

Научная статья/Research Article

УДК 619:591.11[:636.2]

DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-170-180

Арина Сергеевна Федотова¹, Александр Алексеевич Жигарев^{2✉},

Галина Владимировна Макарская³

^{1,2}Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

³Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

¹krasfas@mail.ru

²Zhigarev98@mail.ru

³makgalvla@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОЗ ТРИТИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ВЕНОЗНОЙ КРОВИ КРОЛИКОВ

Цель исследования – определение степени воздействия низких доз трития на фагоцитарную активность клеток крови, гематологические параметры и образование свободных кислородных радикалов в венозной крови кроликов. Приведены литературный обзор по оценке низкодозового воздействия радиации на постоянство внутренней среды живого организма; радиоэкологическая характеристика и миграционная активность трития в объектах атмосферы, гидросферы, литосферы; данные о распределении трития в организме животных, его воздействие на морфологическом, молекулярном и генетическом уровнях. Изучена степень изменения гематологических величин, фагоцитарного индекса и хемилюминесцентных показателей венозной крови при поглощенных дозах: 30 мГр, 60 и 90 мГр. Исследования были выполнены на кафедре Института прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины, научно-исследовательском испытательном центре ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ и в международном научном центре исследований экстремальных состояний организма Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН». Определено, что в периферической крови кроликов при действии трития в дозах: 30 мГр, 60 и 90 мГр убывала фагоцитарная активность лейкоцитов. Хемилюминесцентная кинетика спонтанной и антигенактивированной генерации люцигенинзависимых радикалов клетками венозной крови кроликов характеризовалась одним максимумом. Максимальная интенсивность пиков спонтанной генерации первичных АФК при воздействии ³H в дозе 30 мГр, 60 и 90 мГр возрастает. При действии малых доз ³H в периферической крови кроликов увеличивается суммарное количество спонтанных и активированных первичных радикалов. При спонтанной продукции первичных радикалов установлена прямая зависимость «доза–эффект».

Ключевые слова: тритий, малые дозы, гематологические параметры, венозная кровь, кролики, поглощенная доза, первичные радикалы кислорода

Для цитирования: Влияние малых доз трития на показатели венозной крови кроликов / А.С. Федотова [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2024. № 2. С. 170–180. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-170-180.

Благодарности: эксперимент реализован за счет гранта Российского научного фонда, проект № 23-26-10018, Красноярского краевого фонда науки «Прогнозирование реакции сельскохозяйственных животных на низкоинтенсивную радиацию и применение радиопротекторов. Экспрессный биолюминесцентный скрининг радиобиологических эффектов».

Arina Sergeevna Fedotova¹, Alexander Alekseevich Zhigarev²✉, Galina Vladimirovna Makarskaya³

^{1,2}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

³Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center of the SB of the RAS", Krasnoyarsk, Russia

¹krasfas@mail.ru

²Zhigarev98@mail.ru

³makgalvla@yandex.ru

TRITIUM SMALL DOSES INFLUENCE ON THE RABBITS' VENOUS BLOOD PARAMETERS

The purpose of the study is to determine the degree of impact of low doses of tritium on the phagocytic activity of blood cells, hematological parameters and the formation of free oxygen radicals in the venous blood of rabbits. A literature review is provided to assess the low-dose effects of radiation on the constancy of the internal environment of a living organism; radioecological characteristics and migration activity of tritium in objects of the atmosphere, hydrosphere, lithosphere; data on the distribution of tritium in the body of animals, its effects at the morphological, molecular and genetic levels. The degree of change in hematological values, phagocytic index and chemiluminescent parameters of venous blood was studied at absorbed doses: 30 mGy, 60 and 90 mGy. Research was carried out at the department of the Institute of Applied Biotechnology and Veterinary Medicine, the research testing center of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Krasnoyarsk State Agrarian University and at the international scientific center for studying extreme states of the body of the Federal Research Center "Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS". It was determined that in the peripheral blood of rabbits, under the influence of tritium in doses of 30 mGy, 60 and 90 mGy, the phagocytic activity of leukocytes decreased. The chemiluminescent kinetics of spontaneous and antigen-activated generation of lucigenin-dependent radicals by venous blood cells of rabbits was characterized by one maximum. The maximum intensity of peaks of spontaneous generation of primary ROS when exposed to ³H at doses of 30 mGy, 60 and 90 mGy increases. When exposed to small doses of ³H in the peripheral blood of rabbits, the total number of spontaneous and activated primary radicals increases. With the spontaneous production of primary radicals, a direct dose–effect relationship has been established.

Keywords: tritium, small doses, hematological parameters, venous blood, rabbits, absorbed dose, primary oxygen radicals

For citation: Tritium small doses influence on the rabbits' venous blood parameters / Fedotova A.S. [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2024;(2): 170–180 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-2-170-180.

Acknowledgments: the experiment was realized by the grant of the Russian Science Foundation, project № 23-26-10018, Krasnoyarsk Regional Science Foundation "Predicting the response of farm animals to low-intensity radiation and the use of radioprotectors. Express bioluminescent screening of radiobiological effects".

Введение. Увеличение количества атомных электростанций приводит к повышению выбросов трития (³H) в биосферу, что увеличивает дополнительную радиационную нагрузку на биологические объекты [1]. Согласно информации НКДАР ООН (1988 г.) ³H отнесен к числу семи особо опасных радионуклидов, таких как ¹³⁷Cs, ¹⁴C, ³²P, ²²⁶Ra, ²³⁹Pu, ²¹⁴Am [2].

В ядерном реакторе тритий образуется в результате тройного деления урана. Базовый выброс ³H от ВВЭР-1000 в атмосферу составляет 0,6 Ки/сут. ³H относится к радиоактивным элементам, распространяющимся по всему миру и

оказывающим глобальное влияние на состояние атмосферы и гидросферы. За последнее десятилетие работы предприятий ядерно-топливного цикла за счет выбросов ³H произошло увеличение среднемировых индивидуальных доз облучения в 4 раза, за счет сбросов в гидросферу в 7 раз. Годовая доза от штатного выброса ³H и ¹⁴C атомными электростанциями в России для критической группы населения варьирует от 0,015 до 2,3 мкЗв, однако это ниже нормируемых значений эффективной дозы [3].

Международное агентство по атомной энергии в докладе «IAEA comprehensive report on the safety review of the Alps-treated water at the Fukushima daiichi nuclear power station» провело проверку и разрешило сброс очищенной воды с «Фукусима-1». В соответствии с Основной политикой, опубликованной правительством Японии в апреле 2021 г., ТЕРСО провела REIA3 для сброса очищенной воды ALPS. Были проведены оценки доз для населения, а также для флоры и фауны. Япония 24 августа 2023 г. начала сброс вод аварийного охлаждения реакторов «Фукусима-1». Воды сброса на станции «Фукусима-1» подвергнуты тщательной очистке и разбавлению морской водой, однако в воде регистрировался ^3H [8].

^3H – изотоп водорода, имеющий радиоактивное происхождение, распад ^3H происходит с β -излучением, обладающим довольно низкой энергией, период полураспада ($T_{1/2}$) 12,34 года. Из-за циркуляции воды в почве происходит изменение поведения ^3H в почве. В виде H_2O и других соединений ^3H включается в различные реакции, свойственные биогеохимическому циклу водорода, например в процессы почвообразования, генерации биоорганического вещества и др. При попадании внутрь организма сравнительно равномерно распространяется по всем органам и тканям. Радионуклид обладает высокой миграционной активностью, в мягких тканях задерживается в минимальных количествах (не более 1 %), депонируется в костной ткани. За счет накопления в костях ^3H активно воздействует на костную ткань и красный костный мозг. ^3H значится как наиболее токсичный радионуклид из-за своего политропного воздействия в органах и тканях в сравнении с остальными гамма- и бета-активными изотопами: ^{137}Cs и ^{106}Ru . Радионуклид характеризуется мутагенным действием, порождающим изменение ДНК во всех клетках [5]. Относительная биологическая эффективность органических соединений ^3H значительно выше, чем в окиси ^3H и газовой форме [4].

Воздействие ионизирующего излучения на молекулы воды в клетках организма приводит к образованию повышенного количества активных форм кислорода (АФК). В дальнейшем образованные свободные радикалы активизируют ядерный фактор каппа В (NF- κ B), который регу-

лирует экспрессию значительного количества генов-мишеней, принимающих участие в иммунных и воспалительных процессах. При хроническом воспалительном процессе радиация стимулирует канцерогенез, переход из доброкачественных образований в злокачественные, ускоренный рост опухоли, внедрение в ткани и распространение метастазов. В значительных дозах радиация регулирует иммунную систему, в результате происходит торможение роста злокачественных образований. Кишечник чувствителен к воздействию радиации, хотя и имеет столбчатый эпителий, который образует плотный барьер, при разрушении которого происходит активация иммунной системы кишечника. Veeraraghava с соавт. наблюдали активацию NF- κ B в кишечнике свиней после воздействия 10–50 кГр γ -излучения, что стимулировало повышающую регуляцию нескольких генов. Сверхэкспрессия гена IFN- γ в этом исследовании предполагала индуцирование адаптивного ответа против излучения LD/LDR в тонком кишечнике свиней [5].

Л.Г. Бондарева в 2021 г. выяснила, что в воде р. Енисей и воде системы питьевого водоснабжения населенных пунктов Красноярского края удельная активность ^3H соответствовала фоновым значениям – 2–6 Бк/л [2]. Л.Г. Бондарева сравнила биологическое влияние тритиевой воды и внешнего гамма-излучения. Автором установлено, что при разовом или хроническом поступлении тритиевой воды в организм животных в клетках возникают более значимые структурные и функциональные изменения ДНК, чем при воздействии эквивалентного по дозе γ -излучения. В молекулах эффект от воздействия тритиевой воды, скорее всего, определяется способностью клеток к репарации ДНК. В клетках тканей в случае невозможности восстановления ДНК возникают структурные изменения, которые приводят к гибели большого количества клеток, изменению функции тканей, что нарушает гомеостаз организма и потенцирует развитие патологического процесса [6].

С. Адам-Гильермин (2006) с соавт. в работе по оценке степени генотоксических, репротоксических явлений в организме гидробионтов при воздействии внешнего гамма-излучения и ^3H пришли к заключению, что беспозвоночные организмы наиболее чувствительны к воздей-

вию ^3H , чем позвоночные. Поскольку несколько рассчитанных конечных точек реагирования на дозу (EDR (10)) в десять раз ниже фоновых уровней γ -облучения. Результаты исследований ставят под сомнение адекватность контрольного значения 0,24 мГр/сут для водных экосистем, рекомендованного Garnier-Laplaceetal [7].

Л.В. Тимофеев с соавт. с помощью аппроксимационного выражения функции влияния точечного источника установили коэффициенты мощности поглощения дозы в отношении концентрации органических соединений ^3H (на примере ^3H -тимидина), применяемых исключительно в ядре клетки (1,8 мГр·расп-1), а также для случая равномерного распределения $^3\text{H}_2\text{O}$ в клетке ($3,5 \cdot 10^{-3}$ мГр·расп-1). Авторы достигли согласия значений поглощенной дозы с ранее полученными данными, посвященными изучению влияния излучения ^3H на ДНК клетки [7].

Таким образом, определение степени низкодозового воздействия ^3H на многоклеточный организм является одной из значимых проблем радиозологии и радиобиологии настоящего времени.

Цель исследования – оценить влияние поглощенных доз трития (16 мГр, 31 и 47 мГр) на гематологические, хемилюминесцентные показатели и фагоцитарную активность венозной крови кроликов.

Задачи: определить фагоцитарную активность, гематологические показатели при воздействии тритиевой воды; характеристики хемилюминесцентной реакции периферической крови при генерации первичных радикалов: время формирования пика спонтанной и активированной хемилюминесцентной реакции, амплитуду максимума генерации, суммарную продукцию спонтанного и активированного образования первичных АФК.

Объекты и методы. Эксперимент проведен в 2023 г. на кафедре внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии сельскохозяйственных животных Института прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины, в научно-исследовательском информационном центре ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» и в Центре медико-биологических исследований «Исследование экстремальных состояний организма» Федерального исследовательского центра «КНЦ СО РАН».

Работа была выполнена на кроликах калифорнийской породы в возрасте 7 месяцев, созданы три опытные группы, состоящие из 10 животных в каждой группе, и контрольная группа (15 голов). В течение 15 дней животные из опытных групп получали тритиевую воду, в результате в опытных группах были сформированы поглощенные дозы: 16 мГр, 31 и 47 мГр. Контрольная группа животных получала воду из централизованной системы водоснабжения г. Красноярска. Рацион кормления и система содержания кроликов всех групп не отличались. Кролики содержались в индивидуальных клетках в условиях зоофермы ИПБиВМ ФГБОУ ВО «Красноярский ГАУ». У кроликов всех групп в утренние часы на 7-й и 15-й день исследования отбирались образцы крови из краевой ушной вены в вакуумные пробирки с добавлением натрия гепарина, всего изучено 90 образцов венозной крови.

Фагоцитарная активность лейкоцитов крови определялась путем введения в пробы крови *in vitro* частиц латекса, опсонизированных белками пуловой сыворотки кроликов, при окраске генцианвиолетом. Оценивали активность фагоцитов микроскопией (увеличение $\times 40$) в камере Горяева, подсчитывали 100 фагоцитов. Подсчет количества лейкоцитов, эритроцитов проводили микроскопически в камере Горяева. Уровень гемоглобина оценивали унифицированным гемиглобинцианидным методом с применением «Гемоглобин-Ольвекс» на спектрофотометре ПЭ-5400УФ.

Определение функционального состояния клеток венозной крови кроликов устанавливалось хемилюминесцентным методом, в работе оценивали кинетику спонтанного, активированного частицами латекса образования первичных радикалов кислорода на 36-канальном аппаратно-программном комплексе «Хемилюминометр 3604-ПЭВМ» (СКТБ «Наука» СО РАН). Запись хемилюминесцентных кривых осуществлялась за 90 минут при температуре 38 °С. В качестве хемилюминесцентного зонда использовался люцигенин, обладающий селективностью к первичным радикалам кислорода. Определялись хемилюминесцентные данные: амплитуда максимальной активности (I_{max} , имп./с), время достижения максимума (T_{max} , мин), светосумма (S , имп. за 90 мин) и индекс активации

(IA = Sакт/Сспонт, усл.ед.) первичных радикалов кислорода. Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программы MS Excel методом вариационной статистики и оценки t-критерия Стьюдента, различия результатов считали статистически значимыми при $P \leq 0,05$ [9].

Результаты и их обсуждение. В венозной крови кроликов при воздействии малых доз ^3H достоверно ($P \leq 0,05$) увеличивалось количество лейкоцитов, при поглощенной дозе в 16 мкГр количество возрастало в 1,3 раза, при дозе

31 мкГр в 1,6 раза и при дозе 47 мкГр в 1,5 раза относительно контроля. В работе установлено, что в периферической крови кроликов при малых поглощенных дозах 31 и 47 мкГр увеличивалось количество эритроцитов в 1,3 раза по отношению к контролю (табл. 1). Однако содержание лейкоцитов и эритроцитов в периферической крови в опытных группах находилось в диапазоне референсных значений. Увеличение количества лейкоцитов и эритроцитов происходит благодаря активации гемопоэза в результате действия малых доз ^3H .

Таблица 1

Гематологические показатели при воздействии малых поглощенных доз

Поглощенная доза	Лейкоциты, $10^9/\text{л}$	Гемоглобин, г/л	Эритроциты, $10^{12}/\text{л}$
Контроль	$5,81 \pm 1,65$	$134,52 \pm 1,86$	$4,78 \pm 0,25$
16 мкГр	$7,68 \pm 1,35^*$	$118,17 \pm 9,30$	$6,52 \pm 0,81$
31 мкГр	$9,06 \pm 0,71^*$	$128,42 \pm 5,97$	$6,25 \pm 0,28^{**}$
47 мкГр	$8,76 \pm 0,68^*$	$149,30 \pm 10,74$	$6,51 \pm 0,88^{***}$
Референсные значения [10]	5,9–9,0	100–125	5–7,5

* $P \leq 0,05$, ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$ по отношению к контролю.

Используя иммунологический метод, установили, что при воздействии ^3H на организм кроликов в малых поглощенных дозах (16 мкГр, 31 и 47 мкГр) снижается фагоцитарная активность лейкоцитов в 1,8 раза относительно контрольных значений. Снижение фагоцитарной активности клеток крови является негативным факто-

ром и свидетельствует об ослаблении иммунобиологической активности организма (рис. 1).

Хемилюминесцентная кинетика спонтанной (рис. 2) и антигенактивированной (рис. 3) генерации люцигенинзависимых радикалов клетками венозной крови кроликов характеризовалась одним максимумом и имела специфические особенности при субклинических дозах ^3H .

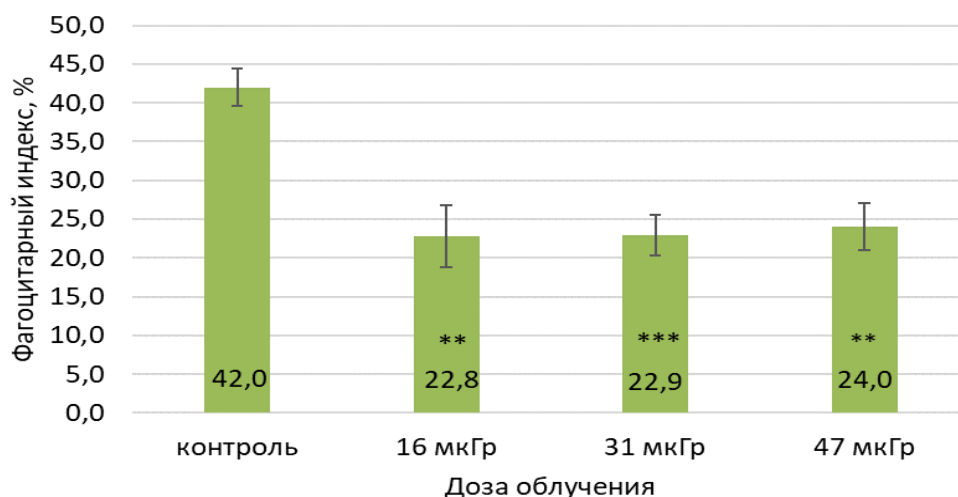


Рис. 1. Фагоцитарная активность лейкоцитов венозной крови кроликов при низкодозовом воздействии ^3H : ** $P \leq 0,01$, *** $P \leq 0,001$ по отношению к контролю

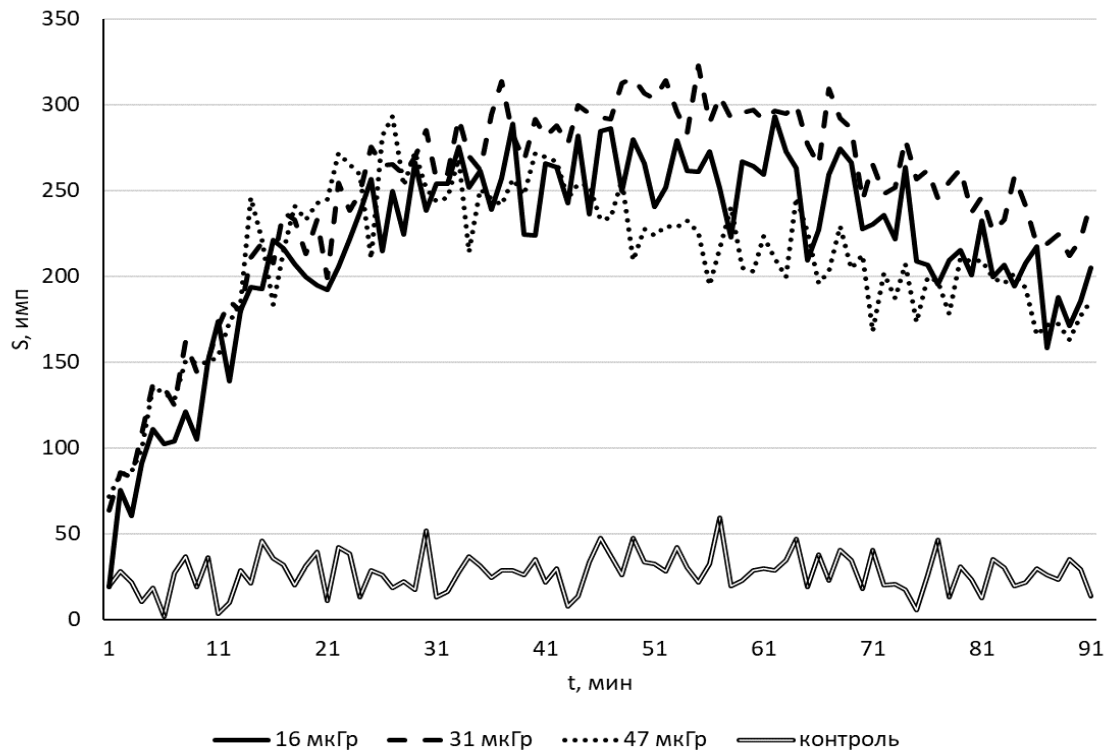


Рис. 2. Кинетика спонтанной продукции первичных радикалов кислорода

Кинетика спонтанной генерации люцигенин-зависимых радикалов при воздействии малых доз ^3H характеризовалась большей интенсивностью (рис. 2), графики, отражающие кинетику

продукции первичных АФК, находились в диапазоне 150–300 имп/мин. Тогда как кинетика генерации первичных радикалов контрольной группы была сосредоточена в диапазоне 3–110 имп/мин.

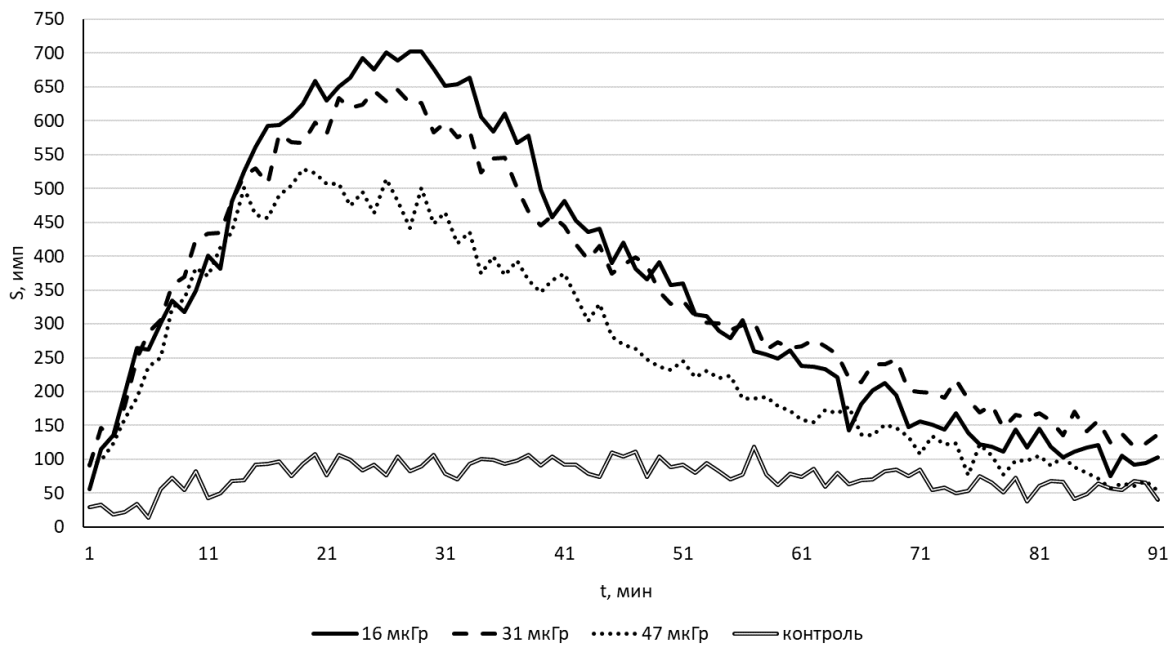


Рис. 3. Кинетика антигенактивированной продукции первичных радикалов кислорода

На графическом изображении кинетики активированной продукции первичных АФК выявлено существенное различие в продукции радикалов в крови при воздействии малых поглощенных доз (16 мкГр, 31 и 47 мкГр) по сравнению с контрольными значениями. При малых дозах ионизирующего излучения активация клеток крови латексными частицами потенцировала кинетику генерации первичных АФК, пики генерации АФК находились в диапазоне 500–700 имп/мин. В то же время в контрольной группе кинетика генерации не имела выраженного пика и принадлежала диапазону от 10 до 110 имп/мин.

Время достижения максимума генерации при спонтанном образовании первичных АФК при дозах 31 и 47 мкГр не отличалось от контроля и в среднем регистрировалось на 49,9 мин (табл. 2). Однако при дозе 16 мкГр установлено достоверное замедление формирования пика спонтанной генерации первичных АФК в 1,4 раза ($P \leq 0,05$). При антигенной активации латексными частицами выход кинетики генерации люцигенинзависимых АФК на максимум в опытных группах не отличался от контроля и регистрировался к 31,2 мин.

Таблица 2

Время формирования пиков генерации первичных АФК

Поглощенная доза	ХЛ реакция	T max, мин
Контроль	Спонтанная	46,46±5,5
	Активированная	37,69±2,41
16 мкГр	Спонтанная	65,5±4,6*
	Активированная	34,7±5,3
31 мкГр	Спонтанная	43,7±5,43
	Активированная	30,6±4,25
47 мкГр	Спонтанная	43,8±11,25
	Активированная	21,8±1,32***

* $P \leq 0,05$, *** $P \leq 0,001$ по отношению к контролю.

В работе оценили максимальную интенсивность – амплитуду максимума генерации первичных радикалов (рис. 4). При воздействии малых доз ³H максимальная интенсивность пика при спонтанной продукции достоверно превы-

шала значения контроля. При дозе 16 мкГр амплитуда максимума в 3,7 раза ($P \leq 0,05$), при дозе в 31 мкГр в 3,6 раза ($P \leq 0,01$) и при поглощенной дозе 47 мкГр в 4,7 раза ($P \leq 0,001$) превышала значение контрольной группы.

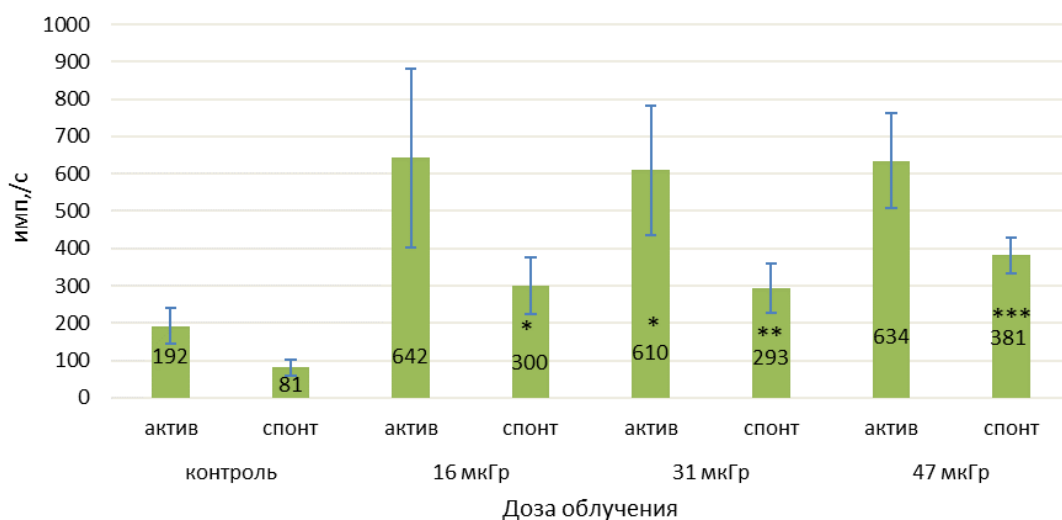


Рис. 4. Амплитуда максимума генерации первичных АФК клетками крови: * $P \leq 0,05$, ** $P \leq 0,01$, *** $P \leq 0,001$ по отношению к контролю

При введении латекса во всех пробах достоверно увеличивалась максимальная интенсивность пика генерации АФК относительно спонтанной генерации, однако наиболее ярко этот процесс регистрировался при действии малых доз ^3H . При поглощенной дозе 31 мкГр установлено увеличение амплитуды максимума активированной продукции первичных АФК в 3,2 раза в сравнении с контролем ($P \leq 0,05$). При поглощенных дозах 16 и 47 мкГр максимальная интенсивность хемилюминесцентной реакции находилась в диапазоне значений контроля и статистически не отличалась.

При действии малых доз ^3H выявлено увеличение суммарной продукции АФК при спонтанной и активированной генерации (рис. 5). Суммарное количество спонтанно образующихся первичных радикалов при дозе 16 мкГр в 3,7 раза ($P \leq 0,05$), при дозе 31 мкГр в 4 раза ($P \leq 0,01$), а при дозе 47 мкГр в 5 раз ($P \leq 0,001$) превышало данные контрольной группы. В увеличении количества АФК прослеживалась пря-

мая доза-зависимость, соответственно, можно заключить, что увеличение количества первичных спонтанно образующихся радикалов в крови обязано ^3H воздействием на организм. Увеличение числа спонтанных первичных радикалов может негативно отразиться на функциональной активности клеток крови и функциональном состоянии тканей и органов.

Активация частицами латекса достоверно увеличивает продукцию первичных радикалов (в сравнении со спонтанной генерацией) во всех группах. Однако наиболее ярко это регистрируется в опытных группах (рис. 5). В контрольной группе количество первичных радикалов при активации клеток крови латексом увеличилось на 0,4 млн/90 мин, тогда как при дозе 16 и 31 мкГр увеличение произошло на 0,9 млн/90 мин. Однако при дозе 47 мкГр наблюдалось снижение продукции АФК, увеличение регистрировалось всего на 0,4 млн/90 мин, что сопоставимо с генерацией АФК в контрольной группе.

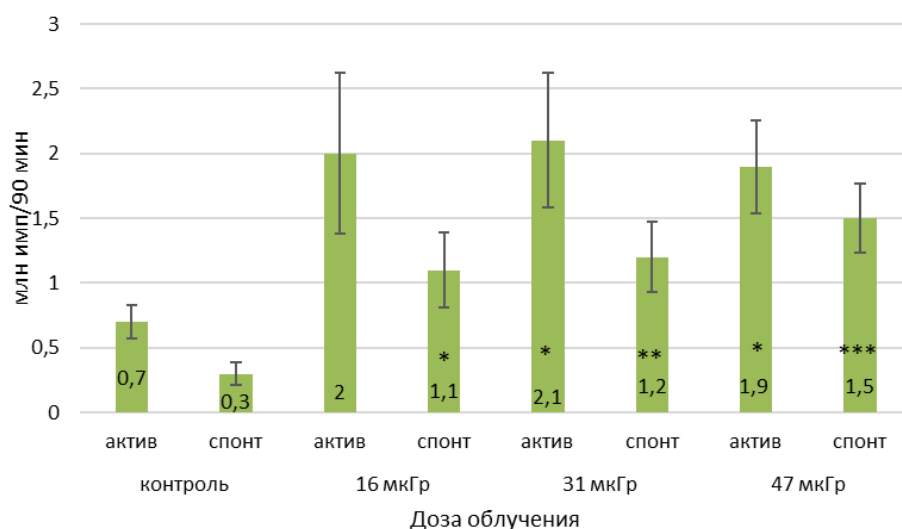


Рис. 5. Суммарная продукция первичных радикалов кислорода:
* $P \leq 0,05$; ** $P \leq 0,05$; *** $P \leq 0,001$ по отношению к контролю

При действии малых доз ^3H на организм кроликов в периферической крови образуется большое количество антигенактивированных первичных АФК. Суммарное количество антигенактивированных первичных радикалов при дозе 16 мкГр в 2,9 раза, при дозе 31 мкГр в 3 раза, а при дозе 47 мкГр в 2,7 раза превышало значение контроля ($P \leq 0,05$). В увеличении количества антигенактивированных АФК в крови животных не установлена прямая доза-зависимость.

Анализируя информацию, полученную из спонтанной и активированной генерации, рассчитано значение индекса активации. Интересно отметить, что значение индекса снижалось при субклинических дозах. При поглощенной дозе 16 мкГр индекс уменьшился на 34,6 % ($P \leq 0,05$), при дозе 47 мкГр на 50 % ($P \leq 0,001$) относительно данных контроля. При дозе 31 мкГр значение индекса активации находилось в диапазоне данных контрольной группы (рис. 6).

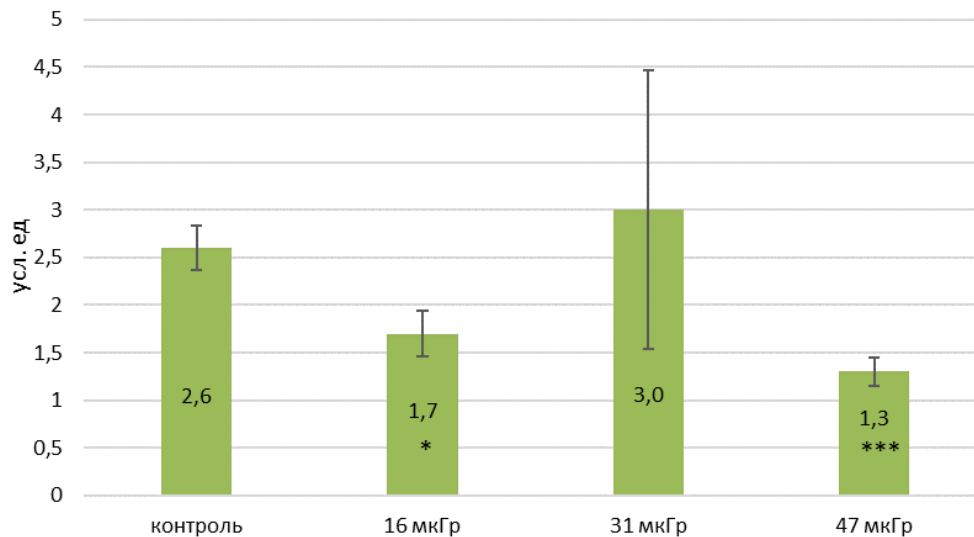


Рис. 6. Индекс активации хемилюминесцентной реакции:

* $P \leq 0,05$; *** $P \leq 0,001$ по отношению к контролю

Заключение. Низкодозовое воздействие *in vivo* изотопов ^3H на организм кроликов в дозах 16 мкГр, 47 мкГр ($P \leq 0,01$) и 31 мкГр ($P \leq 0,001$) снижало фагоцитарную активность лейкоцитов в 1,8 раза, что указывало на уменьшение неспецифической динамичности клеточных элементов крови при низких дозах радиации. Изотопы ^3H стимулировали гемопоэз, при дозах 16 мкГр, 31 и 47 мкГр возрастало число лейкоцитов ($P \leq 0,05$), установлено увеличение числа эритроцитов при воздействии поглощенных доз 31 мкГр ($P \leq 0,01$) и 47 мкГр ($P \leq 0,001$).

Ионизирующее излучение в дозе 16 мкГр достоверно увеличивает время формирования пика спонтанного образования первичных радикалов в 1,4 раза относительно контроля. При дозах 31 и 47 мкГр время формирования максимума при спонтанном образовании первичных радикалов отмечалось на 50-й минуте, при антигенной активации на 31-й. Установлено увеличение амплитуды максимальной интенсивности спонтанного образования первичных радикалов кислорода при субклинических дозах 16 мкГр ($P \leq 0,05$), 31 мкГр ($P \leq 0,01$) и 47 мкГр ($P \leq 0,001$). При дозе 31 мкГр выявлено увеличение максимальной интенсивности антигенактивированной продукции АФК ($P \leq 0,05$). Воздействие субклинических доз трития на организм кроликов потенцирует рост спонтанных и активированных первичных радикалов в периферической крови. Установлена прямая доза-

зависимость между значением поглощенной дозы и количеством первичных спонтанных АФК. Поглощенные дозы 16 мкГр ($P \leq 0,05$) и 47 мкГр ($P \leq 0,001$) снижают индекс активации хемилюминесцентной реакции крови, что является негативным фактором и указывает на снижение возможности клеток отвечать на антигенное воздействие формированием респираторного взрыва.

Список источников

1. Барчуков В.Г., Кочетко О.А. Формирование современных подходов к оценке радиационной безопасности трития и его соединений // Тез. докл. VIII съезда по радиационным исследованиям (Москва, 12–15 октября 2021 г.). М.: Объединенный институт ядерных исследований, 2021. С. 366.
2. Бондарева Л.Г. Потенциальные радиационные риски для населения Красноярского края при употреблении рыбы и воды, содержащих тритий // Тез. докл. VIII съезда по радиационным исследованиям (Москва, 12–15 октября 2021 г.). М.: Объединенный институт ядерных исследований, 2021. С. 368.
3. Облучение населения при поступлении H-3 и C-14 в атмосферу с выбросами российских АЭС / М.Е. Васянович [и др.] // Тез. докл. VIII съезда по радиационным исследованиям (Москва, 12–15 октября 2021 г.). М.:

- Объединенный институт ядерных исследований, 2021. С. 374.
4. The Effect of Radiation on the Immune System in Pigs Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident / *M. Morimoto* [et al.] // *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems*, Singapore, 11 November 2019 year. Singapore: Springer, 2019. P. 139–151.
 5. *Бондарева Л.Г.* Сравнение биологического действия трития в виде свободной тритиевой воды и внешнего облучения γ -излучением // *Медицинские и экологические эффекты ионизирующего излучения: мат-лы VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-лет. образов. филиала № 2 Государственного научного центра – Института биофизики (Томск, 21–22 марта 2023 г.)*. Томск: Офсет Центр, 2023. С. 68–69. EDN ECROQC.
 6. Genotoxic and reprotoxic effects of tritium and external gamma irradiation on aquatic animals / *T. Hinton* [et al.] // *Rev Environment ContamToxicol*, Saint-Paul-lez-Durance Cedex, 2012. Saint-Paul-lez-Durance Cedex, France, 2012. С. 103.
 7. Расчетный метод дозиметрии бета-излучения трития на клеточном уровне / *В. Тимофеев* [и др.] // *Тез. докл. VIII съезда по радиационным исследованиям (Москва, 12–15 октября 2021 г.)*. М.: Объединенный институт ядерных исследований, 2021. М.: Объединенный институт ядерных исследований, 2021. С. 288.
 8. *Grossi R.M.* IAEA comprehensive report on the safety review of the alps-treated water at the fukushimadaiichi nuclear power station // *International Atomic Energy Agency*, Vienna, Austria, April 2021. Vienna, 2021. P.140.
 9. *Федотова А.С., Жигарев А.А., Макарская Г.В.* Радиобиологические эффекты в периферической крови крупного рогатого скота при поглощенных дозах 4 и 5 мГр // *Ученые записки учреждения образования «Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины»*. 2022. Т. 58, № 3. С. 65–73.
 10. *Смолин С.Г.* Физиология системы крови: метод. указания. Краснояр. гос. аграр. ун-т, Красноярск, 2014. 50 с.
- ### References
1. *Barchukov V.G., Kochetko O.A.* Formirovanie sovremennykh podhodov k ocenke radiacionnoy bezopasnosti tritiya i ego soedinenij // *Tez. dokl. VIII s`ezda po radiacionnym issledovaniyam (Moskva, 12–15 oktyabrya 2021 g.)*. М.: Ob`edinennyj institut yadernyh issledovaniy, 2021. S. 366.
 2. *Bondareva L.G.* Potencial'nye radiacionnye riski dlya naseleniya Krasnoyarskogo kraya pri upotreblenii ryby i vody, sodержaschih tritij // *Tez. dokl. VIII s`ezda po radiacionnym issledovaniyam (Moskva, 12–15 oktyabrya 2021 g.)*. М.: Ob`edinennyj institut yadernyh issledovaniy, 2021. S. 368.
 3. Obluchenie naseleniya pri postuplenii H-3 i S-14 v atmosferu s vybrosami rossijskih A`ES / *M.E. Vasyanovich* [i dr.] // *Tez. dokl. VIII s`ezda po radiacionnym issledovaniyam (Moskva, 12–15 oktyabrya 2021 g.)*. М.: Ob`edinennyj institut yadernyh issledovaniy, 2021. S. 374.
 4. The Effect of Radiation on the Immune System in Pigs Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident / *M. Morimoto* [et al.] // *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems*, Singapore, 11 November 2019 year. Singapore: Springer, 2019. P. 139–151.
 5. *Bondareva L.G.* Sravnenie biologicheskogo dejstviya tritiya v vide svobodnoj tritievoj vody i vneshnego oblucheniya γ -izlucheniem // *Medicinskie i `ekologicheskie `effekty ioniziruyuschego izlucheniya: mat-ly VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyasch. 65-let. obrazov. filiala № 2 Gosudarstvennogo nauchnogo centra – Instituta biofiziki (Tomsk, 21–22 marta 2023 g.)*. Tomsk: Ofset Centr, 2023. S. 68–69. EDN ECROQC.
 6. Genotoxic and reprotoxic effects of tritium and external gamma irradiation on aquatic animals / *T. Hinton* [et al.] // *Rev Environment ContamToxicol*, Saint-Paul-lez-Durance Cedex, 2012. Saint-Paul-lez-Durance Cedex, France, 2012. S. 103.
 7. Raschetnyj metod dozimetrii beta-izlucheniya tritiya na kletochnom urovne / *V. Timofeev* [i dr.] // *VIII S`ezd po radiacionnym issledovaniyam: Tezisy dokladov*, Moskva, 12–15

- oktyabrya 2021 g.. M.: Ob`edinennyj institut yadernyh issledovaniy, 2021. S. 288.
8. *Grossi R.M.* IAEA comprehensive report on the safety review of the alps-treated water at the fukushimadaichi nuclear power station // International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, April 2021. Vienna, 2021. P.140.
 9. *Fedotova A.S., Zhigarev A.A., Makarskaya G.V.* Radiobiologicheskie `effekty v perifericheskoy krovi krupnogo rogatogo skota pri poglo-schennyh dozah 4 i 5 mGr // Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya "Vitebskaya ordena Znak pocheta gosudarstvennaya aka-demiya veterinarnoj mediciny". 2022. T. 58, № 3. S. 65–73.
 10. *Smolin S.G.* Fiziologiya sistemy krovi: metod. ukazaniya. Krasnoyar. gos. agrar. un-t. Kras-noyarsk, 2014. 50 s.

Статья принята к публикации 03.07.2023 / The article accepted for publication 03.07.2023.

Информация об авторах:

Арина Сергеевна Федотова¹, доцент кафедры внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии сельскохозяйственных животных, кандидат биологических наук, доцент
Александр Алексеевич Жигарев², аспирант кафедры внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии сельскохозяйственных животных, старший лаборант кафедры внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии сельскохозяйственных животных
Галина Владимировна Макарская³, старший научный сотрудник международного научного центра исследования экстремальных состояний организма, кандидат биологических наук

Information about the authors:

Arina Sergeevna Fedotova¹, Associate Professor at the Department of Internal Non-Contagious Diseases, Obstetrics and Physiology of Farm Animals, Candidate of Biological Sciences, Docent
Alexander Alekseevich Zhigarev², Postgraduate student at the Department of Internal Non-Contagious Diseases, Obstetrics and Physiology of Farm Animals, Senior Laboratory Assistant at the Department of Internal Non-Contagious Diseases, Obstetrics and Physiology of Farm Animals
Galina Vladimirovna Makarskaya³, Senior Researcher at the International Scientific Center for the Study of Extreme Conditions of the Body, Candidate of Biological Sciences

