

УДК 599.323.43+591.11+504.5:661+574.23

РЕАКЦИЯ СИСТЕМЫ КРОВИ ЛЕСНЫХ ПОЛЕВОК НА СТРЕСС НА ФОНЕ ХРОНИЧЕСКОГО ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ

© 2011 г. Э. А. Тарахтий, С. В. Мухачева

*Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: tar@ipae.uran.ru; msv@ipae.uran.ru*

Исследован ряд количественных и структурно-функциональных параметров системы крови рыжей и красной полевок, обитающих в условиях хронического химического загрязнения среды. Установлена изменчивость показателей крови и кроветворных органов в зависимости от видовой принадлежности и удаления от источника загрязнения. При дополнительной нагрузке на организм животных с нарушенных территорий выявлено напряжение кроветворной функции, неполноценность морфо-функционального состояния клеток крови.

Ключевые слова: химическое загрязнение среды, мышевидные грызуны, система крови.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях антропогенного загрязнения природной среды и деградации экосистем больших территорий актуальными являются проблемы изучения механизмов функционирования, трансформации, реализации адаптивных связей животных на деградированных территориях, влияния токсикантов на живой организм. При химическом загрязнении среды по цепи “почва–растение–животный организм” тяжелые металлы поступают в организм и в зависимости от концентрации поллютантов, их состава, видовой специфики и других факторов могут вызывать отклонение от нормы различных показателей [1, 2, 7, 8, 11, 15, 17, 23, 24]. Особенно сложно оценить и дать однозначный ответ влияния антропогенных факторов в малых дозах, не вызывающих проявляющейся симптоматики и не выявляющихся стандартными методами лабораторной диагностики. Обнаружить скрытые изменения, оценить состояние животных, а косвенно и среды их обитания, позволяет применение нагрузочных тестов. Высокая радиочувствительность кроветворной системы животного организма дает основание в качестве такой нагрузки использовать ионизирующее излучение.

Для оценки влияния факторов среды обитания на организм животных мелкие млекопитающие являются наиболее информативным объектом, как постоянно и тесно контактирующие со

средой. В оценке действия тяжелых металлов на организм животных может служить комплекс количественных и структурно-функциональных параметров интегральной системы крови, чувствительной к влиянию внешних и внутренних факторов, позволяющий оценить не только состояние организма, но и механизм адаптивного ответа к условиям измененной среды [9]. Надежным и связанным с жизнеспособностью организма показателем является активность системы пероксидаза-пероксид водорода лейкоцитов, являющейся молекулярной основой неспецифического иммунитета и обладающей антимикробным, антивирусным и противоопухолевым действием [18].

Задача настоящего исследования – в градиенте загрязнения среды изучить количественный, структурный состав, функциональную активность показателей системы крови двух видов полевок, оценить состояние кроветворной функции животных при стрессовой нагрузке на фоне хронического химического загрязнения среды.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании использованы лесные полевки (рода *Clethrionomus*), населяющие территории в зоне действия Среднеуральского медеплавильного завода (СУМЗ). В окрестностях предприятия, действующего с 1940 г., в результате выбросов газообразных соединений серы и пылевых частиц с сорбированными химическими элементами (Cu,

Pb, Cd, Zn, As, Hg, Fe и др.) сформировались зоны с различной степенью изменения экосистемы [4]. Для исследования были выбраны участки (рис. 1), расположенные последовательно на разном удалении к западу от источника эмиссии, различавшиеся по интенсивности техногенного воздействия и степени трансформации лесных фитоценозов в импактной (**I**, 1.5–2 км) и буферной (**B**, 6 км) зонах. В качестве контрольных использованы фоновые участки (**F**, 20 км и **K**, 30 км), на которых техногенная нагрузка была на уровне регионального фона. Токсическая нагрузка (оцененная по суммарной концентрации приоритетных загрязнителей в их кормовых объектах) на животных, населяющих **B** и **I** участки, в 2.5–4.5 раза превышала фоновые показатели [13]. Для лесных полевков анализируемые участки представляли собой серию техногенно измененных местообитаний, степень деградации которых снижалась по мере удаления от источника эмиссии [17].

Животных отлавливали трапиковыми живоловками одновременно на всех участках в июле 2007 и 2008 гг. Объектом исследования выбраны рыжая (*Clethrionomys glareolus*, Schreber 1780) и красная полевки (*Clethrionomys rutilus*) – типичные фитофаги с преобладанием в рационе вегетативных частей растений у первой и семян у второй [6]. Различие в рационе может влиять на уровень накопления у них поллютантов.

У каждой особи под эфирным наркозом из орбитального синуса брали кровь. Определяли на гемоанализаторе Abacus Junior vet (Австрия) концентрацию и клеточный состав лейкоцитов, эритроцитов, гемоглобина (Hb), гематокрит (Ht), а также параметры эритроцитов: средний объем (MCV), содержание (MCH) и концентрацию (MCHC) гемоглобина в эритроците, распределение эритроцитов по объему (RDWsd) и коэффициент вариации показателя (RDWcv). С помощью гемоанализатора Celloscope 401 (Lars Yungberg & Co, Швеция) определяли содержание эритроцитов разного диаметра, вычисляли средний диаметр и толщину клеток. Определяли морфологию и состав лейкоцитов (на мазках, окрашенных по Паппенгейму), содержание ретикулоцитов (на мазках, окрашенных бриллиант-крезиловым голубым), активность системы пероксидаза-эндогенная перекись водорода лейкоцитов (на мазках, окрашенных 1% метиленовым зеленым с применением 3.3'-диаминобензидин тетрагидрохлорид дигидрата – реактив Fluka, США) [20] с учетом клеток с максимальной (А), умеренной (В) и низкой (С) активностью (А – 100%, В – 50% и более, С – менее 50%). Далее животных забивали дислокацией шейных позвонков, определяли массу

тела и селезенки, концентрацию клеток костного мозга в бедренной кости и селезенке (в камере Горяева).

Часть особей красной (3 особи с **K** и 9 с **I** участков) и рыжей полевков (9 с **K**) подвергали однократному тотальному облучению извне гамма-лучами ^{137}Cs на экспериментальной установке “Игур-1” в дозе 4.75 Гр, в 2.7 раза меньшей, чем $\text{SD}_{50/30}$ не различимой для этих видов полевков [5]. Мощность дозы – 1.26 рад/с. Через 3 суток после облучения (в разгар опустошения кровяной ткани при сублетальной дозе) определяли изучаемые показатели. Исследовано всего 43 особи рыжей и 27 красной полевков.

Полученные данные анализировали с помощью “Statistica for Windows” (двух- и многофакторный дисперсионный анализ), при оценке различий показателей ($p < 0.05$) использовали Tukey-тест для разного числа животных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зонах техногенного загрязнения уменьшение числа пригодных для обитания участков и снижение их “потребительских” качеств для полевков отражается на численности и характере распределения животных по территории, что было показано в специальных исследованиях на примере рыжей полевки [14]. Установлено, что при удалении от источника эмиссии закономерно увеличивалось общее обилие и численность оседлых особей, которые достигали максимальных значений на фоновой территории. На буферной и фоновых территориях доля мигрантов в населении снижалась в 4 и 16 раз по сравнению с импактными участками (составляла 0.14, 0.03, 0.52 соответственно). На основании полученных данных можно полагать, что исследуемые нами в эксперименте животные большую часть жизни обитали в пределах выделенных зон.

При отсутствии существенных различий в рационе полевков в зависимости от пола и возраста [15] показатели системы крови анализировали в группах сеголеток.

С помощью двухфакторного дисперсионного анализа по комплексу показателей (табл. 1) установлено влияние всех факторов ($R\text{-Pa}_{0.87.30} = 1.94$, $p < 0.021$): видовой принадлежности особей ($R\text{-Pa}_{0.28.11} = 3.206$, $p < 0.023$), удаленности участка от источника загрязнения ($R\text{-Pa}_{0.84.33} = 1.907$, $p < 0.02$) и взаимодействия факторов ($R\text{-Pa}_{0.84.33} = 1.685$, $p < 0.047$), где $R\text{-Pa}_{0.84.33}$ – критерий, использующий F -статистику для аппроксимации “Лямбда-

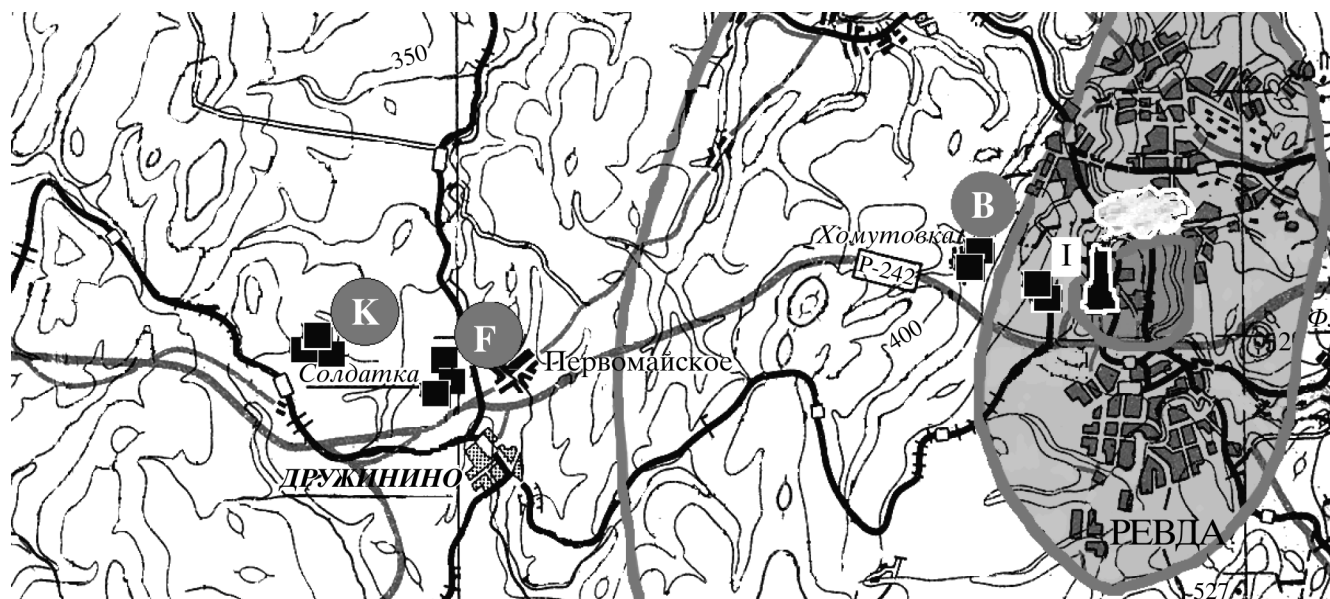


Рис. 1. Карта расположения участков исследования. Обозначения см. в тексте.

Уилкса". Влиянию всех факторов подвержены концентрация костного мозга, эритроцитов, активность системы пероксидаза–эндогенная перекись водорода лейкоцитов, меньше факторов влияет на концентрацию клеток в селезенке, лейкоцитов, состав клеток крови (табл. 1).

Между видами полевок по выборке в целом выявлены различия концентрации эритроцитов, ретикулоцитов, RDWcv – значения этих показателей больше у рыжей полевки, больше у них и лейкоцитов, но ниже активность системы пероксидаза–эндогенная перекись водорода лейкоцитов, меньше клеток в костном мозге и содержание гемоглобина в эритроците.

При исследовании параметров системы крови полевок в градиенте загрязнения среды (в направлении **К–I**) находим: концентрация эритроцитов у красной полевки практически не изменяется, у рыжей – нарастает от **К** к **В**, где превышает исходную величину и значение показателя у особей с участка **I**, при этом она сопоставима с возросшими величинами гемоглобина и гематокрита (табл. 1). Концентрация и параметры эритроцитов красной и рыжей полевок с участка **I** не различаются ($p > 0.05$), однако разнонаправленный ход кривых среднего диаметра и толщины эритроцита (рис. 2), а также некоторое изменение широты распределения популяции эритроцитов (RDWsd, табл. 1) свидетельствуют о различной форме клеток (большей сферичности у красной), а следовательно функции и продолжительности их жизни. При хроническом пероральном введении тяжелых металлов в эксперименте у лабораторных

животных выявлен сдвиг кривой Прайс-Джонса в сторону большего диаметра эритроцитов [8]. У облученных животных с уменьшением продолжительности жизни эритроцитов возрастает скорость пролиферации стволовых кроветворных клеток, обеспечивая высокую скорость восстановления кроветворной ткани и, как следствие, высокую радиоустойчивость животных [19]. Подобный механизм действия может иметь место и в случае влияния поллютантов. В пользу этой гипотезы свидетельствует несколько возросшая концентрация ретикулоцитов в крови и клеток костного мозга (16.3 против 14.6 млн./бедро) у красной полевки с участка **I** по сравнению с **В**, у рыжей величины этих показателей минимальны (табл. 1). По-видимому, костный мозг и селезенка красной и рыжей полевок с участка **I** продуцируют эритроциты с разными качественно-структурными свойствами, что может быть обусловлено, как показано, разным накоплением тяжелых металлов [17] и (или) особенностями реакции системы крови у этих видов полевок и другими факторами.

Для оценки влияния вредных факторов исследованы концентрация, состав и функциональная активность лейкоцитов. Если у красной полевки концентрация лейкоцитов нарастает на участках **К–В**, достигая максимума на последнем и минимума на **I**, то у рыжей на участке **I** она существенно выше (табл. 1). Изменение состава лейкоцитов имеет прямое отношение к механизму защиты: уменьшается число лимфоцитов, связанных с образованием антител в организме,

Таблица 1. Результаты дисперсионного анализа. Средние значения показателей красной и рыжей полевок

Показатель	Результаты дисперсионного анализа			Cl. rutilus						Cl. glareolus				$p < 0.05$
	$MS_{\text{ост}}$	Вид, 1	Участок, 2	Исследуемый участок										
		$F_{1,38}$	$F_{3,38}$	1×2	I (1)	B (2)	F (3)	K (4)	I (5)	B (6)	F (7)	K (8)		
Масса тела, г	8.596	8.064*	3.553*	3.109*	20.7	18.8	26.1	19.9	21.0	14.6	17.7	19.6	6-(1.3.5)**	
Индекс селезенки	36.006	0.120	0.510	0.038	2.65	3.03	2.04	5.67	4.16	2.47	3.27	6.98		
Спленциты, млн./мг органа	0.202	0.008	2.29**	0.214	1.11	1.73	1.33	1.17	1.00	1.58	1.55	1.29	4-5.7	
Костный мозг, млн./бедро/г массы тела	0.040	3.847*	4.290*	3.582*	0.80	0.77	0.81	1.31	0.62	1.00	0.63	0.78		
Эритроциты, млн./мкл	0.015	3.742*	3.040*	3.080*	0.53	0.53	0.45	0.51	0.47	0.84	0.62	0.50	6-1.5.8	
Ретикулоциты, %	23.738	1.407	0.169	0.143	0.96	0.55	1.14	1.18	1.96	3.55	2.83	5.16		
MCV, мкм ³	7.049	0.520	3.106*	0.267	42.21	41.99	37.41	44.10	41.13	40.74	38.48	42.15	7-8.0	
МСН, пг	1.609	0.195	1.287	0.736	15.49	15.69	13.50	15.52	15.36	14.20	14.50	15.21		
МСНС, %	6.353	0.027	0.420	0.699	36.69	37.39	36.08	35.24	37.33	34.86	37.69	36.22	1-5.0	
НВ, г/%	4.829	0.581	0.229	0.251	16.17	15.72	16.65	15.89	15.13	16.37	15.67	14.46		
НТ, %	26.35	0.761	0.315	1.162	43.97	41.94	46.15	44.54	40.44	47.12	41.53	40.03	1-5.0	
Лейкоциты, тыс./мкл	9.602	2.852**	0.535	2.004	3.25	8.61	4.15	4.69	9.33	6.73	6.78	6.62		
Нейтрофилы, %	68.33	0.432	3.184*	0.605	12.71	28.00	13.00	9.50	14.50	18.25	13.93	7.44	5-6**	
Метамиелоциты, %	0.224	1.082	0.341	1.347	0.00	0.00	0.00	0.50	0.63	0.25	0.27	0.18		
Палочкоядерные, %	9.084	0.026	0.939	0.305	3.00	6.00	5.00	3.50	4.50	5.75	3.80	2.64	5-6**	
Сегментоядерные, %	34.3	1.401	4.460*	0.881	9.71	22.00	8.00	5.50	6.88	12.25	9.87	4.62		
Эозинофилы, %	1.327	0.736	2.036	2.59**	0.71	2.00	3.00	0.00	1.75	0.25	1.33	0.73	5-6**	
Моноциты, %	32.83	0.084	1.026	2.973*	3.43	7.00	7.00	5.00	14.25	1.75	4.60	4.61		
Лимфоциты, %	124.0	0.369	1.861	1.924	82.14	63.00	77.00	85.50	71.38	80.50	79.87	87.22	5-6**	
MPV, мкм ³	0.613	0.972	0.121	0.419	5.18	5.35	4.81	4.86	5.52	5.06	5.36	5.55		
Тромбоциты, тыс./мкл	45944	0.085	1.452	0.026	285.42	484.30	258.46	232.61	347.0	493.28	263.05	262.08	2-1.(4-8)	
RDWcv, %	0.870	1.578	0.085	0.492	18.67	18.35	19.21	19.12	19.39	19.53	19.20	19.20		
RDWsd, мкм ³	6.005	0.103	2.57**	0.445	31.25	31.25	28.13	33.99	32.03	32.03	29.48	32.39	1-7.8**	
Активность системы пероксидаза-эндогенная	48.31	25.699*	11.98*	7.111*	7.36	40.30	27.07	4.33	1.83	9.64	2.62	5.99		
перекись водорода лейкоцитов	53.79	29.833*	0.579	0.143**	18.57	22.00	24.06	24.79	3.95	6.94	4.79	6.70	2-5.7*8*	
Число животных	79.26	0.004	0.279	0.935	13.46	3.15	3.76	9.03	5.42	7.36	10.56	5.10		
	253.0	22.748*	1.971	0.510**	39.38	65.45	54.89	38.15	11.20	23.94	17.96	17.79		
			46		7	2	2	2	4	4	15	11		

Примечание: $MS_{\text{ост}}$ – остаточный средний квадрат, $F_{3,38}$ – критерий, * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.1$, в скобках – номер группы полевок. А, В, С – количество клеток соответственно с максимальной, умеренной и низкой активностью.

нарастает количество нейтрофилов (палочкоядерных и в большей мере сегментоядерных) и моноцитов, связанных с защитой организма от инфекции. Моноциты – самые активные фагоциты крови, они уничтожают погибшие клетки и их структуры, повышается их роль в клеточном иммунитете [22]. Возрастание их числа может вызывать увеличение числа колониестимулирующих факторов в кроветворной ткани, оказывающих влияние на пролиферацию, дифференцировку и самоподдержание кроветворных предшественников [10]. Можно полагать, что у рыжей полевки с участка **I** роль моноцитов в механизме адаптации многогранна, у этих особей выявлена минимальная концентрация клеток в костном мозге и максимальная – моноцитов в крови.

Вследствие изменчивости концентрации и состава лейкоцитов в градиенте загрязнения среды изменяется соотношение форменных элементов, характеризующее состояние организма. Так, показатель отношения содержания лимфоцитов к нейтрофилам, отражающий реактивность организма [12], при схожей ($p > 0.05$) динамике у этих видов полевок у рыжей на участках **К–В** находится на более высоком уровне, чем у красной (рис. 3).

С высокой степенью достоверности в градиенте загрязнения среды изменяется активность системы пероксидаза–эндогенная перекись водорода лейкоцитов (**К**, табл. 1), при этом у красной полевки протекает на более высоком уровне. Вплоть до участка **В** величина показателя нарастает и в основном за счет максимально активных клеток (**A**), далее снижается у особей с участка **I**, где у красной полевки преобладают клетки с умеренной и низкой активностью (**B, C**), у рыжей – с низкой (**C**), которую, по-видимому, и компенсирует возросшее число лейкоцитов. В механизме ответной реакции лейкоцитов имеют место количественно-качественные перестройки. О качественных изменениях наряду со сниженной активностью лейкоцитов свидетельствуют морфологически измененные, не типичные по размеру, форме и структуре лейкоциты, выявляемые на мазках крови.

Таким образом, в градиенте загрязнения среды у обоих видов полевок установлены изменения показателей системы крови, степень проявления которых не одинакова. Изменчивость параметров крови, а также показателей, проявляющих тенденцию к изменению, дает основание рассматривать эту реакцию как стимуляцию на раздражитель и классифицировать как одно из проявлений мобилизации защитно-приспособительных реакций к условиям трансформированной среды.

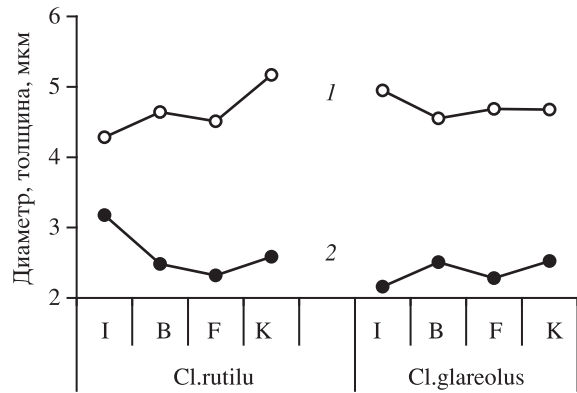


Рис. 2. Диаметр (1) и толщина (2) эритроцитов красной и рыжей полевок в градиенте загрязнения среды.

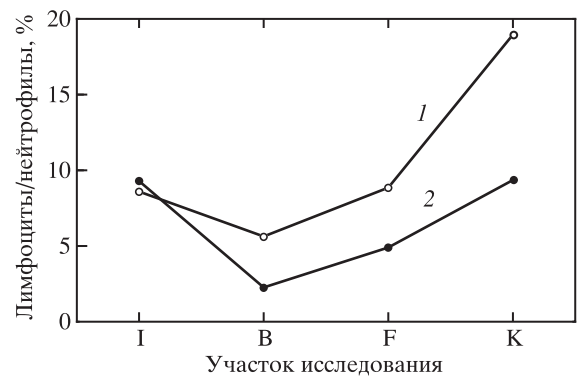


Рис. 3. Динамика отношения лимфоциты/нейтрофилы рыжей (1) и красной (2) полевок в градиенте загрязнения среды.

Оценить состояние системы крови полевок в условиях интенсивного загрязнения среды, а также выявить межвидовые особенности реакции мы попытались с помощью нагрузочных тестов, увеличивающих ценность информации.

Параметры крови рыжей и красной полевок на участке **К** статистически не различимы ($p > 0.05$). Вместе с тем обращает на себя внимание несколько больший у красной полевки средний диаметр эритроцитов (5.2 против 4.7 мкм у рыжей) за счет большей (на 3%) доли крупных и меньшей (на 4%) мелких клеток, суммарная площадь поверхности эритроцитов (491 против 455 мкм²), оцененная с учетом долей эритроцитов каждого диаметра (в интервале 3.5–9.6 мкм, всего 10 точек), а также более высокая концентрация клеток костного мозга.

Однако с помощью гамма-облучения животных с участка **К** выявлено различие ряда параметров системы крови красной и рыжей полевок (рис. 4). Приняв показатели необлученных полевок за 100%, находим у облученных особей красной полевки снижение до 30% числа клеток

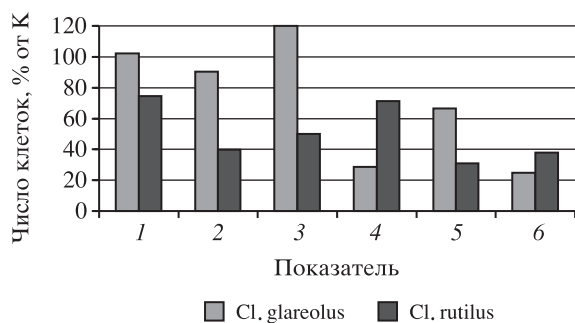


Рис. 4. Параметры системы крови облученных рыжей и красной полевки с территории **К**: 1 – гематокрит, 2 – концентрация гемоглобина, 3 – концентрация эритроцитов, 4 – концентрация лейкоцитов, 5 – концентрация клеток селезенки, 6 – концентрация клеток костного мозга.

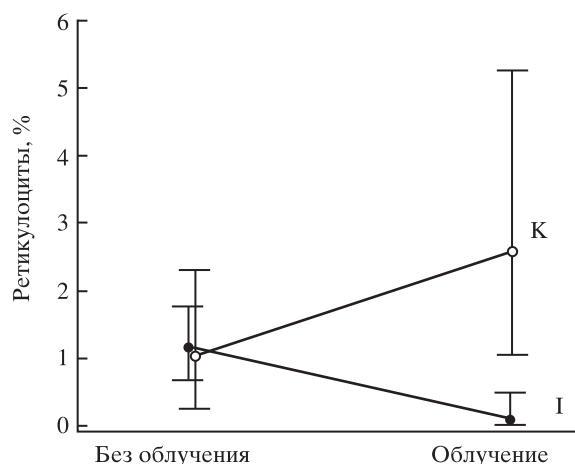


Рис. 5. Концентрация ретикулоцитов (среднее значение и доверительный интервал) интактных и облученных особей красной полевки с территорий **К** и **I**.

в селезенке, более чем вдвое в костном мозге, 40–70% составляет концентрация эритроцитов, гемоглобина, лейкоцитов, величина гематокрита. У рыжей полевки величины последних показателей (кроме лейкоцитов) составляют 90–120%. Отмечены различия в составе и активности лейкоцитов. Так, у красной полевки заметно снижение концентрации лимфоцитов, возрастание нейтрофилов (за счет палочкоядерных и в меньшей мере сегментоядерных), у рыжей – снижение концентрации лейкоцитов, нейтрофилов, нарастание моноцитов. У особей красной полевки больше ($p < 0.05$), чем у рыжей, величины показателей селезенки (масса и индекс в 4 раза, концентрация клеток в 1.5 раза), клеток в костном мозге (в 1.5 раза), ретикулоцитов в крови (в 7 раз). Выявленные в нагрузочном тесте различия ряда параметров системы крови красной и рыжей полевки с территории **К** могут отражать межвидовые

особенности и служить пусковым моментом в различной ответной реакции к условиям измененной среды.

С целью выявления поддержания оптимального уровня гомеостаза и “запаса прочности” системы крови у полевки с нарушенных территорий мы анализировали показатели облученных особей красной полевки с фонового (**К**) и максимально нарушенного (**I**) участков. С помощью дисперсионного анализа комплекса показателей установлено, что концентрация эритроцитов (в том числе нормированных на массу тела) и лейкоцитов в крови, традиционно используемых и являющихся мерой оценки влияния вредных факторов, у облученных особей с фонового и нарушенного участков не различаются (табл. 2). Однако различимы параметры эритроцитов: у облученных особей с участка **I** клетки меньшего объема, с большей концентрацией гемоглобина, коррелированной с концентрацией гемоглобина в крови ($r = 0.92$), популяция эритроцитов согласно данным RDWsd и RDWcv, более гомогенная по объему. В белой крови меньше гранулоцитов (особенно палочкоядерных нейтрофилов, $p < 0.03$), больше лимфоцитов и моноцитов, что установлено разными методами (с помощью гемоанализатора и на мазках крови). Возросшее содержание моноцитов в крови и сниженная концентрация клеток костного мозга коррелированы ($r = -0.7$), что было отмечено у полевки и в градиенте загрязнения среды. При неразличимой концентрации лейкоцитов у облученных полевки с участков **К** и **I** существенно ниже активность системы пероксидаза–эндогенная перекись водорода лейкоцитов у особей с участка **I**, что обусловлено уменьшением содержания наиболее активных клеток (**A** и **B**, $p < 0.03$). Не различима ($p > 0.05$) ввиду большой дисперсии концентрация тромбоцитов, но несколько возрос их объем (табл. 2). Можно полагать, что наблюдаемые изменения на уровне клеток отражают ответную реакцию кроветворной ткани. В литературе показано, что дифференцированная клетка адаптироваться к изменениям среды не может и свои функции выполняет за счет компенсаторных процессов органа [3]. Действительно, у облученных особей с участка **I** существенно ниже масса, индекс селезенки, концентрация клеток в костном мозге и селезенке, значительно меньше ретикулоцитов в крови ($p < 0.0001$). Для наглядности и сравнения реакции на облучение приведена концентрация ретикулоцитов интактных и облученных особей красной полевки с участков **К** и **I** (рис. 5). Разнонаправленный ход кривых отражает, на наш взгляд, кроветворную потенцию костного мозга и селезенки, как видно, значительно

Таблица 2. Средние значения показателей облученных (**KD, ID**) и необлученных (**K, I**) особей красной полевки с участков **K** и **I** по данным дисперсионного анализа

Показатель	Результаты дисперсионного анализа		Варианты опыта				<i>p</i> < 0.05	
	<i>MS</i> _{ост}	<i>F</i> _{3,19}	KD (1)	ID (2)	K (3)	I (4)		
Масса тела, г	17.018	0.231	22.53	20.50	19.85	21.04		
Масса селезенки, мг	1530.4	15.198*	202.67	36.00	111.00	51.11	1–2.3; 3–4**	
Индекс селезенки	1.774	25.348*	9.02	1.79	5.67	2.55	1–2.3; 3–4	
Спленоциты, млн/мг селезенки	0.134	8.406*	0.38	0.31	1.17	1.08	1–3; 2–4	
Спленоциты, млн/селезенки	984.878	9.637*	75.58	12.14	133.00	52.71	1–2.3; 4–2.3	
Костный мозг, млн/бедро	8.570	43.052*	8.73	4.04	25.85	15.89	1–2.3; 4–2.3	
Костный мозг, млн/бедро/г массы тела	0.024	41.949*	0.42	0.20	1.31	0.83	1–2.3; 4–2.3	
Ретикулоциты, %	0.457	11.270*	2.65	0.08	1.18	1.02	1–2.3; 2–4	
Эритроциты, млн/мкл	1.774	3.865*	7.52	8.58	10.14	10.08	1–3; 2–4	
Эритроциты, млн/мкл/г массы тела	0.019	0.935	0.36	0.43	0.51	0.50		
MCV, мкм ³	6.333	2.996**	45.84	41.14	44.10	42.03	1–2;	
MCH, пг	1.125	1.676	15.09	14.41	15.52	15.47	2–4	
MCHC, %	9.036	1.268	33.04	35.19	35.24	36.80		
RDW _{CV} , %	2.684	1.081	19.93	18.04	19.12	18.50		
RDW _{SD}	30.112	2.022	37.76	29.16	33.99	30.82	1–2	
Hb, г%	12.521	2.731**	11.39	11.47	15.89	15.63	2–4	
HT, %	32.551	3.689*	34.48	35.14	44.54	42.41	1–3**; 2–4	
Лейкоциты, тыс./мкл	3.532	1.098	2.71	2.35	4.69	3.46		
Нейтрофилы (N), %	48.350	4.299*	27.33	20.26	9.50	13.59	1–3; 2–4**	
Метамиелоциты, %	0.115	1.835	0.00	0.26	0.50	0.00	3–4;	
Палочкоядерные, %	6.412	3.577*	8.67	3.92	3.50	3.30	1–2.3	
Сегментоядерные, %	42.665	2.801**	18.67	16.08	5.50	10.30	1–3; 2–4**	
Эозинофилы, %	1.251	0.445	0.33	0.69	0.00	0.89		
Моноциты, %	19.154	0.386	2.00	4.28	5.00	5.07		
Базофилы, %	0.138	0.482	0.00	0.19	0.00	0.00		
Лимфоциты (L), %	68.026	1.989	69.67	75.00	85.50	79.67	1–3;	
L/N	14.748	2.445**	2.84	4.05	9.20	7.66	1–3**; 2–4**	
Гранулоциты (Abacus), тыс./мкл	0.666	0.295	1.16	0.71	0.81	0.97		
Гранулоциты (Abacus), %	131.205	2.008	41.44	26.95	19.75	24.40	1–2.3	
Лимфоциты (Abacus), тыс./мкл	1.218	3.280*	1.33	1.44	3.77	2.42	1–3; 2–4**	
Лимфоциты (Abacus), %	119.481	3.865*	50.63	65.13	77.40	73.13	1–2.3	
Моноциты (Abacus), тыс./мкл	0.030	1.121	0.21	0.21	0.11	0.07		
Моноциты (Abacus), %	9.580	5.807*	7.92	7.93	2.85	2.47	1–3*; 2–4	
Тромбоциты (Abacus), тыс./мкл	19455	0.424	340.70	252.55	232.61	296.44		
MPV, мкм ³	0.414	0.581	5.30	5.46	4.86	5.19		
Лейкоциты с активностью системы пероксидаза-эндогенная перекись	A 100%	136.492	1.186	21.00	7.46	4.33	9.68	1–2**
	B > 50%	111.263	3.632*	23.00	7.15	24.79	20.78	1–2; 2–4
	C < 50%	79.487	0.640	15.56	8.54	9.03	12.79	
	Общая К, %	290.225	4.131*	59.56	23.19	38.15	43.24	1–2; 2–4
Число животных	23		3	9	2	9		

сниженную у животных, обитающих в условиях загрязненной среды.

Таким образом, с помощью искусственно созданной стрессовой нагрузки выявлены откло-

нения в составе, структуре и активности клеток крови, отражающие кроветворную функцию, компенсаторные возможности которой с загрязненных территорий существенно снижены, что показано на примере красной полевки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование комплекса показателей системы крови у полевок, обитающих в условиях хронического химического загрязнения среды и в эксперименте с облучением, позволило выявить изменчивость количественных, качественно-структурных и функциональных параметров клеток крови и кроветворных органов, выявить особенности ответной реакции двух видов полевок к условиям измененной среды. Изменяющиеся показатели крови, а также проявляющие тенденцию к изменению у полевок с участков **В** можно рассматривать как реакцию стимуляции на раздражитель и проявление защитно-приспособительных реакций к условиям измененной среды. У полевок с участка **I** поддержание концентрации эритроцитов и гемоглобина в крови, и в меньшей мере лейкоцитов, осуществляется за счет напряжения кроветворной функции и неполноценности компенсаторной способности, что экспериментально подтверждено в нагрузочном тесте на примере красной полевки. Мобилизация пролиферативной активности и внутренних резервов не обеспечивает противостояние организма стрессовым воздействиям, что свидетельствует о негативном влиянии на организм условий измененной среды, снижающих устойчивость к действию других дополнительных факторов природного или антропогенного характера. С этих позиций вполне объяснима повышенная смертность животных, обитающих в зоне действия СУМЗа [13. 16]. Выявленные изменения параметров системы крови, как и имеющие тенденцию к изменению, скорее всего отражают токсическое действие поллютантов (в том числе токсичного кадмия), среднесуточное поступление с пищей которых на загрязненных участках превышает фоновые значения [15. 17]. Экспериментально доказано, что кадмий оказывает влияние на клетки крови как прямое, так и опосредованное через кроветворение [21].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-04-01657а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Безель В.С.* Популяционная экотоксикология млекопитающих. М.: Наука, 1987. 129 с.
2. *Безель В.С.* Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты. Екатеринбург: Голицкий, 2006. 280 с.
3. *Воложин А.И., Субботин Ю.К.* Адаптация и компенсация – универсальный биологический механизм приспособления. М.: Медицина, 1987. 176 с.
4. *Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
5. *Григоркина Е.Б.* Радиационная биология. Радиэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 245.
6. *Громов И.М., Ербаева М.А.* Млекопитающие фауны России и сопредельных территорий. Зайцеобразные и грызуны. СПб.: Зоол. ин-т, 1995. 522 с.
7. *Донник И.М., Шкуратова И.А., Шушарин А.Д., Верещак Н.А., Бейкин Я.Б.* // Ветеринария. 2007. № 6. С. 38.
8. *Ковальчук Л.А.* Эколого-физиологические аспекты адаптации к условиям техногенных экосистем. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 215 с.
9. *Козинец Г.И., Высоцкий В.В., Захаров В.В., Оприщенко С.А., Погорелов В.М.* Кровь и экология. М.: Практическая медицина, 2007. 432 с.
10. *Комаровская М.Е., Дрык С.И., Кривенко С.М., Карканица Л.В.* // Радиобиология. 1993. Т. 33. № 1. С. 88.
11. *Кохонов Е.В.* Содержание и особенности накопления химических элементов в организме мелких млекопитающих юга Западной Сибири: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск: Том. гос. ун-т, 2005. 19 с.
12. *Машнева Н.И., Родионова Л.Ф., Сукальская С.Я.* Сравнительная оценка радиационного и химического факторов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 187 с.
13. *Мухачева С.В., Безель В.С.* // Экология. 1995. № 3. С. 237.
14. *Мухачева С.В., Лукьянов О.А.* // Экология. 1997. № 1. С. 34.
15. *Мухачева С.В.* // Сиб. экол. журн. 2005. № 3. С. 523.
16. *Мухачева С.В.* // Экология. 2007. № 3. С. 178.
17. *Мухачева С.В.* // Экологическая безопасность горнопромышленных регионов: материалы 1-го Урал. междунар. экол. конгр. Екатеринбург, 2007. Т. 2. С. 22.
18. *Муштакова В., Фомина В.А., Роговин В.В.* // Изв. РАН. Сер. биол. 2005. № 3. С. 336.
19. *Постишил М., Ваха И.* Индивидуальная радиочувствительность, ее механизмы и проявления. М.: Энергоатомиздат, 1986. 112 с.
20. *Роговин В.В., Бут П.Г.* Способ определения активности системы пероксидаза-эндогенный пероксид водорода в лейкоцитах крови на мазках: Патент РФ № 2022241 С1 от 30.10.1994 в регистрации государственных патентов.

21. Тугарев А.А. Влияние кадмия на морфофункциональные характеристики эритроцитов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Моск. пед. гос. ун-т, 2003. 20 с.
22. Ягунов А.С., Токалов С.В., Потявина Е.В., Чухловин А.Б., Киселева Л.Н., Карташев А.В. // Радиационная биология. Радиозэкология. 2006. Т. 46. № 1. С. 23.
23. Leffler P., Nyholm N.E. // *Ambio*. 1996. V. 25. N 3. P. 417.
24. Rogival D., Scleeirs J., Wim De Coen, Verllagen R. and Blust R. // *Env. Tox. and Chem.* 2006. V. 25. N 1. P. 149.

Response of Blood System in Forest Voles to Stress under Chronic Chemical Pollution of the Environment

E. A. Tarakhtii, S. V. Mukhacheva

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

Some quantitative and structural-functional parameters of the blood system in redbacked and bank voles under conditions of chemical pollution of the environment were studied. Variation of blood parameters and hemopoietic organs related to the species and distance from the pollution source was found. Some stress of the hemopoietic function and imperfect morphofunctional state of blood cells were revealed under additional loads on animal organism in disturbed territories.