

Арина Сергеевна Федотова^{1✉}, Евгения Геннадьевна Турицына²,

Галина Владимировна Макарская³

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

³ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН», Красноярск, Россия

¹krasfas@mail.ru

²turitsyna@mail.ru

³makgalvla@yandex.ru

ГЕНЕРАЦИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ КЛЕТКАМИ КРОВИ КОРОВ ПРИ СУБКЛИНИЧЕСКИХ ДОЗАХ РАДИАЦИИ

Цель исследования – оценить кинетику генерации АФК в периферической крови крупного рогатого скота при воздействии субклинических доз радиации. Задачи: определить хемилюминесцентные показатели: время достижения и амплитуду максимальной активности, общий объем АФК в периферической крови лактирующих коров в аграрных ландшафтах Красноярского края с различным радиоэкологическим статусом; рассчитать индекс активации фагоцитов крови. Объект исследования – лактирующие коровы, содержащиеся в трех аграрных ландшафтах Красноярского края, имеющих различный радиоэкологический статус: с поглощенной годовой дозой для сельскохозяйственных животных 0,92 мГр (контроль), с дозами 1,33 и 1,55 мГр/год. Материал исследования – периферическая кровь коров. Исследование проведено в 2017–2019 гг. в секторе иммунологии Международного научного центра исследований экстремальных состояний организма ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск) и в Институте прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ. В периферической крови лактирующих коров оценивали хемилюминесцентные показатели: время формирования максимумов продукции активных форм кислорода и амплитуду их генерации, общий объем АФК, индекс активации фагоцитов крови. Хемилюминесцентный анализ выполнен в секторе иммунологии международного научного центра исследований экстремальных состояний организма ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск). Субклинические дозы ионизирующего излучения 1,33 и 1,55 мГр/год негативно влияют на течение свободнорадикальных процессов в клетках крови коров. Выявлено торможение времени формирования пиков кинетики, увеличение суммарного количества спонтанных свободных радикалов и снижение светосуммы активированных АФК. Установлено падение индекса активации клеток, т. е. снижение способности фагоцитов крови к индукции респираторного взрыва в ответ на дополнительное антигенное раздражение, что относится к негативным последствиям воздействия малых доз ионизирующего облучения.

Ключевые слова: крупный рогатый скот, лактирующие коровы, ионизирующее излучение, субклинические дозы радиации, первичные радикалы, вторичные АФК, хемилюминесценция

Для цитирования: Федотова А.С., Турицына Е.Г., Макарская Г.В. Генерация свободных радикалов клетками крови коров при субклинических дозах радиации // Вестник КрасГАУ. 2024. № 7. С. 151–160. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-151-160.

Arina Sergeevna Fedotova^{1✉}, Evgenia Gennadievna Turitsyna², Galina Vladimirovna Makarskaya³

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

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

¹krasfas@mail.ru

²turitsyna@mail.ru

³makgalvla@yandex.ru

FREE RADICAL GENERATION BY COW BLOOD CELLS AT SUBCLINICAL RADIATION DOSES

The aim of the study is to evaluate the kinetics of ROS generation in the peripheral blood of cattle exposed to subclinical doses of radiation. Objectives: to determine chemiluminescent indices: time to reach and amplitude of maximum activity, total ROS volume in the peripheral blood of lactating cows in agricultural landscapes of the Krasnoyarsk Region with different radioecological status; to calculate the blood phagocyte activation index. The object of the study is lactating cows kept in three agricultural landscapes of the Krasnoyarsk Region with different radioecological status: with an absorbed annual dose for farm animals of 0.92 mGy (control), with doses of 1.33 and 1.55 mGy/year. Research material is peripheral blood of cows. The studies were conducted in 2017–2019 in the immunology sector of the international scientific center for research into extreme states of the body, Federal Research Center of the Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, and at the Institute of Applied Biotechnology and Veterinary Medicine, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Krasnoyarsk State Agrarian University. In the peripheral blood of lactating cows, the following chemiluminescent indices were assessed: the time of formation of peaks in the production of reactive oxygen species and the amplitude of their generation, the total volume of ROS, and the index of activation of blood phagocytes. The chemiluminescent analysis was performed in the immunology sector of the international scientific center for research into extreme conditions of the body, FRC KSC SB RAS (Krasnoyarsk). Subclinical doses of ionizing radiation of 1.33 and 1.55 mGy/year negatively affect the course of free-radical processes in the blood cells of cows. Slowdown in the formation time of kinetic peaks, an increase in the total number of spontaneous free radicals, and a decrease in the light sum of activated ROS were revealed. A decrease in the cell activation index was established, i.e. a decrease in the ability of blood phagocytes to induce a respiratory burst in response to additional antigenic irritation, which is related to the negative consequences of exposure to low doses of ionizing radiation.

Keywords: cattle, lactating cows, ionizing radiation, subclinical doses of radiation, primary radicals, secondary ROS, chemiluminescence

For citation: Fedotova A.S., Turitsyna E.G., Makarskaya G.V. Free radical generation by cow blood cells at subclinical radiation doses // Bulliten KrasSAU. 2024;(7): 151–160 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-151-160.

Введение. Прямое или косвенное воздействие ионизирующего излучения вызывает стресс в клетках тканей организма, что сопровождается усилением генерации активных форм кислорода (АФК), ведущей к повреждению ДНК субклеточных органелл, и потенцирует процесс аутофагии. Установлено, что процессы генерации АФК иммунокомпетентными клетками организма являются чувствительными к воздействию даже низкой концентрации радионуклидов и слабых доз ионизирующего излучения. М. Large с соавторами (2015) установили, что облучение в ма-

лых дозах (30–300 мГр) приводит к нелинейной экспрессии и активности основных соединений антиоксидантной системы [1]. D. Eckert с соавторами (2021) определили, что гамма воздействие *in vitro* в значениях 100–500 мГр индуцирует экспрессию антиоксидантных ферментов, это уменьшает содержание АФК в эндотелиальных клетках [2]. М.С. Абрамовой с соавторами (2020) установлено, что уровень АФК в культуре фибробластов, облученных *in vitro* в дозах 30; 100; 500 и 1000 мГр, возрастал пропорционально поглощенной дозе [3]. Японскими исследователями

М. Morimoto и др. (2020) в работе по оценке масштабов аварии на АЭС «Фукусима» отмечено увеличение содержания ^{137}Cs в мышечной ткани у свиней и повышения уровня АФК в периферической крови [4]. Корейскими учеными Е. Shin, S. Lee, H. Kang с соавторами (2020) определено, что ионизирующее излучение в дозе менее 500 мГр в культуре лейкоцитов модельных животных увеличивает количество АФК в периферических органах и мозге, вызывает окислительный стресс, подавляет иммунные механизмы [5]. В работах на лабораторных мышах с помощью ХЛ-реакции установлено увеличение количества вторичных АФК через 0,5 ч после воздействия рентгеновских лучей в дозе 100 мГр [6].

В связи с недостаточностью знаний о механизмах воздействия низкоинтенсивной радиации существуют трудности с прогнозированием результатов этих воздействий на многоклеточный организм. Исследование механизма воздействия малых доз радиоактивного излучения на организм сельскохозяйственных животных является перспективным фундаментальным и прикладным направлением научных исследований.

Цель исследования – оценить кинетику генерации АФК в периферической крови крупного рогатого скота при воздействии субклинических доз радиации.

Задачи: определить хемилюминесцентные показатели: время достижения и амплитуду максимальной активности, общий объем АФК в периферической крови лактирующих коров в аграрных ландшафтах Красноярского края с различным радиоэкологическим статусом; рассчитать индекс активации фагоцитов крови.

Объекты и методы. Исследование проведено в 2017–2019 гг. в секторе иммунологии Международного научного центра исследований экстремальных состояний организма ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск) и в Институте прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ.

Объектами исследования являлись лактирующие коровы, содержащиеся в трех аграрных ландшафтах Красноярского края, имеющих различный радиоэкологический статус: с поглощенной годовой дозой для сельскохозяйственных животных 0,92 мГр (контроль), с дозами 1,33 и 1,55 мГр/год [7]. Материалом для исследования являлась периферическая кровь коров. Пробы отбирали в вакуумные пробирки с гепарином в утреннее часы из хвостовой вены. Ки-

нетика спонтанной и активированной продукции АФК оценивалась хемилюминесцентным (ХЛ) методом на 36-канальном комплексе «Хемилюминометр 3604-ПЭВМ». Для усиления ХЛ-реакции использовали индикаторы люцигенин и люминол, обладающие избирательностью к первичным и вторичным радикалам. Для активации ХЛ-реакции *in vitro* применяли частицы латекса. Время записи ХЛ-кривой составило 180 мин при температуре 38 °С [8]. В работе определяли основные параметры кинетики генерации АФК: амплитуду максимальной активности (I_{\max} , имп./с); время достижения максимума (T_{\max} , мин); площадь под ХЛ кривой (S , имп. за 180 мин), характеризующую общий объем образованных АФК; индекс активации ($ИА = S_{\text{акт}}/S_{\text{спонт}}$, усл. ед.).

Результаты и их обсуждение. Хемилюминесцентный анализ позволяет выявить тонкие колебания функционального состояния клеток крови, реализующих защитные механизмы неспецифической резистентности организма на молекулярном уровне.

Кинетика генерации свободных радикалов. Кинетика генерации первичных и вторичных АФК клетками крови лактирующих коров во всех группах характеризовалась двумя пиками максимальной активности и имела специфические особенности при различной дозовой нагрузке (рис. 1, 2). Первый пик максимальной интенсивности спонтанной генерации первичных (люцигенинзависимых) АФК клетками крови, находящимися в состоянии «покоя», при дозе 1,33 мГр/год превышал контрольные значения, а при дозе 1,55 мГр/год незначительно отставал от них (рис. 1, А). Последующее снижение интенсивности продукции свободных радикалов наблюдалось во всех группах на 58–78-й мин ХЛ-реакции, однако наиболее ярко это проявилось при дозе 1,55 мГр/год.

Второй пик активности спонтанной продукции первичных радикалов характеризовался выраженной дозовой зависимостью и превышал показатели контроля при дозе ионизирующего излучения 1,33 мГр/год и особенно при дозе 1,55 мГр/год. Аналогичные закономерности наблюдались при генерации свободных радикалов клетками крови, активированными частицами латекса (рис. 1, Б). Второй пик спонтанной и активированной генерации АФК при дозе 1,55 мГр/год заметно выше вторых пиков при дозах 0,92 и 1,33 мГр/год.

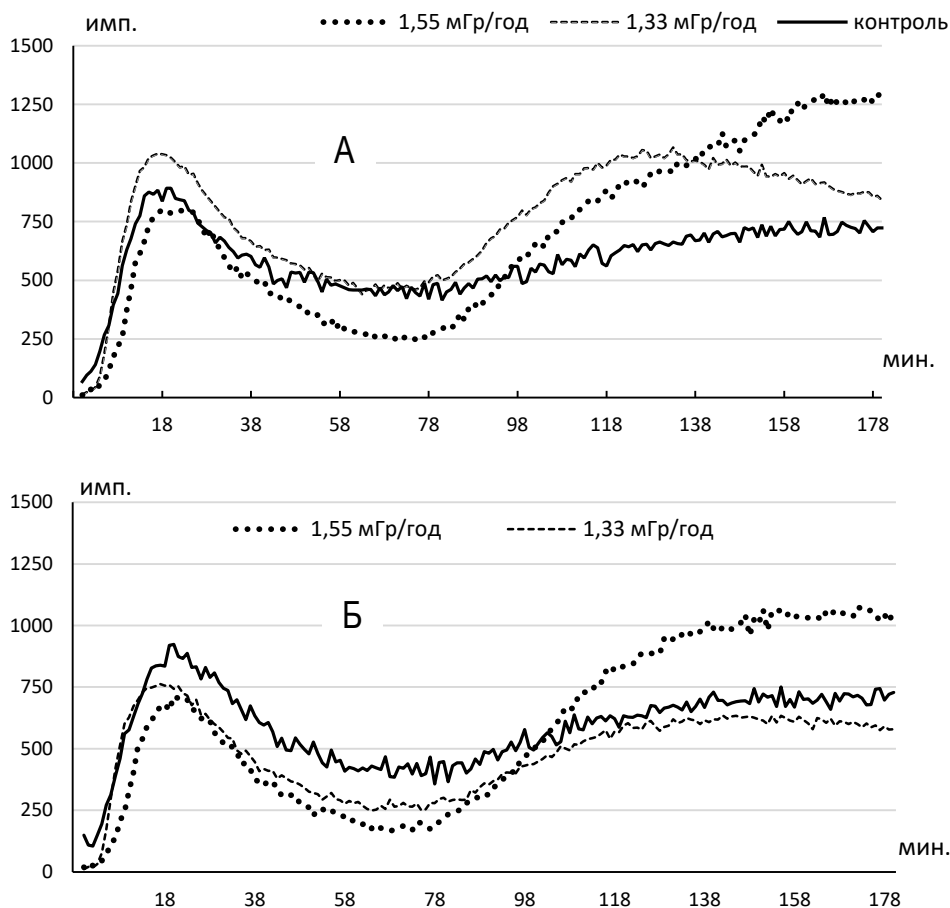


Рис. 1. Кинетика спонтанной (А) и активированной (Б) продукции первичных радикалов кислорода клетками крови

Кинетика образования вторичных (люминол-зависимых) АФК отличалась от кинетики генерации первичных АФК, как при спонтанной, так и активированной ХЛ-реакции. Это характеризовалось слабовыраженными первыми пиками максимальной интенсивности при дозах 1,33 и 1,55 мг/год в отличие от контроля и низкими вторыми пиками максимальной продукции АФК во всех группах (рис. 2), что свидетельствовало о подавлении свободнорадикальных процессов, связанных с генерацией вторичных АФК.

Время формирования максимума ХЛ ($T_{\max I}$, $T_{\max II}$, мин). Установлено, что при генерации первичных радикалов показатели времени достижения максимума продукции свободных радикалов не зависели от дозовой нагрузки как при спонтанной, так и при антигенстимулированной реакции. Показатели $T_{\max I}$ спонтанной ХЛ в среднем составили $(35,95 \pm 4,47)$ мин, а значения $T_{\max II}$ достигли $(148,14 \pm 3,69)$ мин. Стиму-

ляция клеток крови частицами латекса не вызвала ожидаемого ускорения ХЛ-реакции. При антиген-активированной генерации первичных радикалов время регистрации первого и второго пика приходилось на $(35,32 \pm 4,57)$ и $(141,61 \pm 4,18)$ мин записи ХЛ-кривой соответственно.

Спонтанная генерация вторичных АФК при субклинических дозах (1,33 и 1,55 мг/год) характеризовалась замедлением формирования пиков продукции АФК (табл. 1). При дозе 1,33 мг/год торможение первого пика ХЛ-реакции составило 42 % ($P < 0,05$), второго пика – 12 % ($P < 0,01$) относительно контроля. При дозе 1,55 мг/год замедление показателей $T_{\max I}$ достигло 44 % ($P < 0,05$), а $T_{\max II}$ – 11 % относительно фоновых величин ($P < 0,01$). Не установлено статистически значимого влияния малых поглощенных доз на время достижения максимума активированной продукции вторичных АФК.

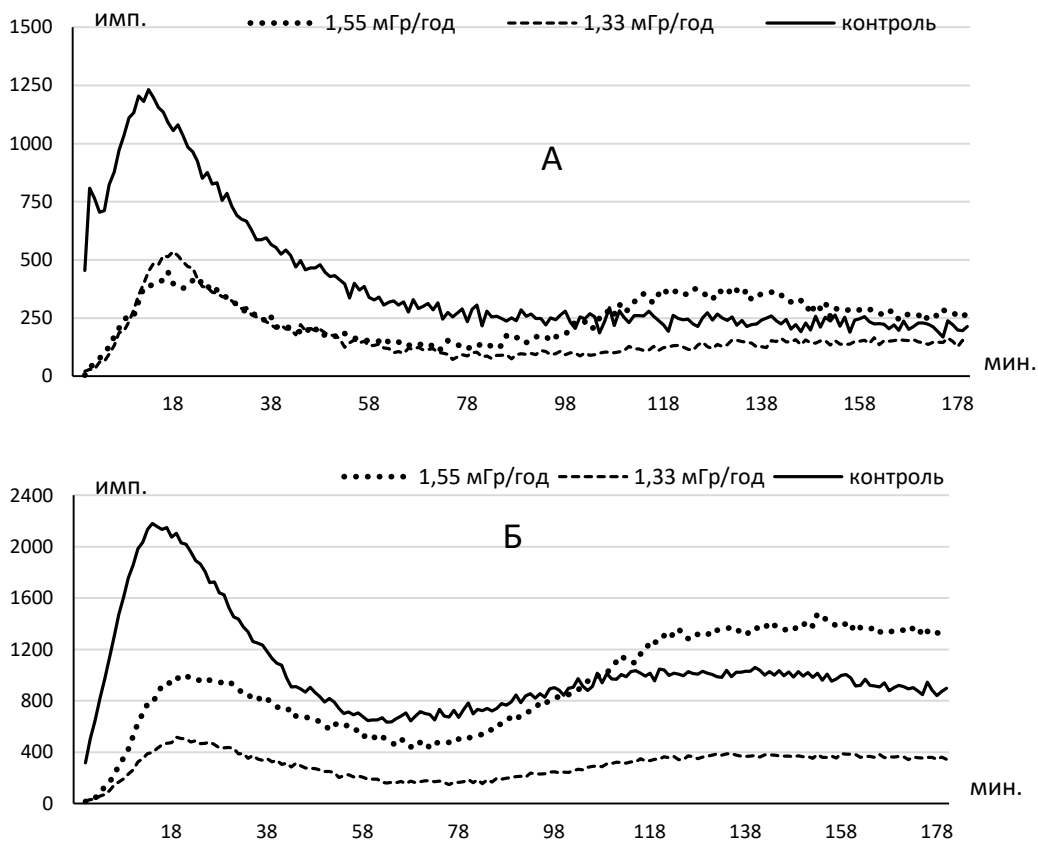


Рис. 2. Кинетика спонтанной (А) и активированной (Б) генерации вторичных АФК клетками крови коров

Таблица 2

Время достижения максимума генерации вторичных АФК клетками крови коров при субклинических дозах облучения

Поглощенная доза, мГр/год	Кол-во голов	Tmax I, мин	Tmax II, мин
Спонтанная генерация АФК			
0,92	41	19,95±1,94	129,79±4,04
1,33	38	28,30±3,15*	144,97±3,90**
1,55	31	28,81±3,90*	143,43±2,99**
Активированная генерация АФК			
0,92	41	26,88±3,48	121,60±3,49
1,33	38	27,68±3,49	130,35±4,08
1,55	31	33,04±5,24	129,87±3,52

* P < 0,05; ** P < 0,01 по отношению к контролю (0,92 мГр/год).

Максимальная интенсивность ХЛ (I_{max I} и I_{max II}, имп/с). Амплитуды первого максимума (I_{max I}, имп/с) спонтанной генерации первичных вторичных АФК в крови у животных при субклинических дозах и контроле статистически различались (табл. 2). При малых дозах установлено

увеличение амплитуды второго максимума (I_{max II}) спонтанной генерации первичных АФК по сравнению с контролем (0,92 мГр/год): при поглощенной дозе 1,55 мГр/год увеличение наблюдалось в 1,4 раза (P < 0,05), при поглощенной дозе 1,33 мГр/год – в 1,9 раза (P < 0,001).

I_{max} продукции первичных АФК клетками крови, имп/с

Поглощенная доза, мГр/год	Количество голов	I _{max} I, имп/с	I _{max} II, имп/с
Спонтанная генерация АФК			
0,92	41	920,90±129,29	704,07±61,28
1,33	38	1223,68±209,06	1006,79±114,07*
1,55	31	962,52±146,82	1380,96±143,27***
Активированная генерация АФК			
0,92	41	953,59±89,89	893,05±73,2
1,33	38	1150,58±232,06	751,71±63,55
1,55	31	880,91±98,71	1113,09±128,49

*P < 0,05; ***P < 0,001 по отношению к поглощенной дозе 0,92 мГр/год.

При введении частиц латекса *in vitro* в пробы периферической крови коров контрольной группы (0,92 мГр/год) наблюдалось увеличение показателей максимальной интенсивности второго пика в 1,3 раза по сравнению со спонтанной ХЛ-реакцией. В крови животных при воздействии малых доз выявлена тенденция к снижению высоты пиков антигена активированной генерации первичных АФК. При дозе 1,33 мГр/год установлена тенденция к понижению максимальной интенсивности первого пика на 10 %, второго – на 30 % относительно спонтанной генерации. При воздействии дозы в 1,55 мГр/год наблюдалось снижение максимальной интенсивности I_{max} I

в 1,1 раза и I_{max} II – в 1,2 раза относительно спонтанной генерации при этой же дозе.

При субклинической дозе 1,33 мГр/год значения I_{max} I спонтанной генерации вторичных АФК статистически не отличались от контроля (0,92 мГр/год). При поглощенной дозе 1,55 мГр/год выявлено снижение амплитуды I_{max} I на 62 % (P < 0,05) в сравнении со значениями, полученными при фоновых дозах (рис. 3). Установлено достоверное увеличение второго максимума интенсивности (I_{max} II, имп/с) в 2,3 раза при спонтанной генерации вторичных радикалов под влиянием субклинических доз при дозах 1,33 (P < 0,01) и 1,55 мГр/год (P < 0,001).

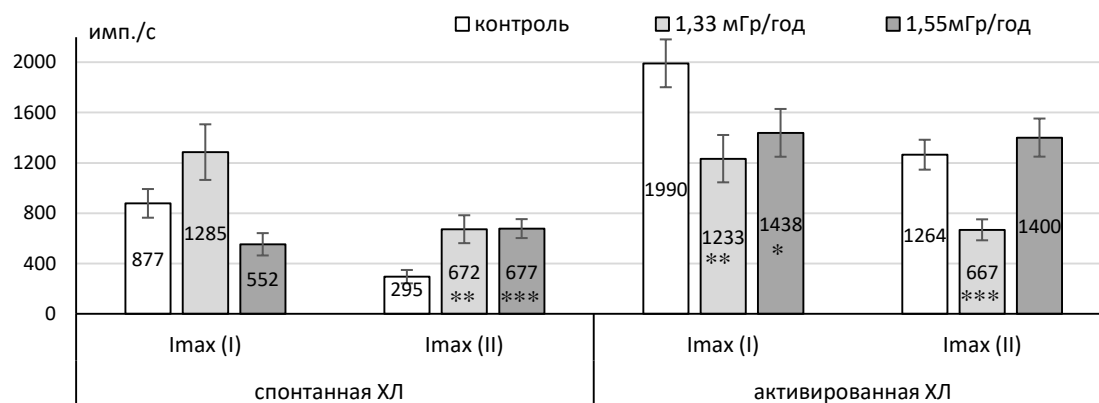


Рис. 3. Максимальная интенсивность (I_{max} I, I_{max} II) генерации вторичных АФК клетками крови коров (*P < 0,05; **P < 0,01; ***P < 0,001 по отношению к контролю (0,92 мГр/год))

Субклинические дозы облучения (1,33 и 1,55 мГр/год) негативно влияли на показатели максимальной активности при стимулированной частицами латекса генерации вторичных АФК. Амплитуда первого максимума (I_{max} I, имп/с) активированной продукции АФК при дозе

1,33 мГр/год ниже данных контрольной группы (0,92 мГр/год) на 39 % (P < 0,01), а при дозе 1,55 мГр – на 28 %. Амплитуда второго максимума (I_{max} II) при дозе 1,33 мГр/год снижалась на 47 % по сравнению с данными, полученными при фоновых значениях поглощенных доз. При

дозе 1,55 мГр/год амплитуда I_{max} II превысила контрольные величины более чем на 10 %, а при дозе 1,33 мГр/год – в 2,1 раза (P < 0,01).

Суммарная генерация АФК (S, млн имп./180 мин). Субклинические дозы ионизирующего излучения вызвали рост общего количества радикалов при спонтанной продукции всех видов АФК клетками крови. При малых дозах светосумма первичных АФК, образованных за время регистрации спонтанной ХЛ-реакции, в 1,46–1,51 раза превышала фоновые показатели (0,92 мГр/год). Достоверность отличий от контроля при дозе 1,33 мГр/год составляла P < 0,01 и при дозе 1,55 мГр/год – P < 0,001. В то же время суммарное количество образованных первичных АФК не имело межгрупповых различий при дозах 1,33 и 1,55 мГр/год.

Малые дозы облучения негативно влияли на показатели суммарной продукции антигенактивированных АФК по сравнению с контролем. При фоновой дозе облучения 0,92 мГр/год стимуляция фагоцитов крови частицами латекса обусловила достоверный рост суммарных объемов свободных радикалов на 1,8 млн имп., или в 1,3 раза, относительно спонтанной продукции АФК (P < 0,05). В то же время при дозе 1,33 мГр/год наблюдалось сокращение антигенактивированной генерации первичных АФК на 2,22 млн имп., или в 1,4 раза, по сравнению со спонтанной продукцией (P < 0,05). При поглощенной дозе 1,55 мГр/год также зафиксировано снижение объемов активированных первичных АФК на 1,55 млн имп., или на 18 %, по сравнению со спонтанной ХЛ при этой дозе (рис. 4).

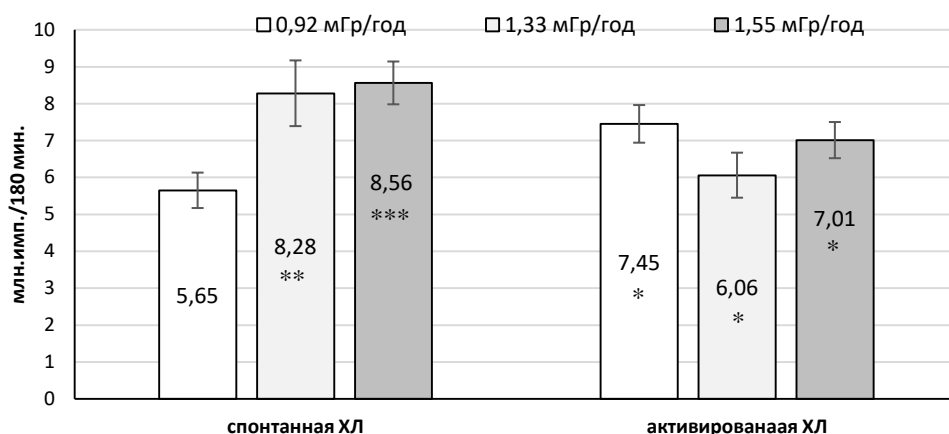


Рис. 4. Светосумма первичных АФК, продуцированных клетками крови коров (**P < 0,01; ***P < 0,001 относительно контроля (0,92 мГр/год); *P < 0,01 относительно спонтанной продукции)

При субклинических дозах радиации общее количество спонтанных вторичных АФК в крови коров достоверно увеличивается. При дозе 1,33 мГр/год спонтанная суммарная продукция вторичных АФК увеличилась на 2,63 млн имп., или в 1,8 раза (P < 0,001), при дозе 1,55 мГр/год рост показателя составил 2,91 млн имп., или в 1,4 раза (P < 0,01) по сравнению с данными контроля. Антигенная активация клеток крови *in vitro* частицами латекса потенцировала прооксидантные реакции при генерации вторичных АФК, о чем свидетельствовал рост суммарных объемов АФК во всех группах (рис. 5). При антигенной стимуляции латексом клеток контрольных проб светосумма свободных радика-

лов увеличилась на 8,56 млн имп., или в 3,7 раза, относительно спонтанной генерации (P < 0,001). При дозе 1,55 мГр/год светосумма активированной генерации вторичных радикалов превышала спонтанную генерацию на 7,32 млн имп., или в 2,7 раза (P < 0,001).

Индекс активации (ИА, усл. ед.). На основании данных об итоговых количествах АФК, полученных при активированной и спонтанной ХЛ-реакции, рассчитан индекс активации (ИА), отражающий потенциальную способность фагоцитов крови к индукции «респираторного взрыва» в ответ на дополнительное антигенное раздражение.

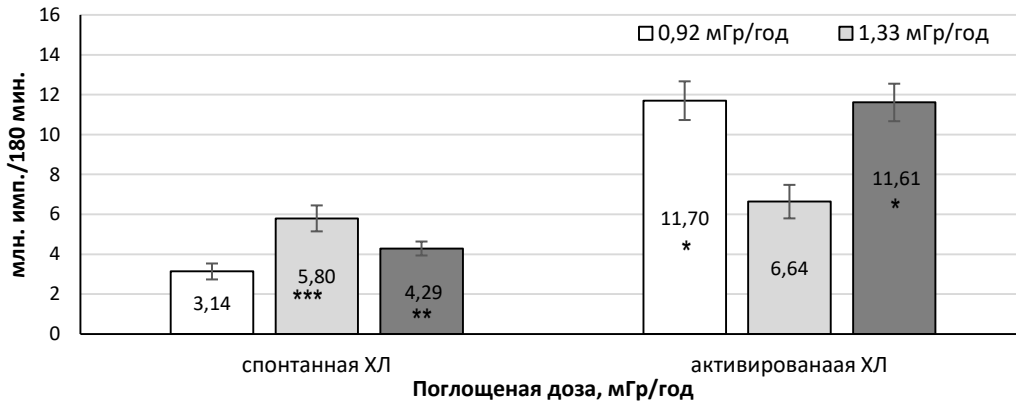


Рис. 5. Светосумма вторичных АФК, генерируемых клетками крови коров при субклинических дозах облучения (** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$ относительно контроля (0,92 мГр/год); * $P < 0,001$ относительно спонтанной продукции)

Субклинические поглощенные дозы облучения негативно влияли на показатели ИА при генерации всех форм АФК, о чем свидетельство-

вало снижение показателей ИА при образовании первичных и вторичных радикалов (рис. 6).

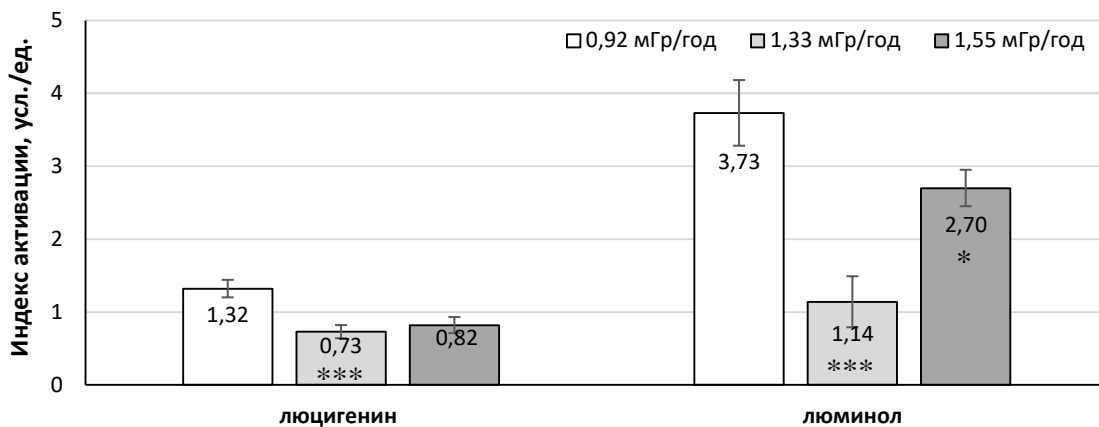


Рис. 6. Индекс активации клеток крови коров: * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$ относительно контроля (0,92 мГр/год)

Показатели ИА первичных АФК при значении дозы 1,33 мГр/год уменьшались на 44,7 %, или на 0,59 усл. ед. ($P < 0,001$), при дозе 1,55 мГр/год – на 37,9 %, или на 0,5 усл. ед. ($P < 0,01$), относительно данных контроля (0,92 мГр/год). При генерации вторичных АФК показатели ИА сократились на 69,4 %, или на 2,59 усл. ед. при дозе 1,33 мГр/год ($P < 0,001$) и на 27,6 %, или на 1,03 усл. ед. при дозе 1,55 мГр/год ($P < 0,05$). При действии субклинических доз ионизирующего воздействия снижался ИА активации образования первичных и вторичных АФК, что указывало на снижение резервных возможностей лейкоцитов крови.

Заключение. Субклинические дозы ионизирующего излучения разнонаправленно влияют на свободнорадикальные процессы, протекающие в клетках крови, как находящихся в состоянии «покоя» (спонтанная ХЛ), так и стимулированных частицами латекса (активированная ХЛ). При действии малых поглощенных доз радиации клеткам периферической крови лактирующих коров в состоянии покоя требуется больше времени на формирование респираторного взрыва, что может негативно влиять на неспецифическую резистентность организма. Низкая максимальная интенсивность респираторного взрыва в первые минуты спонтанной и

активированной генерации люцигенин- и люминолзависимых АФК является доказательством низкой реактивности клеток крови. Субклинические дозы ионизирующего излучения увеличивают суммарные объемы спонтанной генерации и снижают продукцию антигена активированного образования первичных и вторичных АФК. Большие объемы АФК, выделенных клетками в состоянии покоя, могут иметь потенциальную опасность нарушения клеточных структур и явиться пусковым механизмом развития патологий разного генеза. При активированной ХЛ-реакции субклинические дозы облучения подавляют интенсивность продукции АФК и их суммарные объемы, что предсказуемо ведет к снижению ИА, это указывает на уменьшение функционального потенциала фагоцитов крови животных адекватно отвечать на возможные антигенные угрозы формированием респираторного взрыва, что отрицательно скажется на естественной резистентности организма.

Список источников

1. Study of the antiinflammatory effects of low-dose radiation: the contribution of biphasic regulation of the antioxidative system in endothelial cells / *M. Large* [et al.] // *Strahlenher Oncol.* 2015. V. 191. P. 742–749. DOI: 10.1007/s00066-015-0848-9.
2. ROS- and Radiation Source-Dependent Modulation of Leukocyte Adhesion to Primary Microvascular Endothelial Cells / *D. Eckert* [et al.] // *Cells.* 2021. Dec 27;11(1). P. 72. DOI: 10.3390/cells11010072.
3. Молекулярный ответ фибробластов кожи человека с мутацией m.14441 T > C на воздействие ионизирующего излучения в малых и средних дозах / *М.С. Абрамова* [и др.] // *Медицинская генетика* 2020. № 19 (9). С. 91–93. DOI: 10.25557/2073-7998.2020.09.91-93.
4. The Effect of Radiation on the Immune System in Pigs Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. In: Fukumoto, M. (eds) *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems.* / *M. Morimoto* [et al.] // Springer, Singapore. 2020. P. 139–151. DOI: 10.1007/978-981-13-8218-5_11.

5. Organ-Specific Effects of Low Dose Radiation Exposure: A Comprehensive Review. / *E. Shin* [и др.] // *Front. Genet.* 2020. 11:566244. DOI: 10.3389/fgene.2020.566244.
6. Влияние инфракрасного и рентгеновского излучений на продукцию активных форм кислорода в крови и индукцию цитогенетических повреждений в костном мозге мышей *in vivo* / *А.Р. Дюкина* [и др.] // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2011. Т. 51, № 5. С. 536–541.
7. *Федотова А.С.* Особенности расчета поглощенных доз облучения для крупного рогатого скота в условиях Красноярского края // *Аграрный вестник Урала.* 2021. № 12 (215). С. 77–86. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-215-12-77-86.
8. Free radicals and cell chemiluminescence / *Yu.A. Vladimirov* [et al.] // *Biochemistry (Moscow).* 2009. Т. 74, № 13. P. 1545–1566. DOI: 10.1134/s0006297909130082.

References

1. Study of the antiinflammatory effects of low-dose radiation: the contribution of biphasic regulation of the antioxidative system in endothelial cells / *M. Large* [et al.] // *Strahlenher Oncol.* 2015. V. 191. P. 742–749. DOI: 10.1007/s00066-015-0848-9.
2. ROS- and Radiation Source-Dependent Modulation of Leukocyte Adhesion to Primary Microvascular Endothelial Cells / *D. Eckert* [et al.] // *Cells.* 2021. Dec 27;11(1). P. 72. DOI: 10.3390/cells11010072.
3. Molekulyarnyj otvet fibroblastov kozhi cheloveka s mutaciej m.14441 T > C na vozdejstvie ioniziruyuschego izlucheniya v malyh i srednih dozah / *M.S. Abramova* [i dr.] // *Medicinskaya genetika* 2020. № 19 (9). S. 91–93. DOI: 10.25557/2073-7998.2020.09.91-93.
4. The Effect of Radiation on the Immune System in Pigs Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. In: Fukumoto, M. (eds) *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems.* / *M. Morimoto* [et al.] // Springer, Singapore. 2020. P. 139–151. DOI: 10.1007/978-981-13-8218-5_11.
5. Organ-Specific Effects of Low Dose Radiation Exposure: A Comprehensive Review. / *E. Shin*

- [и др.] // Front. Genet. 2020. 11:566244. DOI: 10.3389/fgene.2020.566244.
6. Vliyanie infrakrasnogo i rentgenovskogo izlucheniya na produkciju aktivnykh form kisloroda v krovi i indukciu citogeneticheskikh povrezhdenij v kostnom mozge myshej *in vivo* / A.R. Dyukina [i dr.] // Radiacionnaya biologiya. Radio`ekologiya. 2011. T. 51, № 5. S. 536–541.
7. Fedotova A.S. Osobennosti rascheta pogloshchennykh doz oblucheniya dlya krupnogo rogatogo skota v usloviyah Krasnoyarskogo kraja // Agrarnyj vestnik Urala. 2021. № 12 (215). S. 77–86. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-215-12-77-86.
8. Free radicals and cell chemiluminescence / Yu.A. Vladimirov [et al.] // Biochemistry (Moscow). 2009. T. 74, № 13. P. 1545–1566. DOI: 10.1134/s0006297909130082.

Статья принята к публикации 20.05.2024 / The article accepted for publication 20.05.2024.

Информация об авторах:

Арина Сергеевна Федотова¹, доцент кафедры внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии сельскохозяйственных животных, кандидат биологических наук, доцент

Евгения Геннадьевна Турицына², профессор кафедры анатомии, патологической анатомии и хирургии, доктор ветеринарных наук, доцент

Галина Владимировна Макарская³, старший научный сотрудник международного научного центра исследований 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 Agricultural Animals, Candidate of Biological Sciences, Docent

Evgenia Gennadievna Turitsina², Professor at the Department of Anatomy, Pathological Anatomy and Surgery, Doctor of Veterinary Sciences, Docent

Galina Vladimirovna Makarskaya³, Senior Researcher at the International Scientific Center for Research on Extreme States of the Organism, Candidate of Biological Sciences

