

2. Segregational instability of multicopy plasmids: A population genetics approach / J. C. R. Hernandez-Beltran, V. Miró Pina, A. Siri-Jégousse [et al.] // *Ecol Evol.* – 2022. – Vol. 12(12). – e9469. doi: 10.1002/ece3.9469.
3. Kumar, S. Engineering plasmid copy number heterogeneity for dynamic microbial adaptation / S. Kumar, A. Lezia, J. Hasty // *Nat Microbiol.* – 2024. – Vol. 9(8). – P. 2173–2184. doi: 10.1038/s41564-024-01706-w.
4. Evolutionary model for the unequal segregation of high copy plasmids / K. Münch, R. Münch, R. Biedendieck [et al.] // *PLoS Comput Biol.* – 2019. – Vol. 15(3). – e1006724. doi: 10.1371/journal.pcbi.1006724.
5. Oftadeh, O. Genome-scale models of metabolism and expression predict the metabolic burden of recombinant protein expression / O. Oftadeh, V. Hatzimanikatis // *Metab Eng.* – 2024. – Vol. 84. – P. 109–116. doi: 10.1016/j.ymben.2024.06.005.
6. Sağlam, H. Plasmid stability of potential probiotic *Lactobacillus plantarum* strains in artificial gastric juice, at elevated temperature, and in the presence of novobiocin and acriflavine / H. Sağlam, A. G. Karahan // *Arch Microbiol.* – 2021. – Vol. 203(1). – P. 183–191. doi: 10.1007/s00203-020-02017-4.
7. Sánchez-Romero, M. A. Copy Number Heterogeneity in the Virulence Plasmid of *Salmonella enterica* / M. A. Sánchez-Romero, A. Mérida-Floriano, J. Casadesús // *Front Microbiol.* – 2020. – Vol. 4 (11). – P. 599931. doi: 10.3389/fmicb.2020.599931.
8. Toshimitsu, T. Development of a lactic acid bacteria strain that suppresses chronic inflammation and improves glucose and lipid metabolism / T. Toshimitsu // *Biosci Microbiota Food Health.* – 2023. – Vol. 42(1). – P. 3–7. doi: 10.12938/bmfh.2022-054.
9. The insertion of the inverted repeat of an insertion sequence (IS) element from *Lactocaseibacillus rhamnosus* changes the host range and stability of pGK12, a shuttle vector for lactic acid bacteria / Z. Xie, Y.-S. Jin, T. R. Klaenhammer, M. J. Miller // *Appl Environ Microbiol.* – 2025. – Vol. 91(4). – e0190824. doi: 10.1128/aem.01908-24.

Поступила в редакцию 22.03.2026.

DOI 10.52368/2078-0109-2026-62-2-101-107

УДК 619:616.151:636.92

ПРИМЕНЕНИЕ ФУЛЛЕРЕНОЛА КАК РАДИОПРОТЕКТОРА ПРИ ТРИТИЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОРГАНИЗМ КРОЛИКОВ

Федотова А.С. ORCID ID 0000-0003-1630-2444, Жигарев А.А. ORCID ID 0000-0002-6611-1999

ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»,
г. Красноярск, Российская Федерация

Статья посвящена оценке радиопротекторных свойств фуллеренолов при тритиевом воздействии. Фуллеренолы влияют на процессы окисления и восстановления в клетке. В работе оценено изменение гематологических показателей, лейкоцитарного профиля периферической крови кроликов (возраст $7 \pm 0,3$, вес $4 \pm 0,5$ кг) при коррекции тритиевого воздействия (63 мГр) фуллеренолом. В работе установлено, что использование фуллеренола на 8-е сутки нормализует гематологические показатели и лейкоцитарный профиль периферической крови, установлено при использовании фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л. **Ключевые слова:** тритий, радиопротекторы, фуллеренол, гематологические показатели, фагоцитоз, здоровье животных, продуктивность

USE OF FULLERENOL AS A RADIOPROTECTOR FOR TRITIUM EXPOSURE IN RABBITS

Fedotova A.S., Zhigarev A.A.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Krasnoyarsk State Agrarian University",
Krasnoyarsk, Russian Federation

This work evaluates the radioprotective properties of fullereneols within the tritium exposure. Fullereneols possess its impact on the redox processes in cells. The study evaluates changes in hematological parameters and the leukocytic profile of the peripheral blood of rabbits (age 7 ± 0.3 , body weight 4 ± 0.5 kg) after correcting tritium exposure (63 mGy) with fullereneol. As a result of the study, it was found that the use of fullereneol on the 8th day normalizes hematological parameters and the leukocyte profile of the peripheral blood, as determined when using fullereneol at a concentration of 1×10^{-11} g/L. **Keywords:** tritium, radioprotectors, fullereneol, hematological parameters, phagocytosis, animal health, productivity.

Введение. Радиационный фон биогеоценоза, агробиоценоза формируется естественными (природными) и техногенными (искусственными) источниками ионизирующего излучения. Природная радиация, постоянно находящаяся в биосфере, поглощенная доза от природных источников не зависит от деятельности человека. Природные источники – это космическое излучение, естественные радионуклиды, находящиеся в атмосфере, гидросфере, литосфере и в организмах различной организации. Одним из серьезных источников природных изотопов является процесс добычи урана, при горной разработке изотопов урана в окружающей среде увеличивается количество природных радионуклидов, которые являются источником дополнительного облучения.

Космическое излучение преимущественно состоит из атомных ядер Н (водорода) – протонов и ядер He (гелия) – α -частиц и незначительного количества (1%) электронов и позитронов. Естественные радионуклиды, радиоактивные изотопы природного происхождения, находящиеся в биосфере. Присутствие и количество естественных изотопов не связано с деятельностью человека, они образовались одновременно со стабильным веществом Земли. Естественные изотопы вносят основной вклад в дозу облучения биологического объекта, средняя поглощенная доза, формируемая естественными радионуклидами, составляет примерно 66% от суммарной поглощенной дозы. К естественным радионуклидам относят изотопы литосферы урана (^{238}U , ^{235}U), тория (^{232}Th), радия (^{226}Ra) и радона (^{222}Rn , ^{220}Rn); изотопы биосферы: калий (^{40}K), рубидий (^{87}Rb), кальций (^{48}Ca), цирконий (^{96}Zr) и др.; изотопы атмосферы: тритий (^3H), бериллий (^7Be , ^{10}Be) и углерод (^{14}C).

Техногенное радиоактивное загрязнение окружающей среды относится к негативным факторам, антропогенные изотопы входят в состав почвы, растений, идентифицируются в воздухе и в организмах. К источникам техногенного радиационного загрязнения относят: техногенные аварии (аварийные ситуации на АЭС, при перевозке и хранении радиоактивных отходов, случайные утерянные промышленные и медицинские радиоисточники); выпадение техногенных радионуклидов из атмосферы. К основным техногенным изотомам, имеющим радиобиологическое действие, относят: ^3H , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I , и ^{14}C . При радиоактивном распаде радиоактивных изотопов веществ образуется ионизирующее излучение (альфа-, бета-, гамма-лучи и свободные нейтроны) [1].

Радиоактивное загрязнение имеет долгосрочные последствия для здоровья человека и животных. У животных, подверженных воздействию радиации, возникают нарушения функции органов и систем, что приводит к развитию соматических заболеваний, увеличивается вероятность возникновения инфекционных болезней, возможно появления мутаций, генетических уродств в потомстве животных, увеличивается вероятность бесплодия и гибели животных. Систематическое или очень интенсивное воздействие радиации в биоценозе нарушает пищевые цепочки, что провоцирует угрозу существования некоторых видов или всей экосистемы. На территориях локального радиоактивного техногенного загрязнения происходит накопление радиоактивных веществ в организмах животных и растений, миграция в окружающей среде, загрязнение почвы и попадание в пищевые цепи.

Субклинические дозы ионизирующего излучения воздействуют на все уровни организации организма, изменяют органомерические показатели органов дыхания и пищеварения [2]. В зоне техногенного радиоактивного загрязнения воздействия у организмов формируются компенсаторно-приспособительные реакции, направленные на поддержание метаболического гомеостаза [3].

Тритий (Т, ^3H) – радиоактивный изотоп водорода, открыт в 1934 г. Э. Резерфордом. Тритий имеет массовое число 3, атомную массу – 3,016 а.е.м., $T_{1/2}$ – 12,32 года, это бета-излучатель с энергией β -частиц 5,7 кэВ, пробег β -частиц в воздухе – до 6,0 мм, в воде и биологической ткани – 0,56 мкм. Природный ^3H образуется в результате взаимодействия протонов и нейтронов вторичного космического излучения с атомами атмосферы (N, O₂, Ar) [4, 5].

В настоящее время основным источником техногенного трития является атомная промышленность. На АЭС тритий образуется в реакторах при делении изотопов ^{235}U , в окружающую среду основная часть трития поступает в виде газо-аэрозольных выбросов. Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций оценивает общее поступление в окружающую среду от объектов атомной отрасли как $4,2 \cdot 10^{17}$ Бк/год [6].

В настоящее время разрабатывается методология учета биологической опасности трития и его соединений с переходом от оценки соматических нарушений в органах и системах организма к исследованию формирования цитогенетических нарушений, с поиском высокоинформативных и специфических критериев оценки, возникающих трансляционных и пост трансляционных нарушений. С целью совершенствования нормативной базы по радиационной безопасности персонала и населения, пересмотра принципов дозиметрии трития, для подготовки новой редакции норм радиационной безопасности, осуществляется оценка поступления соединений трития (НТО и органически-связанного трития (ОСТ)) в клетку и их распределение в цитоплазме клетки, ядре и ДНК [7, 8].

Изотоп трития, включенный в состав органических веществ, представляет собой органически связанный (ОСТ) и представляет большую биологическую опасность, чем НТО при одинаковом количестве потребления ^3H . Эффективный период полувыведения НТО – 10 дней, ОСТ – 21-76 дней [32], 1-5% НТО в организме животных является частью органических молекул. Срок полувыведения трития из организма кроликов составляет 3-3,87 суток. ОСТ и НТО мигрируют через трансплацентарный барьер, вызывают облучение плода, формируют патологии плода и нарушение беременности [9].

Фармакохимическая защита – это снижение радиационных повреждений в клетках и тканях организма с помощью радиопротекторных средств. Радиопротекторные препараты – химические вещества для защиты организма от ионизирующего излучения (γ - или рентгеновских лучей, потоков

протонов и нейтронов). Применение радиопротекторов в организме формирует радиорезистентность – устойчивость к ионизирующему излучению. Выделяют следующие группы радиопротекторов. Серосодержащие соединения: меркаптоэтиламин, его дисульфид – цистамин и производные этих соединений – цистафос, гаммафос и др. Препараты из групп индоллилалкиламинов и имидазолинов – индралин, нафтизин, мексамин и др. Природные радиопротекторы растительного происхождения – экстракты растений и биологически активные вещества, которые уменьшают окислительный стресс.

В организме радиопротекторы временно уменьшают содержание кислорода в клетках тканей. Снижение концентрации кислорода значительно уменьшает количество активных форм кислорода, перекисей и гидроперекисей, которые в значительном количестве образуются при радиационном воздействии в клетке. В последующем формируют развитие радиационных эффектов в тканях и органах. Радиопротекторы увеличивают радиорезистентности организма – механизм действия радиопротекторов пролонгированного действия типа биогенных стимуляторов (например, витаминов) [10, 11].

Радиопротекторы применяют одномоментно или пролонгированно. Одномоментные или кратковременные радиопротекторы применяют с/х животным за 10-60 минут до облучения, предоставляют защиту от 50 до 100% от доз, приводящих к 100%-ной гибели организма. Радиопротекторы предохраняют красный костный мозг, селезенку, лимфатические узлы, тимус от повреждающего действия радиации. В качестве радиопротекторов применяют такие соединения углерода, как фуллеренолы и фуллерены. Фуллеренол – это наноскопическая версия фуллеренов, представляет собой особую форму углерода, молекулы фуллеренола образуют сферические структуры.

Фуллерены (аллотропная форма углерода) обладают специфическими химическими свойствами, это связано с особенностями структуры: фуллерен имеет сопряженные π-системы, одинарные C–C и двойные C=C связи, и его химические свойства сходны со свойствами электронодефицитных полиолефинов. Фуллеренолы могут содержать не только гидроксильные группы, но и карбонильные группы или солевые группы. Фуллеренолы в химическом отношении растворимы в воде, спирте, других полярных растворителях и частично в жирах. Фуллеренолы обладают достаточной антиоксидантной активностью, «радикальные ловушки» могут нейтрализовать одной молекулой более 20 свободных радикалов. Химические свойства фуллеренов и их производных включают реакции присоединения, окисления, восстановления и галогенирования. В настоящее время фуллеренолы применяют в медицине, фармацевтике и биотехнологии.

Фуллеренол хорошо переносится живыми организмами, защищает клетки от повреждений свободными радикалами, многочисленные исследования подтверждают его антиоксидантные свойства, фуллерены защищают липиды клеточных мембран от повреждений, вызванных окислением, которое провоцируют свободные радикалы. Установлено, что фуллеренолы, содержащие кислород в количестве, составляющем половину от числа атомов углерода в их основе, демонстрируют более слабое ингибирующее действие. Ранее авторами проведена работа по оценке радиобиологических эффектов при поглощенных дозах 4 и 5 мГр [12], определению генерации активных форм кислорода в крови кроликов при тритиевом воздействии в дозе 6,8 мГр и результативность использования «Гумат калия 80» в качестве радиопротектора [13].

Цель исследований – определить изменение гематологических показателей, лейкоцитарного профиля периферической крови при коррекции тритиевого воздействия в дозе 63 мГр фуллеренолом в концентрации 1×10^{-11} г/л и 1×10^{-9} г/л.

Материалы и методы исследований. Исследование реализовано в 2023-2024 годах на кафедре внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии с.-х., на зооферме института прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины, в научно-исследовательском информационном центре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Красноярского государственного аграрного университета.

Исследование проведено на кроликах калифорнийской породы (возраст $7,3 \pm 0,25$; вес $4,1 \pm 0,32$ кг.). Для работы созданы две опытные группы (10 голов в каждой), группа интактного контроля (10 голов) и группа токсического контроля (10 голов). Животные группы токсического контроля и двух опытных групп получали 300 МБк/л НТО ежедневно в течение 10 дней, в результате у животных сформирована доза 63 мГр. После формирования дозы, кроликам опытных групп в течение 12 дней задавали НТО сочетанно с фуллеренолом $C_{60},70O_y(OH)_x(x+y=24-28)$, первой опытной группе – в концентрации 1×10^{-9} г/л, второй опытной группе – 1×10^{-11} г/л. Группа животных токсического контроля после формирования дозы 63 мГр продолжала получать ежедневно НТО (300 МБк/л) на всем протяжении исследования. Расчет поглощенной дозы выполняли по методике кафедры радиохимии МГУ имени М.В. Ломоносова. Контрольная, интактная группа животных получала воду из централизованной системы водоснабжения. Для оценки эффективности фуллеренола у животных всех групп проводили отбор проб крови на 4, 8 и 12-й дни применения

радиопротектора. Отбор проб крови осуществлялся в утренние часы, образцы отбирались из краевой ушной вены в вакуумные пробирки с добавлением натрия гепарина. Рацион и содержание животных всех групп были идентичными.

Подсчет количества лейкоцитов и эритроцитов проводили по общепринятым методикам микроскопически в камере Горяева на микроскопе Микмед-5, а также на гематологическом анализаторе (dymind DM61 Vet). Для определения лейкоцитарной формулы в мазках крови кроликов во всех опытных и контрольных группах применяли метод Мухина [14]. Содержание гемоглобина определяли на спектрофотометре с использованием набора «Гемоглобин-ольвекс».

Полученные результаты статистически обработаны методами вариационной статистики с применением t-критерия Стьюдента, различие данных принимали достоверным в случае $P \leq 0,05$.

Результаты исследований. Оценены изменения гематологических показателей в присутствии фуллеренола как радиопротектора в концентрациях 1×10^{-11} г/л и 1×10^{-9} г/л при радиобиологическом воздействии трития (63 мГр).

В работе установлено, что при тритиевом воздействии в дозе 63 мГр на организм кроликов в периферической крови увеличивается количество лейкоцитов в 1,43 раза ($P < 0,01$), эритроцитов – в 1,43 раза ($P < 0,001$) и содержание гемоглобина – в 1,1 раза ($P < 0,05$) относительно значений интактного контроля, что свидетельствует о стимулирующем воздействии трития на органы гемопоэза (таблица 1).

На 4-е сутки использования фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} г/л развивалось увеличение количества форменных элементов крови. Количество лейкоцитов возросло по сравнению с токсическим контролем в 1,75 раза ($P < 0,05$). Число эритроцитов повысилось относительно интактного контроля в 1,81 раза ($P < 0,001$) и в 1,27 раза ($P < 0,01$) по сравнению с токсическим контролем, что свидетельствует о низкой радиопротекторной эффективности фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} .

При использовании фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л на 4-е сутки наблюдалась тенденция к снижению количества эритроцитов и лейкоцитов. Число форменных элементов крови в опытной группе находилось в диапазоне значений интактного контроля и статистически не различалось, что свидетельствовало о эффективности применения фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л как радиопротектора. На 8-е сутки применения радиопротектора в концентрациях 1×10^{-9} г/л и концентрации 10^{-11} г/л количество форменных элементов находилось в диапазоне интактного контроля. Таким образом, для нормализации гематологических показателей рекомендовано использование фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л.

Таблица 1 – Показатели периферической крови кроликов

Группы, сутки применения	Лейкоциты, 10^9 /л	Эритроциты, 10^{12} /л	Гемоглобин, г/л
референсные значения [14]	5,9-9,0	5-7,5	100-125
интак. конт.	$6,04 \pm 0,39$	$5,61 \pm 0,25$	$114,5 \pm 3,56$
токсич. конт. (63 мГр)	$8,65 \pm 0,65^{**}$	$8,02 \pm 0,60^{***}$	$125,50 \pm 3,03^*$
фуллеренол (1×10^{-9} г/л), на 4-е сутки	$10,54 \pm 0,47^{\circ}$	$10,18 \pm 0,47^{\circ\circ}$	$118,60 \pm 3,14$
фуллеренол (1×10^{-11} г/л), на 4-е сутки	$7,70 \pm 0,97$	$8,73 \pm 0,63$	$123,80 \pm 2,94$
фуллеренол (1×10^{-9} г/л), на 8-е сутки	$9,15 \pm 0,62$	$7,87 \pm 0,36$	$124,80 \pm 3,08$
фуллеренол (1×10^{-11} г/л), на 8-е сутки	$9,58 \pm 0,57$	$7,40 \pm 0,27$	$126,00 \pm 2,73$

Примечания: * $P \leq 0,05$, ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$ относительно интактного контроля; $^{\circ}P \leq 0,05$ в сравнении с токсическим контролем.

При воздействии трития в дозе 63 мГр на организм кроликов в лейкоцитарном профиле установлено сдвиг нейтрофильного ядра влево, появление юных нейтрофилов, увеличение количества палочкоядерных клеток в 1,7 раза с одновременным снижением числа сегментоядерных нейтрофилов в 3,2 раза ($P \leq 0,001$), таблица 2. В группе токсического контроля установлен лимфоцитоз (увеличение количества лимфоцитов в 1,33 раза ($P \leq 0,001$) относительно данных интактного контроля), таблица 3. Выявленные изменения указывают на стимулирующее действие трития на органы гемопоэза, что нами расценивается как негативный фактор.

На 4-е сутки использования фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} г/л в лейкоцитарной формуле регистрировался сдвиг нейтрофильного ядра вправо, количество юных форм нейтрофилов снизилось в 3,22 раза, палочкоядерных – в 1,5 раза, число сегментоядерных клеток увеличилось в 1,96 раза ($P \leq 0,001$) относительно данных токсического контроля (таблица 2). При этом количество лимфоцитов достоверно не отличалось относительно токсического контроля (таблица 3). Выявленные изменения в опытной группе свидетельствуют о эффективности фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} г/л как радиопротектора.

При концентрации фуллеренола 1×10^{-11} г/л на 4-е сутки количество юных нейтрофилов снижалось в 3,21 раза ($P \leq 0,01$) аналогично действию фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} г/л. Количество палочкоядерных нейтрофилов уменьшалось в 1,36 раза ($P \leq 0,001$), значительно

увеличивалось количество сегментоядерных нейтрофилов в 2,22 раза ($P \leq 0,001$) (таблица 2). Зафиксировано снижение количества лимфоцитов в 1,14 раза ($P \leq 0,01$) относительно токсического контроля (таблица 3). Выявленные изменения лейкоцитарного профиля свидетельствуют об эффективности фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л как радиопротектора.

Таблица 2 – Гранулоциты крови при тритиевом воздействии в присутствии фуллеренола

Радиопротектор, сутки применения	Нейтрофилы			Эозинофилы	Базофилы
	юные	палочко-ядерные	сегментоядерные		
референсные значения	0	5-8	35-39	1-6	0-4
интактный контроль	0	6,59±0,26	38,26±1,25	1,33±0,15	0,96±0,15
токсический контроль (63 мГр)	4,51±0,40***	11,40±0,43***	11,91±1,79***	1,50±0,27	1,10±0,23
фуллеренол (1×10^{-9} г/л), на 4-е сутки	1,40±0,24 ⁰⁰⁰	7,80±0,58 ⁰⁰⁰	23,41±2,50 ⁰⁰	1,40±0,24	0,8±0,37
фуллеренол (1×10^{-11} г/л), на 4-е сутки	1,42±0,24 ⁰⁰⁰	8,40±0,41 ⁰⁰⁰	26,42±1,75 ⁰⁰⁰	1,40±0,51	1,00±0,32
фуллеренол (1×10^{-9} г/л), на 8-е сутки	0,40±0,24 ⁰⁰⁰	6,21±0,37 ⁰⁰⁰	35,81±1,02 ⁰⁰⁰	1,61±0,41	0,60±0,24
фуллеренол (1×10^{-11} г/л), на 8-е сутки	0,39±0,24 ⁰⁰⁰	6,20±0,37 ⁰⁰⁰	37,10±0,77 ⁰⁰⁰	1,61±0,42	1,00±0,10

Примечания: * $P \leq 0,05$, ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$ относительно интактного контроля; ⁰ $P \leq 0,05$, ⁰⁰ $P \leq 0,01$; ⁰⁰⁰ $P \leq 0,001$ в сравнении с токсическим контролем.

Таблица 3 – Агранулоциты крови при тритиевом воздействии в присутствии фуллеренола

Радиопротектор, сутки применения	Моноциты	Лимфоциты
референсные значения	1-3	40-62
интактный контроль	1,67±0,13	51,19±1,22
токсический контроль (63 мГр)	1,70±0,21	67,90±1,62***
фуллеренол (1×10^{-9} г/л), на 4-е сутки	1,61±0,24	63,60±2,69
фуллеренол (1×10^{-11} г/л), на 4-е сутки	1,81±0,2	59,60±1,75 ⁰⁰
фуллеренол (1×10^{-9} г/л), на 8-е сутки	1,42±0,24	54,00±0,71 ⁰⁰⁰
фуллеренол (1×10^{-11} г/л), на 8-е сутки	1,81±0,37	52,00±1,00 ⁰⁰⁰

Примечания: * $P \leq 0,05$, ** $P \leq 0,01$; *** $P \leq 0,001$ относительно интактного контроля; ⁰ $P \leq 0,05$, ⁰⁰ $P \leq 0,01$; ⁰⁰⁰ $P \leq 0,001$ в сравнении с токсическим контролем.

На 8-е сутки применения фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} г/л и 1×10^{-11} г/л выявлена лимфопения и прогрессирующий сдвиг нейтрофильного ядра вправо. При применении фуллеренола в концентрации 1×10^{-9} г/л отмечалось значительное снижение количества юных в 11,25 раза ($P \leq 0,001$) и палочкоядерных нейтрофилов в 1,84 раза ($P \leq 0,001$), при увеличении количества сегментоядерных нейтрофилов в 3,01 раза ($P \leq 0,001$) относительно токсического контроля (таблица 2). При концентрации 1×10^{-9} г/л количество лимфоцитов уменьшилось в 1,26 раза ($P \leq 0,001$) относительно токсического контроля (таблица 3). При применении фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л на 8-е сутки установлено снижение количества юных в 11,56 раза ($P \leq 0,001$) и палочкоядерных нейтрофилов в 1,84 раза ($P \leq 0,001$), увеличение количества сегментоядерных нейтрофилов – в 3,11 раза ($P \leq 0,001$), уменьшение количества лимфоцитов – в 1,31 раза ($P \leq 0,001$) относительно данных токсического контроля (таблицы 2, 3).

Таким образом, при тритиевом воздействии на организм кроликов в дозе 63 мГр использование фуллеренола в качестве радиопротектора нормализует лейкоцитарный профиль (сдвиг нейтрофильного ядра вправо, снижение количества лимфоцитов).

Заключение. Использование радиопротекторов снижает количество техногенных изотопов в организме, уменьшает влияние малых доз радиации на организм животных. Применение витаминов, электролитов и диуретических средств снижает концентрацию трития [15]. В настоящей работе оценены радиопротекторные свойства фуллеренола $C_{60,70}O_y(OH)_x(x+y=24-28)$, препарат адсорбирует тритий, в результате снижается его отрицательное воздействие на организм кроликов. Установлено, что при тритиевом воздействии на организм кроликов в дозе 63 мГр использование фуллеренола в качестве радиопротектора на 8-е сутки нормализует гематологические показатели и лейкоцитарный профиль периферической крови, наибольшая эффективность (возвращение к данным интактного контроля) установлена при использовании фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л. При тритиевом воздействии на организм кроликов рекомендовано использование фуллеренола в концентрации 1×10^{-11} г/л.

Conclusion. The use of radioprotectors reduces the amount of technogenic isotopes in the body, reduces the impact of low doses of radiation on the body of animals. The use of vitamins, electrolytes and diuretics reduces the concentration of tritium [15]. In the present work, the radioprotective properties of

fullerenol C₆₀,70O_y(OH)_x(x+y=24-28) were evaluated; the drug adsorbs tritium, as a result, its negative impact on the body of rabbits is reduced. It was found that with the tritium exposure of the rabbit body at a dose of 63 mGy, the use of fullerenol as a radioprotector on the 8th day normalizes hematological parameters and the leukocytic profile of peripheral blood, the highest efficiency (return to the data of the intact control) was established when using fullerenol at a concentration of 1×10⁻¹¹ g/l. With tritium exposure of the body of rabbits, the use of fullerenol at a concentration of 1×10⁻¹¹ g/l is recommended.

Список литературы.

1. Абрамов, А. А. Основы радиохимии и радиозкологии: методическое руководство к курсу Основы радиохимии и радиозкологии / А. А. Абрамов, Г. А. Бадун. – Москва-Баку : Филиал Химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. – 138 с.
2. Троянчук, О. В. Морфофункциональные особенности строения органов дыхания и пищеварения у кур, выращенных в условиях радиоактивного излучения / О. В. Троянчук, О. К. Левчук // Ученые записки учреждения образования «Витебская государственная академия ветеринарной медицины. – 2013. – Т. 49, № 1-1. – С. 73–78.
3. Федотов, Д. Н. Морфологическое состояние щитовидной железы, биохимический профиль крови, аминокислотный состав яиц и содержание радионуклидов в организме ужа обыкновенного в условиях белорусского сектора зоны отчуждения / Д. Н. Федотов, О. С. Мехова, И. С. Юрченко // Ученые записки учреждения образования «Витебская государственная академия ветеринарной медицины. – 2018. – Т. 54, вып. 1. – С. 81–85.
4. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / под редакцией Ю. А. Израэля. – Москва : ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. – 140 с.
5. Линге, И. И. Радиозкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / И. И. Линге, И. И. Крышева. — Москва, 2021. — 555 с.
6. Тритий. Теория, практика, последствия : монография / Л. Г. Бондарева, М. Я. Чеботина, С. Ю. Артамонова, И. Г. Тананаев. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра, 2024. – 359 с.
7. Расчетный метод дозиметрии бета-излучения трития на клеточном уровне / В. Тимофеев, А. А. Максимов, О. А. Кочетков, В. Н. Ключко // VIII Съезд по радиационным исследованиям : тезисы докладов, Москва, 12–15 октября 2021 года. – Москва: Объединенный институт ядерных исследований, 2021. – С. 288.
8. Юхимчук, А. А. Тритиевая наука и технологии в России / А. А. Юхимчук // Химическая промышленность сегодня. – 2019. – № 3. – С. 40–47.
9. Иминова, Д. Е. Радиоактивный тритий – загрязнитель водных объектов / Д. Е. Иминова // Молодой ученый. – 2017. – № 6.1. – С. 29–32.
10. ДНК-защитные и радиопротекторные эффекты гидратированного фуллерена C₆₀ / С. В. Гудков, И. Н. Штаркман, Н. Р. Асадуллина [и др.] // Физика живого. – 2009. – Т. 17, № 1. – С. 82–88.
11. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals / I. Ohsawa, M. Ishikawa, K. Takahashi [et al.] // Nature medicine. – 2007. – Vol. 13, № 6. – P. 688–694.
12. Федотова, А. С. Радиобиологические эффекты в периферической крови крупного рогатого скота при поглощенных дозах 4 и 5 мГр / А. С. Федотова, А. А. Жигарев, Г. В. Макарская // Ученые записки учреждения образования «Витебская государственная академия ветеринарной медицины. – 2022. – Т. 58, вып. 3. – С. 65–73. DOI 10.52368/2078-0109-2022-58-3-65-73.
13. Федотова, А. С. Генерация АФК в крови кроликов при применении «Гумата калия 80» в качестве радиопротектора / А. С. Федотова, Г. В. Макарская, А. А. Жигарев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2025. – Т. 17, № 1. – С. 93–99 DOI: 10.36508/RSATU.2025.81.63.013.
14. Смолин, С. Г. Физиология системы крови, кровообращения и лимфообращения у животных и рыб : учебное пособие / С. Г. Смолин ; Красноярский государственный аграрный университет. – Красноярск, 2025. – 212 с.
15. Medical Treatment and Dose Estimation of a Person Exposed to Tritium / W. Chen, H. Li, K. Wang [et al.] // Dose Response. – 2019. – Vol. 17(4). – P. 1559325819880670. doi: 10.1177/1559325819880670.

References.

1. Abramov, A. A. Osnovy radiohimii i radioekologii: metodicheskoe rukovodstvo k kursu Osnovy radiohimii i radioekologii / A. A. Abramov, G. A. Badun. – Moskva-Baku : Filial Himicheskogo fakul'teta MGU imeni M.V. Lomonosova, 2011. – 138 s.
2. Troyanchuk, O. V. Morfofunkcional'nye osobennosti stroeniya organov dyhaniya i pishchevareniya u kur, vyrashchennyh v usloviyah radioaktivnogo izlucheniya / O. V. Troyanchuk, O. K. Levchuk // Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya «Vitebskaya gosudarstvennaya akademiya veterinarnoj mediciny. – 2013. – T. 49, № 1-1. – S. 73–78.
3. Fedotov, D. N. Morfologicheskoe sostoyanie shchitovidnoj zhelezy, bihimicheskij profil' krovi, aminokislotnyj sostav yaic i soderzhanie radionuklidov v organizme uzha obyknovennogo v usloviyah belorusskogo sektora zony otchuzhdeniya / D. N. Fedotov, O. S. Mekhova, I. S. YUrchenko // Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya «Vitebskaya gosudarstvennaya akademiya veterinarnoj mediciny. – 2018. – T. 54, vyp. 1. – S. 81–85.
4. Atlas Vostochno-Ural'skogo i Karachaevskogo radioaktivnyh sledov, vklyuchaya prognoz do 2047 goda / pod redakciej YU. A. Izraeliya. – Moskva : IGKE Rosgidrometa i RAN, Fond «Infosfera» – NIA-Priroda, 2013. – 140 s.
5. Linge, I. I. Radioekologicheskaya obstanovka v regionah raspolozheniya predpriyatij Gosudarstvennoj korporacii po atomnoj energii «Rosatom» / I. I. Linge, I. I. Krysheva. — Moskva, 2021. — 555 s.

6. Tritij. Teoriya, praktika, posledstviya : monografiya / L. G. Bondareva, M. YA. CHEbotina, S. YU. Artamonova, I. G. Tananaev. – Apatity : Izd-vo Kol'skogo nauchnogo centra, 2024. – 359 s.
7. Raschetnyj metod dozimetrii beta-izlucheniya tritiya na kletochnom urovne / V. Timofeev, A. A. Maksimov, O. A. Kochetkov, V. N. Klochko // VIII S"ezd po radiacionnym issledovaniyam : tezis dokladov, Moskva, 12–15 oktyabrya 2021 goda. – Moskva: Ob"edinennyj institut yadernyh issledovaniy, 2021. – S. 288.
8. YUhimchuk, A. A. Tritievaya nauka i tekhnologii v Rossii / A. A. YUhimchuk // Himicheskaya promyshlennost' segodnya. – 2019. – № 3. – S. 40–47.
9. Iminova, D. E. Radioaktivnyj tritij – zagryaznitel' vodnyh ob"ektov / D. E. Iminova // Molodoj uchenyj. – 2017. – № 6.1. – S. 29–32.
10. DNK-zashchitnye i radioprotektornye efekty gidratirovannogo fullerena S60 / S. V. Gudkov, I. N. SHTarkman, N. R. Asadullina [i dr.] // Fizika zhivogo. – 2009. – T. 17, № 1. – S. 82–88.
11. Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals / I. Ohsawa, M. Ishikawa, K. Takahashi [et al.] // Nature medicine. – 2007. – Vol. 13, № 6. – P. 688–694.
12. Fedotova, A. S. Radiobiologicheskie efekty v perifericheskoj krovi krupnogo rogatogo skota pri pogloshchennyh dozah 4 i 5 mGr / A. S. Fedotova, A. A. ZHigarev, G. V. Makarskaya // Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya «Vitebskaya gosudarstvennaya akademiya veterinarnoj mediciny. – 2022. – T. 58, vyp. 3. – S. 65–73. DOI 10.52368/2078-0109-2022-58-3-65-73.
13. Fedotova, A. S. Generaciya AFK v krovi krolikov pri primenenii «Gumata kaliya 80» v kachestve radioprotektora / A. S. Fedotova, G. V. Makarskaya, A. A. ZHigarev // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva. – 2025. – T. 17, № 1. – S. 93–99 DOI: 10.36508/RSATU.2025.81.63.013.
14. Smolin, S. G. Fiziologiya sistemy krovi, krovoobrashcheniya i limfoobrashcheniya u zhivotnyh i ryb : uchebnoe posobie / S. G. Smolin ; Krasnoyarskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. – Krasnoyarsk, 2025. – 212 s.
15. Medical Treatment and Dose Estimation of a Person Exposed to Tritium / W. Chen, H. Li, K. Wang [et al.] // Dose Response. – 2019. – Vol. 17(4). – P. 1559325819880670. doi: 10.1177/1559325819880670.

Поступила в редакцию 27.01.2026.