелома показали [11], что активное поглощение радионуклидов в месте перелома сопровождается их перераспределением во всем скелете и снижением включения в отдаленные от места перелома участки скелета. Происходит транслокация и стабильных элементов, присутствующих в самом организме. Имеются разногласия по установлению сроков восстановления метаболических реакций как в месте перелома, так и в отдаленных от него участках. Некоторые авторы считают, что физиологические показатели возвращаются к исходным к моменту полного сращения перелома (у крыс через два месяца) [9, 11]. Результаты нашего опыта, напротив, показывают повышенное накопление радионуклида в месте бывшего перелома. Это согласуется с мнением тех авторов [7], которые расценивают увеличение кумуляции радионуклида как свидетельство изменения минерального обмена.

В табл. 4 приведена разница в содержании радиоиттрия в организме, скелете и группе костей у подопытных групп и контрольной, а также сравнение ломаных костей с интактными костями другой половины тела. При общей тенденции к увеличению накопления радионуклида по мере возрастания числа переломов не наблюдается достоверных изменений на уровне целостного организма, а также в скелете. Но уже при сравнении накопления радиоиттрия в группе костей обращает на себя внимание достоверность различий (p < 0.05) как между соседними группами (за исключением II и III), так и при сравнении каждой из них с контролем (p < 0.01) (за исключением II группы). В последней графе табл. 4 представлены данные, показывающие увеличение содержания радионуклида за счет новообразованной костной ткани при репарации переломов (сравнение произведено с интактными костями другой стороны тела).

Проведенный анализ позволил нам сделать вывод о резком изменении накопления радиоиттрия в локусе бывшего перелома и менее выраженном — при рассмотрении больших участков скелета. При этом, если в соседней с переломом кости и в выборке, состоящей из 12 костей, еще можно выявить достоверное влияние локального повреждения, то уже на всем скелете (тем более — целом организме) этот эффект принимает расплывчатый характер.

Пользуясь средними данными параметров ЛМФФ, мы рассчитали площадь поверхности бедренной кости и величину поверхности новообразованной костной ткани в местах перелома для каждой группы. Предполагая, что накопление иттрия-91 зависит от кровотока, который в данном случае пропорционален величине площади поверхности, и зная количество радионуклида, накопленного костной тканью бедренной кости, расчетным путем определили увеличение содержания радиоиттрия за счет новообразованной кости (табл. 5). Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что расчет дает сведения, заниженные в среднем в 2,6 раза. Однако вследствие того, что в локусе регенерации костной ткани кровоток всегда повышен [1, 8] и имеет место изменение некоторых других ЛМФФ, увеличение площади поверхности не является единственным фактором, определяющим изменение накопления остеотропных веществ. Этим вполне объясняется занижение расчетных данных по сравнению с экспериментальными.

Полученные в табл. 1 и на рис. 4 данные позволяют оценить минимальные значения изменения площади поверхности новообразованной костной ткани (ΔS), при которых могут наблюдаться статистически достоверные изменения в накоплении радиоиттрия на организменном, тканево-системном (во всем скелете) и локальном (суммарно по травмированным костям) уровнях. На основании критерия Стьюдента различия между

Накопление иттрия-91 и площадь поверхности бедренной кости и новообразованной костной ткани

	Бедренн	ая кость	Ново	образованная кость		
Группа	Площадь, см²	Колич. радио- иттрия, % от введенного См ³		Колич. радиоиттрия, % от введенного		
	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	$\overline{X}\pm m$	
I II III IV V	43,2±2,2 38,9±1,9 41,8±2,1 43,4±2,3 43,2±2,0	1,66±0,07 1,62±0,05 1,74±0,08 1,80±0,08 1,76±0,05	- 18,6±6,2* 15,9±4,0 48,6±4,3 50,5±9,1	0,77±0,26** 0,66±0,17 2,02±0,23 2,06±0,39	1,57±0,35*** 2,52±0,12 3,43±0,27 5,65±0,76	

*Рассчитано по формуле:

$$S = \frac{P \cdot S/V}{\rho} \quad (1),$$

где S — площадь поверхности новообразованной кости, P — масса костной ткани, S/V — удельная поверхность спонгиозы, ρ — удельный вес костной ткани. ** Рассчитано по формуле:

$$A = \frac{S \cdot A_6}{S_6} \quad (2).$$

где A и S — количество радиоттрия и площадь поверхности новообразованной кости, A и S — то же, бедренной кости.

*** Экспериментальные данные из табл. 3.

двумя выборками A_i можно считать достоверными, если

$$t = \Delta A/\Delta m_{\overline{\Delta A}} > t_{01},$$
 (3)

где $m_{\overline{\Delta A}}$ — стандартная ошибка среднего для разности ΔA . Минимальное значение $t_{01} = t_{01}(\infty) = 2,58$; значит, из (3) получим

 $\Delta A_{\min} \geqslant t_{01}(\infty) \cdot m_{\overline{\Delta A}} = 2,58 \ m_{\overline{\Delta A}}.$ (4)

Оценкой вариабельности измерения радиоактивности на каждом уровне могут служить средние из частных стандартных ошибок m_i , вычисленные по соответствующим столбцам табл. 1. В этом случае каждое отдельное измерение (усредненное по группе с конкретным числом переломов) характеризуется величиной m_i , а стандарт разности таких измерений равен

$$m_{\overline{\Delta A}} = \overline{m_i} \gamma 2,$$
 (5)

тогда

$$\Delta A_{\min} \geqslant 3.65 \ \overline{m_i}.$$
 (6)

Вычисленные таким способом значения ΔA_{\min} дают возможность рассчитать соответствующий прирост костной массы ΔP

Таблица 6 Минимальные сдвиги в параметрах ЛМФФ, вызывающих достоверные отличия в кинетике иттрия-91

_		Уровень				
Показатель		организменный	тканево-системный	локальный		
m_i , % дозы		4, 58	58 2,99			
$\Delta A_{ ext{min}}$, % дозы		16,7	10,9	2,04		
ΔР, г	1 2 3 4	6,12 2,96 4,71 2,35	3,80 1,89 3,06 1,49	0,26 0,24 0,53 0,17		
$\Delta S_{ m min}$, cm 2	1 2 3 4	904 437 696 347	562 279 452 220	38 35 78 25		
ΔS _{min} , % пло- щади ске- лета	1 2 3 4	113 55 87 43	70 35 56 28	4,8 4,4 9,8 3,1		

Примечание. 1—4 — кости: 1 — большая и малая берцовые, 2 — плечевая, 3 — локтевая и лучевая, 4 — группа костей. Площадь поверхности скелета принята равной 800 см².

на основании представленных на рис. 4 зависимостей для большой и малой берцовых, плечевой, локтевой и лучевой, а также для всей группы костей, подвергнутых переломам (кроме лопатки, для которой не установлено достоверной корреляции между ΔP и ΔA). И наконец, подставив значения ΔP в формулу (1), мы получим минимальные оценки прироста площади новообразованной кости (ΔS), которые могут вызвать достоверное изменение в накоплении иттрия-91 на организменном, тканевосистемном и локальном уровнях (табл. 6).

Выводы

1. Установлены резкое изменение накопления радиоиттрия в локусе бывшего перелома и значительно менее выраженный эффект при рассмотрении всего скелета и целостного организма. Отмечены тенденция к перераспределению радионуклида в скелете и уменьшение количества костного вещества (остео-

пороз) в участках скелета, находящихся в непосредственной близости к костям, подвергнутым перелому.

2. Обнаружена высокая корреляция между накоплением иттрия-91 в локусе бывшего перелома, приростом массы кости

и увеличением площади ее поверхности.

3. Отмечена повышенная интенсивность некоторых важнейших ЛМФФ, тесно связанных с поверхностью новообразованной костной ткани. Так, большая часть этой поверхности подвержена процессам перестройки. Интенсивность аппозиционного роста здесь колеблется в пределах 1,5-5,6 мкм/сут, в то время как в неповрежденных участках скелета — 0,9—2,8 мкм/сут.

4. Расчетным путем найдено, что достоверные сдвиги в кинетике обмена иттрия-91 на уровне организма, тканево-системном и локальном можно определить при увеличении площади поверхности новообразованной кости соответственно на 43-113, 28-70 и 3,1-9,8 % от площади поверхности всего скелета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киппер С. Н., Лубегина З. П., Ястребов А. Д. Исследования динамики напряжения кислорода в регенерате кости при переломах длинных трубчатых костей.— Ортопедия, травматология и протезирование, 1976, № 5, c. 44—48.

2. Любащевский Н. М., Шарыгин Л. М., Степина В. И. Нативные поверхности и сорбционная способность зрелой и формирующейся костной ткани. В кн.: Метаболизм радиоизотопов в животном организме. Свердловск, 1974, с. 12-18.

3. Любашевский Н. М. Метаболизм радиоизотопов в скелете по-

звоночных. М.: Наука, 1980. 255 с.

4. Любашевский Н. М., Попов Б. В., Мокроносов А. А. и др. Биологические основы межвидовых экстраполяций параметров скелетного метаболизма.— В кн.: Пограничные проблемы экологии. Свердловск, 1986, c. 84-102.

5. Никитин Г. Д., Грязнухин Э. Г. Множественные переломы и сочетанные повреждения. Л.: Медицина, 1983. 296 с.

6. Русаков А. В. Руководство по патологической анатомии. Патологическая анатомия болезней костной системы (Введение в физиологию и гистологию костной ткани). М.: Медгиз, 1959. 536 с.

7. Торбенко В. П., Касавина Б. С. Функциональная биохимия

костной ткани. М.: Медицина, 1977. 272 с.

8. Фишкин В. И., Львов С. Е., Удальцов В. Е. Регионарная гемодинамика при передомах костей. М.: Медицина, 1981. 184 с.

9. Френкель Л. А., Ткаченко Г. И., Ланько В. И., Яковен-ко М. Г. Течение репаративных процессов в костной ткани при комбиниро-ванном радиационном поражении.— Экспериментальная и клиническая радиология. Киев, 1980, вып. 15, с. 106—113.

10. Хмельницкий О. К., Некачалов В. В., Зиновьев А. С. Общая патоморфология костно-суставного аппарата. Новосибирск: Наука.

1983. 193 c.

11. Швырков М. С., Сумароков Д. Д., Шамсудинов А. Х. Петрович Ю. А. Фосфорно-кальциевый обмен в костях скелета при неосложненном переломе нижней челюсти.— Стоматология, 1982, № 1, с. 10—13. 12. В a bicky A., Kolar J. Whole-body skeletal responce in local bone disease. Praha: Academia, 1981. 122 p.

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ • 1986

А. В. БАЖЕНОВ, А. В. ГОРОПАШНАЯ, Ж. А. ПОТАПОВА

ВСАСЫВАНИЕ В КИШЕЧНИКЕ БУРОЗУБОК НЕКОТОРЫХ РАДИОНУКЛИДОВ, ПОСТУПАЮЩИХ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ПРИМАНОК

Один из основных недостатков применения радионуклидов в открытом виде — загрязнение (хотя и незначительное) окружающей среды, в особенности при использовании долгоживущих радиоактивных нужлидов. Поэтому цель настоящего исследования — поиск наиболее эффективных методов мечения животных при поступлении меток алиментарным путем, т. е. использование такого типа приманок, при которых радионуклиды всасываются в кишечнике наиболее эффективно, а биологический период их выведения мал.

Материал и методика

Эксперименты проведены на обыкновенной и равнозубой бурозубках, основным кормом которых служит пища животного происхождения. В качестве радионуклидов использовали хлористые соединения 22 Na, 45 Ca, 65 Zn, 90 Sr и 32 P (фосфат натрия двузамещенный). Испытаны четыре типа приманок: мясные мухи, кусочки мяса полевок, дождевые черви и мясные пищевые шарики. Первые три вида приманок, выдерживали в радиоактивном растворе (рH=5-6) в течение 7-10 часов с концентрацией 37—185 кБк/мл по 90Sr и с концентрацией 925— 1850 кБк/мл для других нуклидов. После активации приманку просушивали и предлагали каждому животному в отдельных клетках. Мясные пищевые шарики с метками готовили следующим образом. Кислые радионуклиды предварительно вводили в вену белой лабораторной крысе весом 200—250 г. затем через 2—3 мин животное забивали. Из всех внутренних органов и мягких тканей готовили фарш, его слегка просушивали или перемешивали с мукой. Для мечения землероек брали навеску весом 2 г, которая содержала активность порядка 110—130 кБк по кальцию и 37-56 кБк по стронцию. Эту приманку также давали по отдельности животным в клетках.

Об эффективности всасывания метки в желудочно-кишечном

Суммарное выведение радионуклидов из организма бурозубок и остаток радиоактивности, % от введенного

Радионуклид	Тип *	Выведено с мочой и калом за	Остаток активности во всем животном через		Колич. животных	
	приманки	двое суток				
²² Na	1	55	—	10	2	
	2	35	—	34	2	
	3	5	65	44	2	
32 p	1	35		30	2	
	2	10	44	43	2	
	3	8	85	83	2	
⁴⁵ Ca	1	28	60	43	2	
	2	7	-	58	2	
	3	10	89	88	3	
⁶⁵ Zn	1	30		15	2	
	2⁄	8		43	1	
	3	5		62	1	
⁹⁰ Sr	1	52	48	33	2	
	2	17	68	54	2	
	3	8	82	78	4	

^{* 1 —} куски мяса и мухи; 2 — живые дождевые черви; 3 — мясные шарики.

тракте судили по выведению радиометок с экскрементами суммарно за первые двое суток и по оставшейся радиоактивности в тушках забитых животных на 15-е и 30-е сутки после введения метки. В некоторых вариантах опыта было использовано всего по одному-два зверька, так как содержание животных в клетках представляло определенные трудности.

Радиометрию образцов выделений животных и тушек после озоления проводили на стационарных радиометрических установках. В качестве эталона принимали количество радиоактивности, содержащейся в таком же виде приманки, что и в скормленной животному.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов по выведению метки показывают (см. таблицу), что всасывание нуклидов из желудочно-кишечного тракта хуже всего с «мертвой» приманкой, т. е. с мухами и кусочками мяса (данные объединены). Так, выведение (в основном с калом) в первые двое суток составляет для «мертвой» приманки 55, 35, 28, 30, 52 % против 35, 10, 7, 8, 17 %

при приеме дождевых червей и 5, 8, 10, 5, 8 % с пищевыми шариками соответственно для натрия, фосфора, кальция, цинка и стронция. На 30-й день особенно значительно выведение для 22 Nа и 65 Zn, которые для первых двух видов приманки сохраняются в организме до 10-15 %, а для дождевых червей — до 34-43 % (в силу того, что исходный уровень поступления метки в кровь с данной приманкой был выше). Остаток же активности, поступившей с пищевыми шариками, во всех случаях был выше и составил 44, 83, 88, 62 и 78 % соответственно для тех же меток.

Иначе говоря, наибольший эффект всасывания радиометок в кишечнике бурозубок наблюдается при поедании приманки с дождевыми червями и с мясными пищевыми шариками. Этот эффект можно объяснить следующим образом. Известно, что процессы поступления веществ из полости желудочно-кишечного тракта во внутреннюю среду организма зависят от формы поступающего вещества. Ряд химических соединений (в том числе хлориды) не всегда полностью всасываются в желудочнокишечном тракте [6, 7]. Предварительное поступление меток в организм дождевых червей (живых) и при внутривенном введении в крысу обеспечивает биохимическое связывание их с низко- и высокомолекулярными соединениями крови, тканей и органов животного: цитратами, глутаматами, аминокислотами, пептидами, белками и пр. [1, 2, 3, 5, 8]. Повышенное поступление метки наблюдается во всех вариантах опыта, и если судить по остатку радиоактивности на 30-е сутки, то при поедании бурозубками «мертвой» приманки, живых дождевых червей, мясных пищевых шариков относительные коэффициенты накопления выглядят следующим образом: 1/3,4/4,4; 1/1,5/2,7; 1/1,4/2,0; 1/1,5/4,0 и 1/1,7/2,4 соответственно для натрия, фосфора, кальция, цинка и стронция.

Наши данные в какой-то степени согласуются с литературными [9, 10]. Так, при скармливании крысам мясного фарша с добавлением радиоактивного фосфора дозой 2,6 ГБк на 25 г веса прикормки (3,7 ГБк на 1 кг веса грызуна) метки в костях животных могут быть обнаружены в течение месяца (т. е., несмотря на большую вводимую дозу нуклида, эффект мечения все же был коротким). Приблизительно аналогичные данные получены [4] при выдерживании тушек животных в радиоактивном растворе 90 Sr или при введении его в мертвые тушки мышей активностью 180—370 кБк или 35 S — 370—560 кБк.

Таким образом, эффективное поступление радионуклидов в организм плотоядных животных наблюдается при приеме животными мясных шариков, приготовленных путем предварительного введения радиометок в живой организм. Наибольшее всасывание их в желудочно-кишечном тракте позволяет использовать меньшие дозы для мечения животных и тем самым снизить радиационные нагрузки на животное и биоценоз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биохимическая фармакология. М.: Высшая школа, 1982. 344 с.

2. Любашевский Н. М., Пучкова С. М. Об оценке физико-химического состояния радиоизотопов в тканях организма.— Мед. радиология, 1968, № 8, с. 69—70.

3. Любашевский Н. М. Метаболизм радиоизотопов в скедете по-

- звоночных. М.: Наука, 1980. 256 с. 4. Монахов Г. И., Тимофеев В. В. Итоги первых опытов по мечению соболей радиоактивными изотопами. В кн.: Сборник НТИ ВНИИ животного сырья и пушнины. М., 1965, № 13, с. 15—21.
- 5. Пучкова С. М. Физико-химическое состояние натрия, цезия, кальция, стронция, иттрия в сыворотке крови. В кн.: Радиоактивные изотопы
- и организм. М.: Медицина, 1969, с. 223—228. 6. Файтельберг Р. О. Всасывание углеводов, белков и жиров в ки-шечнике. М.: Медицина, 1976. 264 с.

7. Физиология всасывания. Л.: Наука, 1977. 668 с.

- 8. Швыдко Н. С., Попов Д. К., Ильин И. А. Роль крови в транспорте некоторых осколочных радиоизотопов.— Мед. радиология, 1973. № 3.
- 9. Шура-Бура Б. А., Тарарин Р. А., Мельников Б. К. К методике радиоактивной маркировки серых крыс с целью изучения вопросов миграции. — Зоол. журн., 1960, т. 39, вып. 11, с. 1700—1706.
- 10. Шура-Бура Б. А., Тарарин Р. А., Ключник Н. С. Опыт изучения миграции серых крыс методом мечения атомов.— Журн. микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии, 1961, № 12, с. 76—81.

СОДЕРЖАНИЕ

	. С. Безель, <mark>Б. В. Попов,</mark> О. Ф. Садыков, Е. И. Гро-	В.
	шева, Р. М. Хантемиров. Мелкие млекопитаю-	
	щие в системе регионального экологического монито-	
3	ринга	
	f. М. Сюзюмова, А. Р. Карагезян. Особенности эко-	Л.
	логии кустарниковой полевки и лесной мыши в Анка-	
14	ване	_
	. В. Тестов, А. И. Таскаев. Накопление естественных	D.
23	радионуклидов в организме животных на участках	
23	с повышенной радиоактивностью	В.
	Влияние техногенного загрязнения среды на динамику	υ.
	численности мелких млекопитающих в мозаичных	
37	местообитаниях	
	. А. Богачева. Зависимость численности насекомых-	И.
	фитофагов от уровня загрязненности лесных биоцено-	
43	зов фтором	
49	. И. Сухачева. К обмену хрома в животном организме	Ē.
	. К. Конышева. Математическое моделирование токсико-	JI.
50	кинетики хрома при различных условиях поступления	
59	его в организм экспериментальных животных	u
	. М. Любашевский, С. В. Щербаков, В. И. То-	п.
	карь, Е. Е. Розенберг, А. А. Мокроносов, Т. К. Семенникова, Е. П. Жовтяк. Механизмы	
	нарушения минерального обмена при хронической фто-	
68	ристой интоксикации в эксперименте	
		В.
	ров морфофизиологических факторов обмена техно-	
89	генных элементов в скелете позвоночных	
	И. Стариченко, Б. В. Попов, М. Н. Любашев-	B.
	ский, А. А. Мокроносов. Морфофизиологические	
	факторы при очаговом новообразовании кости и кине-	
	тика обмена остеотропных элементов в организме	
109	позвоночных	
	В. Баженов, А. В. Горопашная, Ж. А. Пота-	A.
	пова. Всасывание в кишечнике бурозубок некоторых	
100	радионуклидов, поступающих с различными типами	
122	приманок	

УДК 502.56: 599.323.4

Мелкие млекопитающие в системе регионального экологического мониторинга. Безель В. С., Попов Б. В., Садыков О. Ф., Грошева Е. И., Хантемиров Р. М.—В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Обсуждается возможность использования мелких млекопитающих в качестве объекта регионального экологического мониторинга загрязнений токсическими элементами природных экосистем. Анализ опубликованных данных по содержанию некоторых тяжелых металлов в организме зверьков и собственные результаты позволили установить практически линейную зависимость уровней поллютантов в организмах и тканях животных от содержания их в растительности. Рассматривается использование методов изотопного разбавления для определения ртути, кадмия, свинца, цинка и меди в растительности и костных тканях мелких млекопитающих. Чувствительность метода позволяет рекомендовать его для использования в системе регионального экологического мониторинга техногенных загрязнений природных экосистем.

Таблиц 1. Ил. 2. Библиогр. 33 назв.

УДК 502.55:628.5+591.5

Особенности экологии кустарниковой полевки и лесной мыши в Анкаване. Сюзюмова Л. М., Карагезян А. Р.—В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Обследованы популяции, обитающие на территории биогеохимической провинции, обогащенной молибденом, и сопредельной с ней. Показана гетерогенность структуры по содержанию молибдена в шкурках грызунов. Отмечены различия в содержании молибдена у разных возрастных групп и популяций в зависимости от геохимических условий среды. Определены некоторые особенности динамики экологической структуры популяций обоих видов и интенсивности элиминации животных разных популяций. Обсуждается возможное позитивное воздействие молибдена на физиологические особенности животных и численность популяции в биогеохимических провинциях, обогащенных молибденом.

Таблиц 4. Библиогр. 18 назв.

УДК 502.55:628.5+591.5

Накопление естественных радионуклидов в организме животных на участках с повышенной радиоактивностью. Тестов Б. В., Таскаев А. И.— В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Описываются характер и величина накопления естественных радионуклидов полевками, обитающими на территории, загрязненной радионуклидами уранового и ториевого радио-активных семейств. Отмечается значительное влияние стабильных изотопов макроаналогов (Са, Ва, Рb) на содержание Ra, U, Th, накапливающихся главным образом в скелете. Наибольшая концентрация 210 Ро обнаружена в почках и

селезенке. Максимальные значения дозы облучения приходятся на легкие за счет распада короткоживущих продуктов распада 222 Rn и 220 Rn, поступавших в организм полевок в процессе дыхания при нахождении в норах. Из инкорпорированных радионуклидов значительную роль в облучении полевок играют 210 Po, 226 Ra, изотопы тория.

Таблиц 6. Ил. 2. Библиогр. 19 назв.

УДК 502.56: 574.3: 599.323.4

Влияние техногенного загрязнения среды на динамику численности мелких млекопитающих в мозаичных местообитаниях. Безель В. С., Бененсон И. Е., Садыков О. Ф.— В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

На математической модели динамики численности мелких млекопитающих рассмотрено влияние техногенного загрязнения. Учет мозаичности местообитания популяции в сочетании с пространственной ограниченностью полей загрязнения показал, что последствия такого воздействия могут выходить за рамки зоны прямого техногенного загрязнения, оказывая значительное влияние на численность зверьков смежных территорий.

Таблиц 1. Ил. 2. Библиогр. 8 назв.

УДК 591.5+595.7+574.34

Зависимость численности насекомых-фитофагов от уровня загрязненности лесных биоценозов фтором. Богачева И. А.— В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Изложена принципиальная схема изменения численности лесных фитофагов в зависимости от уровня загрязненности лесных биоценозов фтором. Приведены данные по изменению уровней численности березовых филлофагов в лесах Среднего Урала, подвергнутых действию фтористых выбросов (материалы автора), и других групп лесных фитофагов (литературные данные). Обсуждены некоторые трудности, связанные с получением необходимого материала в полевых условиях. Предложено использовать увеличение численности грызущих филлофагов как индикатор зоны, в которой в результате загрязнения среды фтором начинается ослабление деревьев.

Ил. 2. Библиогр. 16 назв.

УДК 502.55: 628.5+591.5

К обмену хрома в животном организме. Сухачева Е.И.— В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

На самках и самцах крыс Вистар изучено влияние весовой дозы стабильного носителя на уровень резорбции аниона хрома из желудочно-кишечного тракта. Установлено, что величина резорбции возрастает с повышением введенной перорально дозы, но не изменяется при введении хромата или бихромата в одинаковых весовых количествах хрома. Приведены данные по содержанию радиохрома в различных

тканях и органах в зависимости от введенной дозы металла. Найдена взаимосвязь концентрации хрома в тканях с объемом межтканевой воды и скоростью кровотока.

Таблиц 6. Библиогр. 15 назв.

УДК 577.38:57.087

Математическое моделирование токсикокинетики хрома при различных условиях поступления его в организм экспериментальных животных. Конышева Л. К.— В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Предложено несколько вариантов камерных моделей кинетики шестивалентного хрома в организме лабораторных крыс. Каждая модель отражает некоторые существенные особенности повышения концентрации яда в организме. Камерная модель определенной структуры адекватна изучаемому процессу в строго ограниченных рамках. Для нахождения параметров модели использованы литературные данные по распределению, поступлению и выведению шестивалентного хрома из организма крыс. С помощью однокамерной модели установлена зависимость интенсивности экскреции хрома от полученной дозы яда. Четырехкамерная модель позволила объяснить и количественно обосновать механизмы воздействия марганца на кинетику хрома при однократном введении смеси ядов, а также выявить существенные изменения в кинетике хрома, вызванные продолжительным поступлением его в организм. Показано, что для выявления воздействия марганца на кинетику хрома при хроническом отравлении организма смесью ядов необходима модель более сложной структуры.

Таблиц 1. Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 502.55:003.663.4

Механизмы нарушения минерального обмена при хронической фтористой интоксикации в эксперименте. Любашевский Н. М., Щербаков С. В., Токарь В. И., Розенберг Е. Е., Мокроносов А. А., Семенникова Т. К., Жовтяк Е. П.—В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Исследованы особенности минерального обмена (кальций, магний, фосфор, цинк, фтор в сыворотке крови и моче, ряд гормонов в сыворотке крови, щелочная фосфатаза и др.) у интактных животных на фоне интоксикации фтором и при специфических функциональных нагрузках. Найденные существенные изменения минерального обмена отнесены как к остеотропным, так и неостеотропным эндогенным и абиотенным элементам. Показано, что первичным звеном в развитии нарушения минерального метаболизма является поражение остеогенного клеточного аппарата. Заметные сдвиги в функциональном состоянии эндокринной системы и обмена неостеотропных элементов носят вторичный характер.

Таблиц 2. Ил. 7. Библиогр. 29 назв.

УДК 577.39:591.1:591.4

Экспериментальная оценка параметров морфофизиологических факторов обмена техногенных элементов в скелете позвоноч-

ных. Стариченко В. И.— В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Представлены методики определения и количественные характеристики важнейших морфофизиологических факторов (МФФ), которые лимитируют обмен остеотропных веществ в скелете. К ним относятся площади поверхности скелета, отношение площади поверхности к объему костной ткани, интенсивность роста и резорбции. МФФ изучены на взрослых особях пяти видов позвоночных животных (мышь, крыса, лягушка, курица, собака). Показано, что индивидуальные особенности параметров внутри разнородной группы особей одного вида могут превосходить межвидовые различия. Оценена интенсивность ростовых процессов в скелете крыс линии Вистар на протяжении жизни. Обсуждаются механизмы ростадлинных трубчатых костей, а также возможность использования отдельных участков скелета для оценки физиологического состояния костной ткани.

Таблиц 6. Ил. 4. Библиогр. 33 назв.

УДК 577.39:612:591.1

Морфофизиологические факторы при очаговом новообразовании кости и кинетика обмена остеотропных элементов в организме позвоночных. Стариченко В. И., Попов Б. В., Любашевский Н. М., Мокроносов А. А.—В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Исследовано влияние нескольких лимитирующих морфофизиологических факторов обмена остеотропных элементов в скелете на поведение в организме радиоиттрия. Для количественной оценки факторов использовано наличие корреляции между группой тесно связанных ЛМФФ (площадь нативных поверхностей, их кровоснабжение, интенсивность аппозиционного роста и резорбции, продуцирование метаболитов, играющих роль депонирующего агента) и массой новообразованной костной ткани на определенной стадии репарации (через два месяца после перелома). Найдены минимальные значения площади новообразованной поверхности, которые вызывают статистически значимые сдвиги в депонировании остеотропного радионуклида.

Таблиц 6. Ил. 4. Библиогр. 12 назв.

УДК 591.52+573.4

Всасывание в кишечнике бурозубок некоторых радионуклидов, поступающих с различными типами приманок. Баженов А. В., Горопашная А. В., Потапова Ж. А.—В кн.: Техногенные элементы и животный организм (полевые наблюдения и эксперимент). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.

Представлены результаты по всасыванию в кишечнике бурозубок ²²Na, ³²P, ⁶⁵Zn и ⁹⁰Sr после перорального поступления с различными типами приманок (мухами, кусочками мяса, живыми дождевыми червями и мясными пищевыми шариками). Показано, что наибольшее всасывание радиометок наблюдается при поедании животными мясных шариков, что позволяет уменьшить дозу радиоактивности при мечении зверьков и увеличить срок слежения за ними.

Таблиц 1. Библиогр. 10 назв.

выходит из печати

сборник научных статей сотрудников Института экологии растений и животных УНЦ АН СССР

Регуляция численности и плотности популяций животных

субарктики. 10 л. Цена 1 р. 50 к.

В сборнике приводятся результаты многолетних исследований сотрудников лаборатории энергетики биогеоценотических процессов по динамике численности отдельных групп и видов животных в северной тайге, лесотундре и тундре. На доминантных видах насекомых разных экологических групп (кровососущие комары, почвообитающие и листогрызущие насекомые) показана ведущая роль абиотических факторов в динамике их численности, в первую очередь температуры вегетационного сезона. Выделены факторы, специфичные для каждой из указанных групп.

Ряд статей о мелких воробьиных птицах посвящен популяционным процессам и вскрывает механизмы их действия на динамику численности массовых видов. Показано отсутствие связи изменений численности северных видов консументов с

запасами корма, давлением хищников и паразитов.

Сборник предназначен для зоологов и экологов, преподавателей и студентов биологических факультетов университетов и пединститутов.

Заявки присылать по адресу:

620169, Свердловск, ГСП-169, Первомайская, 91. РИСО УНИ АН СССР

ТЕХНОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ЖИВОТНЫЙ ОРГАНИЗМ (полевые наблюдения и эксперимент)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Рекомендовано к изданию Ученым советом Института экологии растений и животных и РИСО УНЦ АН СССР

Редактор В. А. Мещеряков Художник М. Н. Гарипов Технический редактор Н. Р. Рабинович Корректоры Г. Н. Старкова, А. И. Пономарева

Сдано в набор 26.12.85. Подписано в печать 14.11.86. НС 12218. Формат $60 \times 90^1/_{16}$. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 9,5. Тираж 800. Заказ 58. Цена 1 р. 50 к.

РИСО УНЦ АН СССР. Свердловск, ГСП-169, ул. Первомайская, 91.
Типография изд-ва «Уральский рабочий». Свердловск, пр. Ленина, 49.