

УДК 599.323.4:591.11+504.5:621.039.7

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ КРОВИ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ, ОБИТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИЯХ С НИЗКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

© 2014 г. Э. А. Тарахтий, О. А. Жигальский

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

E-mail: tar@ipae.uran.ru; zig@ ipae.uran.ru

Представлены данные о количественных и морфологических характеристиках клеток крови и кроветворных органов мелких млекопитающих с территорий условно чистых и низким уровнем радиоактивного загрязнения. Установлено изменение состава клеток крови, структуры эритроцитов, митотической активности и скорости созревания клеток в кроветворной ткани у животных с загрязненных территорий. Степень изменения системы крови зависит от уровня загрязнения и имеет видовую специфику. Выявленная видоспецифическая реакция животных на радиационное загрязнение свидетельствует о разных путях приспособления.

Ключевые слова: радиационное загрязнение низкой плотности, мелкие млекопитающие, *Mus musculus*, *Apodemus sylvaticus*, *Clethrionomys rutilus*, состав, структура и функция клеток крови, костный мозг, селезенка.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с радиационным и химическим загрязнением больших территорий возникает вопрос о необходимости изучения состояния и пригодности экосистем для человека. Оценка загрязнения экосистем при действии поллютантов в малых дозах является неоднозначной и порой противоречивой. Оценить влияние на экосистемы радиационного и химического загрязнения в малых дозах чрезвычайно сложно. Среди множества индикаторов загрязнений наиболее информативным являются мелкие млекопитающие. Обнаружить и выявить влияние экологических факторов позволяет комплексная оценка параметров кроветворной системы, остро реагирующей на внутренние и внешние факторы (Тарахтий, Кардолина, 1995; Цыб и др., 1996; Козинец и др., 2007; Шиффман, 2009; Орехова, 2011; Москвитина, Кохонов, 2012).

Внимание исследователей до сих пор привлекают радиационно загрязненные территории в результате ядерных испытаний в 1954 г. (Тоцкий радиоактивный след, ТРАС, Оренбургская обл.) и радиационной аварии в 1957 г. на ПО «Маяк» (Восточно-Уральский радиоактивный след, ВУРС, Свердловская обл.). Как правило, исследования проводятся на территориях, где загрязнение максимально (в головной части ВУРСа),

и мало работ по изучению периферии следа. За прошедшие десятилетия с момента инцидентов радиоэкологическая обстановка этих территорий существенно улучшилась. Однако радиационное загрязнение экосистем в основном ^{90}Sr и ^{137}Cs до сих пор превышает уровень глобального загрязнения (Отдаленные., 2000; Трапезников и др., 2007; Позолотина и др., 2008; Тетерин, 2011). Поскольку полное исчезновение ^{90}Sr в результате его полураспада займет еще многие годы (Тетерин, 2011), а также наличие потенциальных источников радиационного загрязнения в настоящее время и в будущем, оценка воздействий на экосистемы, в том числе на животных и человека, остается важной проблемой (Рисник и др., 2012; Москвитина, Кохонов, 2012).

Цель настоящей работы – оценить по комплексу параметров структуры клеток, клеточного состава крови и кроветворных органов влияние низкой плотности радиационного загрязнения на мелких млекопитающих с территорий ВУРСа и ТРАСа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мелких млекопитающих отлавливали с территорий ТРАСа (Тоцкий радиоактивный след, Оренбургская обл.) и ВУРСа (Восточно-Уральский

радиоактивный след, Свердловская обл., Каменский р-он) с фоновым уровнем радиоактивного загрязнения, принятых в качестве контрольных, и загрязненных или опытных. С опытной территории ТРАСа, расположенной по осевой части следа (дер. Старобогдановка) и контрольной, находящейся за его пределами на расстоянии 60 км (дер. Кристалка), в августе 1994 г. отловлены, соответственно, 21 и 14 особей домашних мышей (*Mus musculus*). Эти животные, обитают вблизи человека и воспринимают давление негативных факторов среды, которым подвержен и человек. С опытной территории ВУРСа (юго-восточный берег озера Тыгиш), расположенной на центральной оси в 105–110 км от места аварии, и контрольной – вне зоны следа (дер. Большая Грязнуха) в августе 1993 г. отловлены лесные мыши (*Apodemus sylvaticus* Pall. – 19 и 8 особей) и красные полевки (*Clethrionomys rutilus* – по 9 особей). Эти виды животных различаются по рациону питания (Громов, Ербаева, 1995) и радиочувствительности (Ильенко, Крапивко, 1989). В анализ включены только группы сеголетов, однородных по репродуктивному статусу.

По данным радиоэкологического мониторинга установлено, что плотность загрязнения почвенно-растительного покрова в центральной оси ТРАСа по ^{90}Sr составляла 0.8–1.5 кБк/м², что не отличалось от фоновой, по ^{137}Cs – 3.4–9.5 кБк/м², что в 1.5–3 раза превышало уровень контрольной территории и в 1.7–1.9 раза допустимое значение широтного выпадения (Отдаленные..., 2000; Трапезников и др., 2007). Кроме того, выявлено заметное превышение уровня глобальных выпадений Pu 42–5284 Бк/м² относительно значений контрольных (43.8–2143 Бк/м²) и широтных (40–300 Бк/м²) выпадений. Средняя плотность загрязнения опытной территории ВУРСа составляла 0.5–1 Ки/км². По ^{137}Cs и ^{90}Sr она превышала контроль в почвенно-растительном покрове – 13.6 Бк/м² и 34.3 Бк/м² против 6.5 и 1.7 Бк/м², соответственно. Гамма-фон этих территорий соответствовал пределам колебаний контрольных территорий. Дозообразующими радионуклидами за счет инкорпорации являются долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs (Трапезников и др., 2007; Позолотина и др., 2008; Тетерин, 2011).

На гемоанализаторе Celloscope 401 (Lars Yungberg & Co, Швеция) в крови животных определяли концентрацию лейкоцитов, эритроцитов, состав эритроцитов по диаметру (в диапазоне 3.5–8.9 мкм, всего 10 точек). Для оценки физико-химического состояния эритроцитов вычисляли средний диаметр (D), объем (MCV), содержание (MCH) и концентрацию гемоглобина (MCHC) в

эритроците, толщину (T), площадь поверхности эритроцитов (S), концентрацию гемоглобина на единицу площади поверхности (HB/S) клетки, способность переносить кислород единицей объема крови (HBF). Определяли концентрацию гемоглобина (HB) с помощью Linzon 3 Photometer (Швеция), гематокрит (HT) с помощью MicroHematocrite Centrifuge и Hawksley Reader (Великобритания), осмотическую резистентность эритроцитов (в 0.85–0.1%-ных растворах NaCl) по 16.50 и 84%-ному гемолизу (Finney, 1971).

На мазках крови исследовали состав и морфологию лейкоцитов, концентрацию ретикулоцитов. У забитых животных (дислокацией шейных позвонков) определяли массу тела и селезенки, подсчитывали число ядерных клеток в суспензии селезенки и костного мозга бедренной кости (в камере Горяева), на мазках костного мозга оценивали состав клеток, пролиферативную активность и индексы созревания эритроцитов и гранулоцитов. Концентрацию эритроцитов и клеток костного мозга нормировали на массу тела.

Статистический анализ (дискриминантный, дисперсионный, ковариационный) проведен с помощью “Statistica for Windows”, при оценке различий показателей использовали Tukey-тест для разного числа животных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Неразличимые значения параметров системы крови самцов и самок ($R\text{-Pa}_{0,3} = 0.423, p < 0.8$) представлены единой средней. Анализируя изменчивость отдельных показателей установлено, что традиционно исследуемые показатели – концентрация гемоглобина и гематокрит – у всех животных удерживается на уровне контрольных величин ($p > 0.2$). Сопряженное с ними число эритроцитов в условиях загрязненной среды возросло ($p < 0.01$) только у красной полевки (табл. 1). Физиологический смысл изменения концентрации эритроцитов заключается в качественных различиях клеток, их функциональной неравнозначности и устойчивости (Клиорин, Тиунов, 1974).

У животных с загрязненных территорий изменяется состав, структура и свойства эритроцитов независимо от концентрации. У домашних мышей опытной группы (ТРАС) основную долю (69%) составляют эритроциты диаметром больше среднего (6.8–8.2 мкм), тогда как у контрольных особей основная доля клеток (49%) меньшего диаметра (4.7–5.4 мкм), каких в опытной группе насчитывается лишь 4.6%, кривая состава эритроцитов

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа и средние значения контрольных (К) и опытных (О) групп животных

| Показатели | Данные дисперсионного анализа ($n = 57$) | | | <i>Apodemus Sylvaticus</i> | | <i>Clethrionomys rutilus</i> | | <i>Mus Musculus</i> | | $p < 0.05$ |
|---|--|------------|----------------|----------------------------|------------|------------------------------|-----------|---------------------|------------|--------------------|
| | Вид | Место | Взаимодействие | К (1) | О (2) | К (3) | О (4) | К (5) | О (6) | |
| | $F_{2,51}$ | $F_{1,51}$ | $F_{2,51}$ | ($n=6$) | ($n=13$) | ($n=7$) | ($n=6$) | ($n=10$) | ($n=15$) | |
| Масса тела, г | 4.955* | 0.348 | 0.834 | 18.0 | 19.0 | 17.4 | 14.1 | 17.6 | 17.0 | 2–4 |
| Масса селезенки, мг | 0.058 | 0.046 | 1.058 | 61.3 | 80.6 | 92.5 | 54.0 | 72.5 | 81.4 | |
| Индекс селезенки, усл.ед. | 0.600 | 0.055 | 1.032 | 3.1 | 4.0 | 5.7 | 3.6 | 4.2 | 4.8 | |
| Число клеток, млн /селезенка | 2.744* | 0.235 | 3.751* | 49.0 | 58.16 | 106.9 | 62.39 | 65.1 | 123.1 | 1–3; 2, 5–6 |
| Концентрация клеток, млн / мг селезенки | 4.431* | 3.594 | 2.979* | 0.835 | 0.937 | 1.278 | 1.245 | 0.925 | 1.473 | 6–2, 5, 1** |
| Костный мозг, млн/бедро | 7.401* | 0.002 | 1.498 | 15.7 | 18.4 | 11.5 | 7.6 | 11.5 | 12.8 | 2–4, 5** |
| Костный мозг, млн /бедро/г массы тела | 3.996* | 0.000 | 1.194 | 0.895 | 1.000 | 0.732 | 0.516 | 0.656 | 0.769 | |
| Лейкоциты, тыс/мкл | 1.199 | 0.323 | 0.014 | 2.9 | 3.4 | 3.7 | 4.0 | 4.2 | 4.5 | |
| Эритроциты, млн /мкл | 2.299* | 8.046* | 5.174* | 9.1 | 8.5 | 8.4 | 11.9 | 8.7 | 9.9 | 4–1*, 2, 3, 5; 5–6 |
| Эритроциты, млн /мкл/г массы тела | 7.575* | 6.598* | 5.460* | 0.522 | 0.459 | 0.552 | 0.848 | 0.518 | 0.602 | 4–1, 2, 3, 5, 6 |

Примечание. $F_{2,51}$, $F_{1,51}$ – критерии, в скобках – номер группы, n – число животных.

* – $p < 0.05$; ** – $p < 0.1$. Здесь и для табл. 2.

(рис. 1) сдвинута в сторону клеток большего диаметра ($R\text{-Pa}_{0,14,11} = 57.185$, $p < 0.001$). Эритроциты большего диаметра и меньшей толщины ($p < 0.05$) содержат меньше гемоглобина и на единицу поверхности клетки (табл. 2). При несущественно возросшем числе эритроцитов и большей площади поверхности отдельной клетки (табл. 1, 2) возрастает способность крови переносить кислород единицей ее объема (213% от контроля, $p < 0.05$). В оценке оксигенации тканей последний показатель более информативен, чем гемоглобин крови практически одинаковый у многих видов животных (Kostelecka-Mugcha, 2002). Отклонение диаметра и толщины эритроцитов от контрольных значений ряд авторов связывает с изменением структуры мембраны эритроцита (Шашкин, Терсков, 1986; Паршина и др., 2007; Орехова, 2011), появление макроцитов – с “проскакиванием” последнего клеточного деления, что важно в понимании природы отдаленных эффектов при длительном действии ионизирующей радиации в малых дозах (Муксинова, 1990). Изменение структуры эритроцитов отмечено у населения Калужской области в результате катастрофы на ЧАЭС (Цыб и др., 1996).

У красной полевки (ВУРС) в составе эритроцитов различимы лишь доли клеток диаметром 5.4 мкм, $p < 0.05$ (рис. 1). Эритроциты меньшего объема ($p < 0.05$), содержат меньше гемоглобина у особей с загрязненной территории. Дыхательную функцию крови поддерживает возросшее число эритроцитов с тенденцией к возрастанию суммарной площади их поверхности (табл.1, 2).

В составе эритроцитов лесных мышей (ВУРС) опытной выборки больше клеток диаметром 8.9–6.8 мкм, меньше диаметром 6.1–4.7 мкм, чем у контрольных особей (рис. 1), возросшее значение основания кривой (4.9 мкм против 4.2 мкм в контроле) характеризует гетерогенность популяции эритроцитов и большую их устойчивость. Свидетельством тому является амплитуда осмотической резистентности, у мышей она составляет 0.57–0.41% NaCl, у красной полевки 0.51–0.46%, что соответствует более низким значениям ее параметров эритроцитов, тогда как у контрольных особей средний объем и содержание гемоглобина в клетке больше, чем у лесных мышей (табл.2).

Для оценки состояния кроветворения лимфоцитарно-нейтрофильный профиль – более весомый показатель, характеризующий реактивность

Таблица 2. Параметры эритроцитов лесной мыши, красной полевки и домовой мыши с контрольных (К) и опытных (О) участков

| Параметры эритроцитов | Результаты дисперсионного анализа ($n = 43$) | | | Средние значения показателей эритроцитов | | | | | | $p < 0.05$ |
|-------------------------------------|--|------------|----------------|--|-------------------|------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| | Вид | Место | Взаимодействие | <i>Apodemus sylvaticus</i> | | <i>Clethrionomys rutilus</i> | | <i>Mus musculus</i> | | |
| | $F_{2,37}$ | $F_{1,37}$ | $F_{2,37}$ | К (1) $n = 6$ | О (2) $n = 11$ | К (3) $n = 5$ | О (4) $n = 1$ | К (5) $n = 6$ | О (6) $n = 14$ | |
| D, мкм | 2.266 | 9.212* | 31.836* | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 5.7 | 5.3 | 7.2 | 5, 6-1, 2, 3; 5-6 |
| MCV, мкм ³ | 4.1* | 13.42* | 15.432* | 54.7 | 54.7 | 79.3 | 46.5 | 55.7 | 52.6 | 3-1, 2, 4, 6 |
| MCH, пг | 0.891 | 15.69* | 5.073* | 16.8 | 17.1 | 22.0 | 15.1 | 19.4 | 15.8 | 3-1,2,4,6; 5-6 |
| S, мкм ² | 4.566* | 6.440* | 19.689* | 69.7 | 72.4 | 75.0 | 63.7 | 59.9 | 101.9 | 6-1, 2, 3, 5 |
| S эритроцитов/мкл, мкм ² | 4.168* | 10.48* | 10.881* | 633.7 | 593.1 | 453.0 | 689.6 | 512.3 | 1019 | 6-1, 2, 3, 5 |
| Hb/S, пг/мкм ² | 64.624* | 9.535* | 4.071* | 0.048 | 0.047 | 0.058 | 0.046 | 0.030 | 0.016 | 5-1, 2, 6 |
| HbF | 13.429* | 3.691* | 4.997* | 50.3 | 43.4 | 31.5 | 57.4 | 76.5 | 162.8 | 6-1, 2, 3, 4, 5 |



Рис. 1. Состав эритроцитов с разным диаметром у мелких млекопитающих с контрольной (К) и опытной (О) территорий ВУРСа (*Ap. sylvaticus*, *Cl. rutilus*) и ТРАСа (*M. musculus*).

организма, чем общее число лейкоцитов в крови (Гаркави и др., 1990). Действительно, число лейкоцитов в крови животных не различается, отмечена лишь тенденция к нарастанию у особей с загрязненных территорий, тогда как соотношение типов клеток изменяется. Так, у домовой мыши (ТРАС) величина лимфоцитарно-нейтрофильного профиля с загрязненной территории снижается (составляет 2.4 против 3.5), у животных с ВУРСа возрастает (в 1.6 и 1.7 раза) вследствие разнонаправленного изменения числа нейтрофилов и лимфоцитов (рис. 2). Тенденция к увеличению (до 116%) числа лимфоцитов у животных с ВУРСа, можно полагать, направлена на усиление иммунной защиты организма. В формуле крови отмечен сдвиг влево (отношение числа миелоцитов, мета-

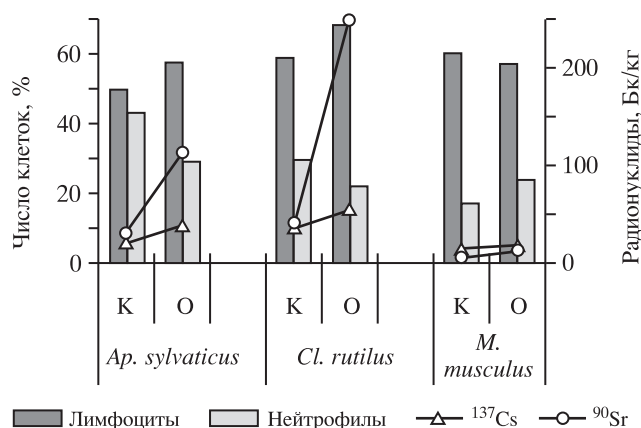


Рис. 2. Содержание лимфоцитов, нейтрофильных лейкоцитов в крови, ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в тушках (Бк/кг сухой массы) у мелких млекопитающих с контрольной (К) и опытной (О) территорий ВУРСа (*Ap. sylvaticus*, *Cl. rutilus*) и ТРАСа (*M. musculus*).

миелоцитов и палочкоядерных к сегментоядерным), особенно выраженный у домовых мышей в большей мере за счет увеличения юных и палочкоядерных нейтрофилов ($p < 0.05$), а у животных с ВУРСа – у красной полевки (в 2.5 раза) за счет убыли сегментоядерных ($p < 0.01$) (рис. 2).

Для понимания путей изменчивости состава и структуры клеток крови оценены концентрация и состав клеток костного мозга, концентрация клеток в селезенке, выполняющей у мелких млекопитающих и кроветворную функцию. Заметное возрастание массы селезенки и числа клеток в ней у лесных (ВУРС) мышей с загрязненной территории (табл. 1), а у домовых (ТРАС) и превышение концентрации на единицу массы органа (в

1.8 раза, $p < 0.05$), можно связать с активацией эритропоэза в селезенке, что Л.Д. Материй и А.И. Таскаев (1999) выявили у мелких млекопитающих в районе аварии ЧАЭС. Изменчивость параметров селезенки у животных с ВУРСа неоднотипна ($p < 0.05$): в селезенке контрольных особей красной полевки клеток больше, чем у лесной мыши, однако у особей с загрязненного участка масса селезенки и число клеток в ней (58%) меньше, как и клеток в костном мозге (65%), где у лесной мыши эти показатели составляют 131%, 119% и 117%, соответственно (табл. 1, 2). Можно полагать, что кроветворные органы красной полевки с загрязненной территории испытывают повышенную нагрузку факторов среды и продуцируют эритроциты иной структуры и сниженной стойкости, что показано выше, их функция в крови поддерживается бóльшим количеством, чем у контрольных особей (табл. 1). Негативное влияние длительного (210 с) низкоинтенсивного внутреннего облучения ^{90}Sr (50 Бк/мл хлорида ^{90}Sr , 3–5 мл в сутки/мышь) на селезенку (увеличение разрывов ДНК основного пула клеток при дозе < 1 сГр) показано в эксперименте на мышах (Лизунова и др., 2008). У красной полевки с загрязненной территории масса тела меньше, чем у лесных мышей (81 против 105%).

В составе клеток костного мозга лесной мыши и красной полевки (ВУРС) установлены межвидовые различия ($R\text{-Pa}_{0.24,15} = 6.33$, $p < 0.001$), а также влияние радиационного загрязнения для каждого вида ($R\text{-Pa}_{0.24,15} = 2.55$, $p < 0.03$).

В эритроцитарном ростке у лесной мыши и красной полевки с загрязненной территории на стадии базофильных нормобластов возрастает митотическая активность (в 2.7 раза у мышей и в 2.2 раза у полевок, $p < 0.05$), количество эритроидных клеток (25.6 против 19.4% у контрольных лесных мышей, 27.9 против 21.8% у красной полевки), снижается (в 1.4 раза, $p < 0.05$) лейко-эритроцитарное отношение (рис. 3). В крови лесных мышей больше ретикулоцитов (212% от контроля). Эти признаки указывают на усиление эритропоэза, ускорение созревания клеток, в кровь выходят эритроциты с описанными выше свойствами. В условиях загрязненной среды у мелких млекопитающих формируется особый тип напряженного функционирования красного ростка вплоть до запуска резервных механизмов, поддерживающих дыхательную функцию и жизнеспособность организма (Муксинова, 1990; Материй, Таскаев, 1999). Увеличение митотической активности на стадии базофильных эритробла-

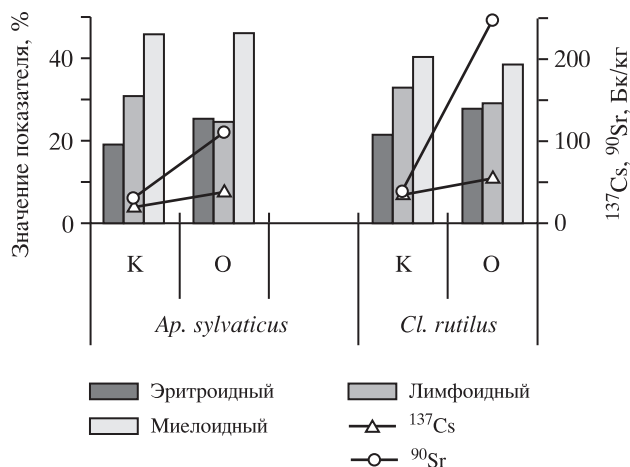


Рис. 3. Число клеток в миелоидном, эритроидном, лимфоидном ростках костного мозга, содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в зольном остатке костно-мышечной ткани (Бк/кг сухой массы) у животных с контрольной (К) и опытной (О) территориями ВУРСа (*Ap. sylvaticus*, *Cl. rutilus*).

стов находят и у жителей населенных пунктов в головной части ВУРСа (Аклеев, 2012).

В гранулоцитарном ростке костного мозга у лесной мыши с опытной территории митотическая активность не изменяется (97%), но возрастает скорость созревания гранулоцитов (108% от контроля, $p \leq 0.05$), увеличивается количество клеток делящегося пула (140–150%), среди них миелобластов (в 1.36 раза, $p < 0.04$). Снижение числа клеток в созревающем пуле (92%) и лимфоидном ростке (80% от контроля, $p \leq 0.004$) можно связать с ускоренным выходом их в кровь, где палочкоядерных нейтрофилов (133%) и лимфоцитов (117%) больше, чем у контрольных особей. У красной полевки по сравнению с лесной мышью скорость созревания гранулоцитов возросла в большей степени (2.47 против 0.97, $p < 0.05$), стало больше лимфобластов (2.21 против 0.88%), миелоцитов (3.8 против 2.2%), меньше палочко- и сегментоядерных нейтрофилов (12.29 против 23.4%).

Число мегакариоцитарных, плазматических клеток, моноцитов, эозинофильных и базофильных лейкоцитов в костном мозге этих животных существенно не изменяется ($p > 0.05$). У лесных мышей с загрязненной территории больше радиостойчивых ретикулярных клеток (1.75 против 0.6%, $p < 0.05$), способных регенерировать костный мозг.

Появление количественно-структурных изменений клеток крови при воздействии повреждающих факторов одни авторы связывают с на-

чальным проявлением защитно-компенсаторных реакций в ответ на возросшие функциональные нагрузки на систему крови (Борисова и др., 1988; Козинец и др., 2007), другие отмечают функциональную неполноценность клеток (Маслова, Верховская, 1976; Материй, Маслова, 1984). Наблюдаемые нами различия показателей (концентрации клеток, их структуры, клеточного состава крови и кроветворных органов) у разных видов (лесной мыши и красной полевки) с опытной территории, а также одного вида с разных территорий даже в условиях столь низкого радиоактивного загрязнения можно рассматривать как проявление компенсаторных возможностей кроветворения, протекающих по количественному или качественному пути. Большинство исследованных показателей у красной полевки находится в диапазоне 60–100% от уровня контрольных животных, у лесной мыши – на уровне контрольных значений или превышает их. У домового мыши отмечены выпадающие значения среднего диаметра (7.9 мкм), числа ретикулоцитов (59%), кариоцитов (20.5 млн/бедро), индекса селезенки (16.0), что может быть следствием повышенной нагрузки факторов среды на организм. При малых дозах радиации основой патологии считают повреждение делящихся гемопоэтических клеток, ведущих к нестабильности пролиферации в отдельных ростках кроветворения, функциональной неполноценности клеток крови, играющих центральную роль в развитии инфекционных осложнений, отдаленных новообразований (Муксинова, 1990; Материй, Таскаев, 1999; Котеров, 2000; Лизунова, 2008; Аклеев, 2012).

Обнаружение радионуклидов в почве и почвенно-растительном покрове исследуемых территорий (Трапезников и др., 2007; Тетерин, 2011) и поступление их по пищевой цепи в организм дает основание полагать о наличии хронического низко интенсивного облучения животных. В отделе континентальной радиоэкологии нашего института проведена оценка в зольном остатке костно-мышечной ткани суммарной β -активности каждой тушки и содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr для опытной и контрольной групп животных. У домовых мышей с загрязненной территории (ТРАС) величина суммарной β -активности (256.3 против 231.3 Бк/кг сухой массы) и содержание ^{137}Cs (18.5 ± 5.0 против 15.0 ± 5.0 Бк/кг сухой массы) несущественно превышает ($F_{1,33} = 3.46$, $p < 0.07$) уровни контрольных животных, содержание ^{90}Sr значительно выше (12.0 ± 1.2 против 4.9 ± 0.9 Бк/кг сухой массы)

У животных с загрязненной территории ВУРСа концентрация ^{137}Cs (в 1.9 раза у лесной мыши, в

1.5 раза у красной полевки) и ^{90}Sr (в 6.1 у красной полевки и в 3.6 раза у лесной мыши) также выше, чем у контрольных особей (рис. 2). При этом у красной полевки больше, чем у лесной мыши и ^{90}Sr (в 2.2 раза), и ^{137}Cs (в 1.3 раза). Различное накопление радионуклидов у этих видов можно связать с различным типом их питания: в рационе лесной мыши преобладают семена, у красной полевки – вегетативные части растений, накапливающие токсиканты в большем количестве. При оценке содержания радионуклидов в растительных образцах и желудочно-кишечном тракте у разных видов животных показано, что красная полевка накапливает больше (Стариченко и др., 1995). Можно полагать, что различная изменчивость параметров крови красной полевки и лесной мыши может быть следствием разной концентрации накопленных радионуклидов. Как более токсичный ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs и локализуемый в костной ткани в больших количествах у красной полевки, действует на костный мозг и в большей мере подавляет радиочувствительную кроветворную ткань (Malinovsky et al., 2013). Вполне допустимо влияние на селезенку ^{37}Cs , равномерно распределяющегося в мягких тканях. Не исключено влияние на животных ВУРСа газоаэрозольных выбросов промышленных предприятий г. Каменска-Уральского (Трапезникова и др., 2002). При сочетанном влиянии антропогенных факторов действие малых доз приобретает особое значение (Бурлакова и др., 1999).

Несмотря на минимальное содержание радионуклидов у животных с ТРАСа (рис. 2) с помощью дискриминантного анализа по комплексу показателей системы крови и суммарной β -активности выявлены различия между контрольной и опытной выборками ($F_{7,13} = 39.3$, расстояние Махалобиса равно 98, $p < 0.000$). Среди параметров в большей мере различимы число эритроцитов ($F_{1,14} = 6.4$, $p < 0.024$), их диаметр ($F_{1,14} = 92.2$, $p < 0.000$). В ковариационном анализе, где ковариатой принята суммарная β -активность, показано влияние радиационной компоненты на число клеток в селезенке ($p < 0.03$) и число эритроцитов диаметром 5.4 мкм ($p < 0.04$). На изменчивость параметров системы крови домового мыши может влиять высокотоксичный плутоний, содержание которого в почвенно-растительном покрове в 1.5–5 раз превышает уровень глобальных выпадений (Отдаленные...2000; Трапезников и др., 2007).

Повышение частоты хромосомных нарушений (в 1.7–2 раза), aberrаций хромосомного типа (29.4% с загрязненной территории против 6.3% с контрольной) в клетках костного мозга тех же

домовых мышей Э.А. Гилева и соавт. (1997, 2009) рассматривают как свидетельство цитогенетического поражения. Цитогенетические эффекты обнаружены при небольших дозовых нагрузках (0.1–0.2 сГр) у мелких млекопитающих с периферии головной части ВУРСа, где радиационный фон не превышает естественного (Стариченко и др., 1995). При повышении дозы от 10 сГр имеет место нестабильность генома у потомков облученных клеток (Котеров, 2000).

Таким образом, с помощью многомерного дисперсионного анализа по комплексу параметров крови и кроветворных органов трех видов мелких млекопитающих установлены межвидовые различия показателей ($R\text{-}P_{20,84} = 2.634$, $p < 0.001$); близка к уровню значимости изменчивость показателей в зависимости от уровня загрязнения территорий ($R\text{-}P_{10,42} = 1.897$, $p < 0.07$); существенно влияние взаимодействия факторов ($R\text{-}P_{20,84} = 2.106$, $p < 0.01$). Результаты проведенных исследований согласуются с данными, полученными на разных типах клеток организма (обнаружены физико-химические изменения даже при 3-кратном превышении природного фона при суммарной дозе 1–5 сГр (Burlacova et al., 1994; Пелевина и др., 2002)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя состояние системы крови трех видов мелких млекопитающих, обитающих в условиях с низким уровнем радиоактивного загрязнения, установлено изменение показателей системы крови. Выявленная видоспецифическая реакция животных на радиационное загрязнение свидетельствует о разных приспособительных реакциях, что вносит существенный вклад в теорию адаптивных процессов не только животных, но и человека, а также в понимание сущности эволюционного процесса.

Сопоставимые отклонения от контрольных значений параметров крови и кроветворных органов у животных при надфоновом (домовая мышь, ТРАС) и более высоком уровне загрязнения (красная полевка, ВУРС) можно объяснить сложным сочетанием антропогенных факторов. В изменчивость параметров системы крови домовой мыши существенный вклад может вносить высокотоксичный плутоний, содержание которого в почвенно-растительном покрове в 1.5–5 раз превышает уровень глобальных выпадений. Неоднозначность отклонения значений параметров системы крови у лесной мыши и красной полевки с территории ВУРСа скорее всего обусловлена

разной экологической специализацией грызунов, их разной радиочувствительностью. Выявленные изменения состава и структуры клеток в крови у исследованных видов животных отражают изменения, протекающие в кроветворных органах, они носят компенсаторно-приспособительный характер и поддерживают динамическое равновесие основных физиологических функций организма в условиях радиационного с низкой плотностью загрязнения среды.

Выявленные у исследованных животных гематологические сдвиги и структурные мутации хромосом в клетках костного мозга (Гилева и др., 1997) скорее всего, происходят и у человека, что выражается в росте числа инфекционно-воспалительных и онкозаболеваний (Цыб и др., 1996; Отдаленные, 2000; Аклеев, 2012). Подход к прогнозу генетических последствий загрязнения среды для населения Урала (от грызунов к человеку) приведен в работе (Гилева, Ялковская, 2009). Хроническое низкоинтенсивное облучение изменяет взаимодействие между системами и подсистемами организма, чувствительность и адаптационные способности к дополнительным повреждающим факторам отдельных организмов и популяции в целом (Burlacova et al., 1994; Бурлакова и др., 1999; Материй, Таскаев, 1999; Лизунова и др., 2008; Кудяшева, Таскаев, 2011; Grigorkina, Olenov, 2011). Имеются сведения, что эффекты малых доз (единицы-десятки сЗв) могут быть равны эффектам доз, измеряемых в Зв (Бурлакова и др., 1999, Отдаленные...2000).

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума УрО РАН (проект 12-П-4-1068, 12-С-4-1012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аклеев А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга, 2012. 464 с.
- Борисова В.А., Воеводина Т.М., Федорова А.В. и др. Биологические эффекты при длительном поступлении радионуклидов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 235 с.
- Бурлакова Е.Б., Голощатов А.Н., Жижина Г.П. и др. Новые аспекты закономерностей действия низкоинтенсивного облучения в малых дозах / Радиационная биология. Радиоэкология. 1999. Т. 39. № 1. С. 26–34.
- Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Уколов М.А. Адаптационные реакции и резистентность организма. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1990. 224 с.
- Гилева Э.А., Чепраков М.И., Нохрин Д.Ю. Анализ хромосомных нарушений у индикаторных видов грызунов

- нов в зоне влияния Тоцкого ядерного взрыва // Эколого-генетический анализ отдаленных последствий Тоцкого ядерного взрыва в Оренбургской области в 1954 году. Екатеринбург: Екатеринбург, 1997. Гл. 3. С. 65–78.
- Гилева Э.А., Ялковская Л.Э. Генетические последствия радиоактивного загрязнения среды для населения Урала: от грызунов к человеку // Докл. акад. наук. 2009. Т. 425. № 4. С. 567–570.
- Громов И.М., Ербаева М.А. Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Зайцеобразные и грызуны. СПб.: Зоол. ин-т, 1995. 522 с.
- Ильенко А.И., Крапивко Т.П. Экология животных в радиационном биогеоценозе. М.: Наука, 1989. 224 с.
- Клиорин А.И., Тиунов Л.А. Функциональная неравнозначность эритроцитов. Л.: Наука, 1974. 148 с.
- Козинец Г.И., Высоцкий В.В., Захаров В.В. и др. Кровь и экология. М.: Практ. медицина, 2007. 432 с.
- Котеров А.Н. Молекулярно-клеточные закономерности, обуславливающие эффекты малых доз ионизирующих излучений // Мед. радиология и радиац. безопасность. 2000. № 5. С. 5–20.
- Кудяшева А.Г., Таскаев А.И. Адаптивные реакции процессов дегидрирования у полевки-экономки при дополнительных воздействиях физической природы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2011. Т. 51. № 5. С. 549–558.
- Лизунова Е.Ю., Воробьева Н.Ю., Осипов А.Н. Влияние хронического воздействия γ -излучения и ^{90}Sr в малых дозах на уровень разрывов ДНК и чувствительность к перекиси водорода клеток селезенки мышей // Изв. РАН. Серия биол. 2008. № 4. С. 409–413.
- Маслова К.И., Верховская И.Н. Биологическое действие повышенной радиоактивности на организм животных в природных условиях // Проблемы радиационной биологии и биологическое действие малых доз ионизирующей радиации. Сыктывкар: Коми фил. АН СССР, 1976. С. 127–141.
- Материй Л.Д., Маслова К.И. О микроядрах в клетках периферической крови (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих на участках с повышенной естественной радиоактивностью // Радиация как экологический фактор при антропогенном загрязнении. Сыктывкар, 1984. С. 55–62.
- Материй Л.Д., Таскаев А.И. Морфологические изменения в кроветворной системе и возможные отдаленные последствия для мышинных грызунов из района аварии на ЧАЭС // Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999. С. 260–273.
- Москвитина М.С., Кохонов Е.В. Некоторые показатели состояния животных из разных популяций красной полевки (*Clethrionomys rutilus* Pall.) Горного Алтая // Вестник Томского гос. ун-та. Биол. 2012. № 2 (18). С. 186–193.
- Муксинова К.Н. Особенности повреждения системы кроветворения при длительном действии радиации // Поражение и восстановление кроветворения при острой лучевой болезни: тез. докл. Всесоюз. конф. (14–16 нояб. 1990). М., 1990. С. 102.
- Орехова Н. А. Морфофункциональные изменения системы крови *Apodemus* (S.) *uralensis* в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) // Вест. Челяб. гос. пед. ун-та. 2011. № 11. С. 39–328.
- Отдаленные эколого-генетические последствия радиационных инцидентов: Тоцкий ядерный взрыв / под ред. А.Г. Васильева. Екатеринбург: Екатеринбург, 2000. 288 с.
- Паришина Е.Ю., Гендель Л.Я., Рубин А.Б. Влияние ихфанов на структурные особенности мембраны эритроцитов // Изв. РАН. Сер. биол. 2007. № 6. С. 645–649.
- Пелевина И.И., Алещенко А.В., Антошина М.М. и др. Реакция популяции клеток на облучение в малых дозах // Механизмы действия сверхмалых доз: тез. докл. 111 Междунар. симпоз. (Москва, 3–6 декаб. 2002). М.: Изд-во Росс. ун-та дружбы народов, 2002. С. 117.
- Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др. Современное состояние наземных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа. Екатеринбург: Голицынский, 2008. 204 с.
- Рисник Д.В., Беляев С.Д., Булгаков Н.Г. и др. Подходы к нормированию качества окружающей среды. Законодательные и научные основы существующих систем экологического нормирования // Успехи соврем. биол. 2012. Т. 132. № 6. С. 531–550.
- Стариченко В.И., Любашевский Н.М., Нифонтова М.Г. и др. Накопление радионуклидов мелкими млекопитающими, обитающими на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная безопасность и защита населения: тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Урал. Гос. мед. ин-т, 1995. С. 31–33.
- Тарахтий Э.А., Кардонина Т.Л. Количественно-морфологическое исследование системы крови лесной мыши и красной полевки, обитающих на территории ВУРСа // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35. В. 4. С. 550–559.
- Тетерин А.Ф. Эколого-климатические особенности зоны Эколого-климатические особенности зоны Восточно-Уральского радиоактивного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 368 с.
- Трапезникова В.Н., Юшков П.И., Николкин В.Н. и др. Динамика и прогноз радиоэкологической ситуации в экосистеме оз. Тыгиш на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вестник национального ядерного центра республики Казахстан. 2002. Вып. 3. С. 55–61.

- Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др.* Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. Т. 2. 400 с.
- Цыб А.Ф., Хаит С.Е., Матвеев В.Г. и др.* Динамическое исследование показателей крови населения загрязненных радионуклидами территориях Калужской области и ликвидаторов 1986–1993 годов // Мед. радиология и радиац. безопасность. 1996. Т. 44. № 4. С. 3–7.
- Шашкин А.В., Терсков И.А.* Продукция и деструкция эритроцитов в организме. Новосибирск: Наука, 1986. 89 с.
- Шиффман Ф.Дж.* Патофизиология крови: пер.с англ. М.: БИНОМ, 2009. 448 с.
- Burlacova E.B. et al.* Radiation of low intensity. Radiobiological aspects // Radiobiological conference of nuclear accidents.: Absr., Moscow, (25–26 oct. 1994). M., 1994. P. 35.
- Grigorkina E., Olenov G.* East urals radioactive trace: Adaptive strategy of rodents' population // Radioprotection. 2011. V. 46. № 6. P. 437–443.
- Kostelecka-Myrcha A.* The ratio of amount of haemoglobin to total surface area of erythrocytes in mammals // Acta Theriol. 2002. V. 47. Suppl. 1. P. 209–222.
- Malinovsky G., Yarmoshenko I., Zhukovsky M. et al.* Strontium biokinetic model for mouse-like rodent // J. Environ. Radioactivity. 2013. V. 118. P. 57–63.
- Finney D.J.* Probit Analysis. – 3d ed. London: Cambridge Univ. Press, 1971. 333 p.

Investigation of the Blood System in Small Mammals from Terrains with Low Radioactive Pollution

E. A. Tarakhtii, O. A. Zhigalskii

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

The quantitative and morphological characteristics of blood cells and blood-forming organs in small mammals from conventionally clean terrains and areas with low radioactive contamination are presented. Changes in the composition of blood cells, erythrocyte structure, mitotic activity and rate of maturing of cells in blood-forming tissues of animals from polluted territories were revealed. The degree of changes in the blood system depends on the level of contamination; it has specific specificity. The revealed species-specific response of animals to radioactive contamination testifies to different mechanisms of the adaptation.