

<https://doi.org/10.47183/mes.2025-410>

УДК 57.043:57.017.35



РАННИЕ И ОТДАЛЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕНСОМОТОРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ ФРАКЦИОНИРОВАННОМ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Н.И. Атаманюк[✉], Н.А. Обвинцева, И.А. Шапошникова, С.С. Андреев, Е.А. Пряхин

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

Введение. Эпидемиологические исследования позволяют предположить, что ионизирующее излучение повышает риск развития нейродегенеративных заболеваний в отдаленном периоде после облучения, однако отмечается нехватка лонгитюдных исследований и экспериментальных работ для установления причинно-следственных связей между дозой облучения и потенциальными нейродегенеративными эффектами.

Цель. Изучение ранних и отдаленных изменений сенсомоторных показателей, характеризующих координацию у лабораторных животных, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-излучению в различных дозах.

Материалы и методы. Эксперимент выполнен на мышах обоих полов ($n = 400$) линии С57В1/6. Формировали 5 групп наблюдения: 2 контрольные группы и 3 группы с различными уровнями облучения по 80 особей каждая (40 самцов и 40 самок). Животных подвергали общему внешнему гамма-облучению в течение первого месяца жизни в кумулятивных дозах 0,1, 1 и 5 Гр, каждая доза была разделена на 20 фракций. Контрольные группы необлученных мышей включали: группу интактных животных — биологический контроль ($n = 80$) и группу ложного облучения ($n = 80$). Эффективный инструмент оценки симптомов нейродегенеративных заболеваний у животных — оценка моторной функции. Оценивали координацию облученных и контрольных животных в тесте ходьбы по сужающейся перекладине в возрасте 1, 6, 12 и 18 месяцев. Данные анализировали в программе Microsoft Excel и с использованием языка программирования R.

Результаты. Выявлено влияние пола и возраста на сенсомоторные показатели, характеризующие координацию движений (лучше у самок, ухудшается с возрастом у животных обоих полов), при этом не обнаружено существенного влияния на изучаемые параметры фактора стресса, связанного с облучением животных. При сравнении стандартизованных по полу и возрасту сенсомоторных показателей у облученных животных и контрольных необлученных мышей выявлены зависимые от дозы изменения. Координация движений ухудшалась в отдаленные сроки у мышей при гамма-облучении в кумулятивной дозе 5 Гр, это проявлялось в увеличении числа ошибок более чем в 1,5 раза по сравнению с необлученными животными ($t = 6,7$; $p < 0,001$). При облучении в кумулятивной дозе 0,1 Гр обнаружен обратный эффект: как в раннем, так и в отдаленном периоде повышалась скорость перемещения мышей по сужающейся перекладине относительно необлученного контроля (время ходьбы снижалось в среднем на 20% ($p < 0,001$) в любом возрасте), в раннем периоде также снижалось число ошибок ($t = 2,36$; $p = 0,02$), что указывает на улучшение способности к координации.

Выводы. Фракционированное гамма-облучение в раннем возрасте у животных вызвало зависимые от дозы изменения сенсомоторной функции: при облучении в кумулятивной дозе 0,1 Гр и в раннем, и в отдаленном периоде после облучения отмечено улучшение координации; при облучении в кумулятивной дозе 5 Гр в отдаленном периоде, в возрасте 18 мес., выявлены признаки ухудшения координации движений у мышей.

Ключевые слова: облучение; координация движений; сенсомоторная функция; нейродегенеративные заболевания; отдаленные эффекты

Для цитирования: Атаманюк Н.И., Обвинцева Н.А., Шапошникова И.А., Андреев С.С., Пряхин Е.А. Ранние и отдаленные изменения сенсомоторных показателей при фракционированном гамма-облучении в эксперименте. *Экстремальная биомедицина*. 2026;28(2):187–196. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-410>

Финансирование: работа была выполнена в рамках государственного задания Федерального медико-биологического агентства № 27.003.23.800.

Соответствие принципам этики: исследование выполнено с соблюдением правил биоэтики, утвержденных Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других целей. Проведение исследований одобрено на заседании биоэтического комитета Уральского научно-практического центра радиационной медицины¹ ФМБА (протокол № 1 от 03.04.2023).

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Атаманюк Наталья Игоревна vita_pulhira@mail.ru

Статья поступила: 06.10.2025 **После доработки:** 31.10.2025 **Принята к публикации:** 19.11.2025 **Online first:** 30.12.2025

¹ В настоящее время — Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики.

EARLY AND LONG-TERM ALTERATIONS IN SENSORIMOTOR PARAMETERS FOLLOWING FRACTIONATED GAMMA IRRADIATION IN AN EXPERIMENTAL SETTING

Natalya I. Atamanyuk[✉], Nadezhda A. Obvintseva, Irina A. Shaposhnikova, Sergey S. Andreev, Evgeny A. Pryakhin

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics, Ozersk, Russia

Introduction. Epidemiological studies suggest that ionizing radiation increases the risk of developing neurodegenerative diseases long after exposure; however, there is a notable lack of longitudinal studies and experimental research into establishing causal relationships between radiation dose and potential neurodegenerative effects.

Objective. The work investigates early and long-term alterations in sensorimotor parameters characterizing coordination in laboratory animals subjected to a range of doses of fractionated gamma irradiation at a young age.

Materials and methods. Experiments were carried out on mice of both sexes ($n = 400$) of the C57Bl/6 strain. Five observation groups were formed: two control groups and three groups with different radiation exposure levels, each made up of 80 individuals (40 males and 40 females). The animals underwent total external gamma irradiation during their first month of life at cumulative doses of 0.1 Gy, 1 Gy, and 5 Gy, with each dose divided into 20 fractions. The control groups of non-irradiated mice included: a group of intact animals serving as biological control ($n = 80$) and a sham-irradiation placebo group ($n = 80$). Evaluation of motor function is an effective tool for assessing symptoms of neurodegenerative diseases in animals. Coordination in irradiated and control animals was assessed using the tapered beam walking test at the ages of 1, 6, 12, and 18 months. Data were analyzed using Microsoft Excel and the R programming language.

Results. Sex and age were shown to influence sensorimotor parameters characterizing motor coordination (better in females, worsens with age in animals of both sexes), while no significant effect of the stress factor associated with animal irradiation was found on the studied parameters. A comparison of sex- and age-standardized sensorimotor parameters between irradiated animals and non-irradiated control mice revealed dose-dependent alterations. A deterioration in motor coordination in the long term in mice exposed to gamma irradiation at a cumulative dose of 5 Gy manifested itself by a more than 1.5-fold increase in the number of errors compared to non-irradiated animals ($t = 6.7$; $p < 0.001$). Conversely, irradiation at a cumulative dose of 0.1 Gy produced an opposite effect: both in the early and long-term periods, the speed of mouse movement along the tapered beam increased relative to the non-irradiated control (walking time decreased by an average of 20% ($p < 0.001$) at any age), while in the early period, the number of errors also decreased ($t = 2.36$; $p = 0.02$), indicating an improvement in coordination ability.

Conclusions. Fractionated gamma irradiation at a young age induced dose-dependent alterations in sensorimotor function in animals: irradiation at a cumulative dose of 0.1 Gy resulted in improved coordination both in the early and long-term periods post-exposure; whereas irradiation at a cumulative dose of 5 Gy led to signs of impaired motor coordination in the long term, at 18 months of age.

Keywords: irradiation; motor coordination; sensorimotor function; neurodegenerative diseases; long-term effects

For citation: Atamanyuk N.I., Obvintseva N.A., Shaposhnikova I.A., Andreev S.S., Pryakhin E.A. Early and long-term alterations in sensorimotor parameters following fractionated gamma irradiation in an experimental setting. *Extreme Medicine*. 2026;28(2):187–196. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-410>

Funding: the work was performed as part of State Assignment No. 27.003.23.800 from the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

Compliance with ethical principles: the study was conducted in compliance with the bioethical principles outlined in the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. The experimental protocol was approved by the Bioethics Committee of the Urals Research Center for Radiation Medicine² (Minutes No. 1, of 3 Apr. 2023).

Potential conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

✉ Natalya I. Atamanyuk vita_pulhira@mail.ru

Received: 6 Oct. 2025 **Revised:** 31 Oct. 2025 **Accepted:** 19 Nov. 2025 **Online first:** 30 Dec. 2025

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к радиационной нейробиологии в последнее время возрос в связи с исследованиями в области космической медицины и необходимостью защиты от космической радиации при планируемых в будущем пилотируемых межпланетных перелетах. Особенности космической радиации, представленной радиационными поясами Земли (протоны и электроны), солнечными космическими лучами (протоны) и галактическими космическими лучами (ускоренные ионы водорода и гелия, тяжелые заряженные частицы), приводят к существенной неравномерности дозы облучения как в пространстве, так и во времени, поскольку солнечные протонные события практически непредсказуемы. Поэтому для космической радиобиологии особую важность имеют исследования эффектов хронического и фракционированного длительного облу-

чения, в том числе изучение механизмов нарушений со стороны центральной нервной системы [1]. Кроме того, всесторонний анализ влияния длительного, хронического или фракционированного облучения на головной мозг обусловлен необходимостью защиты здоровья профессионалов в области ядерной индустрии, а также использованием лучевой терапии онкологических пациентов и широким применением дающих лучевую нагрузку медицинских диагностических процедур.

Для ряда радиационно-индуцированных эффектов со стороны центральной нервной системы установлена причинно-следственная связь с радиационным воздействием и определены пороговые значения поглощенной дозы: так, при остром облучении свыше 1–2 Гр у взрослых или свыше 0,1 Гр у детей раннего возраста возможно повышение риска когнитивных дисфункций (публикация 118 Международной комиссии по радиологической защите³). Когнитивная

² Currently — South Ural Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics.

³ ICRP Statement on tissue reactions. Early and late effects of radiation in normal tissues and organs — threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2); 2012.

дисфункция, выражающаяся в ухудшении памяти или снижении способности к обучению у людей, нарушении пространственной обучаемости, функции распознавания новых объектов, принятия решений у грызунов, связана с радиационными эффектами, в первую очередь в области гиппокампа [2]. Механизмы этих нарушений включают радиационный окислительный стресс, который нарушает нормальную пролиферацию и дифференцировку нейрональных стволовых клеток, синаптическую пластичность, вызывает активацию провоспалительных цитокинов, в высоких дозах — приводит к гибели нейронов [2].

Относительно других последствий воздействия ионизирующего излучения на головной мозг имеется меньше эпидемиологических и экспериментальных данных. Так, в ряде работ обсуждается вопрос повышения риска развития нейродегенеративных заболеваний в отдаленном периоде после облучения [3]. В когорте российских работников атомной промышленности, подвергавшихся хроническому облучению в ходе профессиональной деятельности на предприятии по производству ядерного топлива (ПО «Маяк», г. Озерск, Челябинская область), анализ зависимости «доза — реакция» с учетом нерадиационных факторов (пол, возраст) показал взаимосвязь между частотой развития болезни Паркинсона и кумулятивной дозой от внешнего гамма-излучения [4].

При исследовании причин смерти во французской когорте работников атомной промышленности (SELTINE, 1968–2014 гг.) были установлены статистически значимые зависимости «доза — риск» в отношении повышения риска смертности от лейкемии и деменции, хотя авторы отмечали, что на данном этапе наблюдаемую связь между риском смерти от деменции и низкой дозой облучения следует интерпретировать с осторожностью [5]. Однако для ситуации острого облучения в диапазоне доз 0–4 Гр (японская когорта выживших после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки) исследования не выявили повышения частоты деменций [6], а также корреляции между возрастным снижением когнитивных функций и дозой облучения [7].

M.R. Motamed и соавт. установили, что пациенты с рассеянным склерозом в период до появления симптомов, связанных с этим заболеванием, и подтверждения диагноза чаще подвергались диагностическому или терапевтическому рентгеновскому облучению и имели более высокую общую накопленную дозу, чем не страдающие рассеянным склерозом люди контрольной группы, на основании чего авторами был сделан вывод о возможной взаимосвязи между дозой рентгеновского облучения и риском развития этого заболевания [8].

В работе J. Lopes и соавт. были оценены риски развития нераковых заболеваний центральной нервной системы при облучении во взрослом возрасте и показан значимый положительный относительный риск развития цереброваскулярных заболеваний и болезни Паркинсона; однако авторы отметили ряд методологических проблем, таких как сложности реконструкции индивидуальных доз облучения и ограниченный учет потенциальных искажающих факторов [9]. Сложности в изучении механизмов влияния ионизирующего излу-

чения на нейродегенеративные и возрастные изменения определяются длительностью периода от облучения до возможного развития признаков заболевания.

В настоящее время наблюдается нехватка лонгитюдных исследований для установления причинно-следственных связей между дозой облучения и возможными рисками развития нейродегенеративных заболеваний [2, 3].

В то же время попытки по изучению взаимосвязи развития нейродегенеративных заболеваний в отдаленном периоде после облучения на экспериментальных животных не предпринято [3]. С одной стороны, провоспалительная активация микроглии и окислительный стресс, обусловленные воздействием облучения, повышают риск развития нейродегенеративных процессов, с другой стороны, определенные режимы облучения в эксперименте оказывали нейропротективное действие в модели болезни Альцгеймера у трансгенных животных [10].

Одним из простых и эффективных способов экспериментальной (с использованием лабораторных животных) оценки симптомов нейродегенеративных заболеваний является исследование моторной функции [11]. Сенсомоторные эффекты, измеряемые у животных после экспериментальных воздействий, косвенно указывают на наличие изменений и других поведенческих параметров, таких как когнитивные функции и эмоции [12]. Для оценки сенсомоторных функций у грызунов был разработан ряд поведенческих тестов, позволяющих оценить скорость обработки сенсомоторной информации, локомоторную функцию, баланс, силу захвата и координацию движений, ориентировочно-исследовательскую реакцию и т.д. [12].

Цель исследования — изучение ранних и отдаленных изменений сенсомоторных показателей, характеризующих координацию у лабораторных животных, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-излучению в различных дозах.

Данная работа является продолжением опубликованных ранее исследований по изучению ранних изменений сенсомоторных показателей у подвергнутых фракционированному облучению мышей [13]. Работа дополняет полученные прежде результаты информацией о впервые выявленном нарушении координации у облученных животных в отдаленном периоде после облучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент выполнен на мышах обеих полов ($n = 400$) линии C57Bl/6 (SPF (Specific Pathogen Free), виварий ИЦиГ СО РАН, г. Новосибирск). Животные были подвергнуты фракционированному гамма-облучению в раннем возрасте, с рождения до 30 сут. Далее 4 раза в течение 18 мес. проводили оценку сенсомоторных показателей у облученных животных. Формировали 5 групп наблюдения: 2 контрольные группы и 3 группы с различными уровнями облучения по 80 особей каждая (40 самцов и 40 самок). С возрастом число обследованных животных постепенно уменьшалось из-за естественной гибели части из них.

Группы облученных животных включали группы «5 Гр» ($n = 80$), «1 Гр» ($n = 80$) и «0,1 Гр» ($n = 80$). Мышей

этих групп облучали в кумулятивных дозах 5, 1 и 0,1 Гр, в каждом случае кумулятивная доза была разделена на 20 равных фракций по 0,25, 0,05 и 0,005 Гр соответственно. Облучение проводили в течение 4 недель по 5 дней в неделю на экспериментальной радиобиологической установке ИГУР-1М (ЗАО «Квант», Россия), оснащенной ^{137}Cs -источниками. При облучении в разовых дозах 0,25 и 0,05 Гр мощность дозы составляла 0,72 Гр/мин, для получения разовой дозы 0,005 Гр использовали свинцовые коллиматоры (мощность дозы при использовании коллиматоров составляла 10 мГр/мин). Неравномерность гамма-поля в рабочем пространстве установки не превышала 10%. Облучали мышей в клетках их постоянного содержания, удаляя на время облучения кормящих самок.

Контрольные группы необлученных мышей включали: группы интактных животных — биологический контроль (БК) ($n = 80$) и группа ложного облучения (0 Гр) ($n = 80$). С животными группы «0 Гр» проводили те же манипуляции, что и с животными из групп облучения (за исключением облучения), для учета влияния на изучаемые показатели фактора стресса, связанного с перемещением животных и кратковременным отлучением от матери.

После завершения облучения животных в возрасте 28–30 сут перемещали в отдельные клетки (по 10 самцов и самок) для их постоянного содержания в условиях конвенционального вивария (при температуре 22 ± 2 °C, неограниченном доступе к питьевой воде и полнорационному гранулированному корму).

Для оценки сенсомоторной функции тестировали животных в возрасте 1, 6, 12 и 18 мес.

Тест ходьбы по сужающейся перекладине (raised-beam walking), предназначенный для оценки моторного дефицита главным образом задних конечностей, позволяет выявить патологии моторной коры и оценивать координацию у грызунов [14, 15]. В тесте оценивали способность животного перемещаться по приподнятой над поверхностью сужающейся двухуровневой перекладине длиной 1 м. В течение 2 дней мышей обучали перемещаться по перекладине, достигая безопасного укрытия. На 3 день регистрировали перемещение мыши по установке на видео (фотокамера Sony $\alpha 37$).

Регистрировали общее время, затраченное на прохождение перекладины от точки старта до укрытия, соскальзывания лап с поверхности перекладины, падения, количество постановок конечностей на нижнюю планку (ошибок) [14, 15]. Параметры регистрировали с использованием программы RealTimer (ООО «НПК Открытая Наука», Россия). Если при тестировании на 3 день животное падало с установки или не доходило до укрытия, его исключали из дальнейшего анализа (в каждой экспериментальной группе число таких животных не превышало 1–2 особи).

Результаты выражали в виде средних значений и стандартных ошибок ($M \pm SE$). Так как все анализируемые показатели соответствовали нормальному распределению по критерию Колмогорова – Смирнова, сравнение средних значений в экспериментальных и контрольных группах проводили с использованием параметрических методов по t -критерию Стьюдента.

Результаты считали статистически значимыми при $\alpha = 0,05$.

Для оценки взаимосвязи изучаемых показателей, характеризующих сенсомоторную функцию у животных, проводили корреляционный анализ Пирсона. Для описания влияния возраста на исследуемые показатели применяли регрессионный анализ. Многофакторный дисперсионный анализ признаков сопряженности в главной линейной модели использовали для выявления влияния дозы облучения и других сопутствующих факторов (пол, возраст, связанный с облучением стресс). При оценке фактора стресса принимали, что только интактные животные в группе БК не испытывали стресс, связанный с процедурой облучения в раннем возрасте. Данные анализировали в программе Microsoft Excel и с использованием языка программирования R⁴. Осуществляли попарное сравнение значений показателей в различных дозовых группах для установления значимости различий между группами, облученными в разных дозах. Для этого проводили нормирование по возрасту и полу и последующий *post-hoc* анализ в однофакторном дисперсионном анализе с поправкой Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе теста ходьбы по сужающейся перекладине регистрировали время, за которое животное преодолевает расстояние в 1 м по приподнятой над поверхностью сужающейся перекладине, а также такие события, как постановки конечностей на нижнюю планку установки (ошибки), соскальзывания конечностей с перекладины, остановки.

В таблице 1 приведены измеренные показатели теста ходьбы по сужающейся дорожке у мышей в разных экспериментальных группах. Как правило, отмечали более низкое число ошибок, остановок и/или меньшее время прохождения сужающейся дорожки у самок по сравнению с самцами в одной группе. Так, статистически значимые отличия между значениями показателей у самцов и самок отмечены в возрасте 1 мес. в группах «0 Гр» и «1 Гр» по параметру общего времени ходьбы, в группе «0,1 Гр» — по числу ошибок.

В возрасте 6 мес. у самок было статистически значимо меньше, чем у самцов, число остановок в группе БК, число ошибок — в группе «0,1 Гр», время ходьбы — в группе «1 Гр». В 12 мес. статистически значимое сокращение общего времени ходьбы у самок выявлено в группах БК, «0,1 Гр» и «1 Гр»; числа остановок — в группах «0,1 Гр» и «1 Гр»; числа соскальзываний — в группах БК и «5 Гр»; числа ошибок — в группах «0 Гр» и «0,1 Гр». В 18 мес. сокращение общего времени ходьбы отмечено в группах БК, «0 Гр» и «1 Гр», а числа остановок — в группах БК, «0 Гр» и «0,1 Гр» (табл. 1).

При сравнении показателей сенсомоторной функции у необлученных мышей групп «0 Гр» и БК нельзя сделать определенные выводы о влиянии фактора стресса на данные показатели. Так, если в 1 мес. самки группы «0 Гр» делали меньше ошибок, чем самки в группе БК, то в 6 мес., наоборот, число ошибок у самок «0 Гр» стало статистически значимо выше, чем в группе БК. В 12 мес. у животных обоих полов

⁴ R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. <https://www.R-project.org>

Таблица 1. Показатели теста ходьбы по сужающейся дорожке у мышей в разных экспериментальных группах

Возраст, мес.	Группа	Пол	Ошибки	Соскальзывания	Общее время ходьбы, с	Остановки
1	БК	♂ (n = 40)	8 ± 0,50	0,8 ± 0,18	5,6 ± 0,28	3,2 ± 0,51
		♀ (n = 40)	8,5 ± 0,77	0,7 ± 0,24	5,4 ± 0,21	2,8 ± 0,34
	0 Гр	♂ (n = 37)	7,2 ± 0,83	0,7 ± 0,22	5,7 ± 0,31	3,2 ± 0,38
		♀ (n = 37)	6,5 ± 0,51*	0,6 ± 0,21	4,8 ± 0,24 [□]	2,6 ± 0,38
	0,1 Гр	♂ (n = 40)	7,6 ± 0,78	0,7 ± 0,19	4,2 ± 0,13**	2 ± 0,37*
		♀ (n = 40)	4,8 ± 0,42** [□]	0,6 ± 0,24	4,2 ± 0,22*	1,8 ± 0,24*
	1 Гр	♂ (n = 40)	8 ± 0,89	0,7 ± 0,22	5 ± 0,24	2,8 ± 0,40
		♀ (n = 41)	6,6 ± 0,64	0,7 ± 0,18	4,3 ± 0,16* [□]	1,9 ± 0,24*
	5 Гр	♂ (n = 40)	9,1 ± 0,86	0,8 ± 0,17	5,4 ± 0,28	2,5 ± 0,30
		♀ (n = 39)	7,4 ± 0,65	0,8 ± 0,23	5 ± 0,22	2 ± 0,25
6	БК	♂ (n = 40)	7,6 ± 0,55	0,9 ± 0,15	6,2 ± 0,21	3 ± 0,28
		♀ (n = 40)	6,9 ± 0,62	0,5 ± 0,10	6 ± 0,24	2,1 ± 0,24 [□]
	0 Гр	♂ (n = 40)	9,8 ± 1,01	0,7 ± 0,13	6,4 ± 0,35	3,5 ± 0,44
		♀ (n = 40)	9,6 ± 0,78*	0,5 ± 0,09	5,8 ± 0,25	2,8 ± 0,32
	0,1 Гр	♂ (n = 40)	10,3 ± 0,77*	0,7 ± 0,13	5,1 ± 0,21**	2,3 ± 0,20*
		♀ (n = 39)	7,7 ± 0,48* [□]	0,4 ± 0,08	4,7 ± 0,25**	1,9 ± 0,23*
	1 Гр	♂ (n = 40)	10,6 ± 0,76*	1 ± 0,15	5,8 ± 0,24	2,8 ± 0,33
		♀ (n = 40)	10,3 ± 0,76*	0,9 ± 0,15*	5 ± 0,17* [□]	2,7 ± 0,34
	5 Гр	♂ (n = 40)	8,8 ± 0,57	0,8 ± 0,13	5,4 ± 0,24**	2,6 ± 0,32
		♀ (n = 39)	8,8 ± 0,76	0,7 ± 0,12	4,8 ± 0,20**	2,4 ± 0,30
12	БК	♂ (n = 40)	9,8 ± 0,73	1,3 ± 0,17	6,8 ± 0,26	3,2 ± 0,44
		♀ (n = 40)	8 ± 0,75	0,6 ± 0,13 [□]	6 ± 0,24 [□]	2,6 ± 0,28
	0 Гр	♂ (n = 40)	7,1 ± 0,68*	0,6 ± 0,11*	5,4 ± 0,22*	3 ± 0,31
		♀ (n = 40)	9,9 ± 0,74 [□]	0,4 ± 0,11	4,7 ± 0,25*	2,3 ± 0,35
	0,1 Гр	♂ (n = 40)	9,9 ± 0,77*	0,5 ± 0,11*	5,1 ± 0,19*	2,4 ± 0,27
		♀ (n = 38)	7,6 ± 0,66* [□]	0,4 ± 0,09	4,6 ± 0,14* [□]	1,5 ± 0,23* [□]
	1 Гр	♂ (n = 40)	8,8 ± 0,87	0,4 ± 0,10*	6,1 ± 0,25*	2,9 ± 0,29
		♀ (n = 40)	9,8 ± 0,65	0,4 ± 0,09	5,2 ± 0,19* [□]	1,9 ± 0,25 [□]
	5 Гр	♂ (n = 37)	11,3 ± 0,83*	0,8 ± 0,14*	6,3 ± 0,38*	2,8 ± 0,40
		♀ (n = 34)	9,9 ± 0,78	0,4 ± 0,10 [□]	6,3 ± 0,28*	2 ± 0,32
18	БК	♂ (n = 24)	8,8 ± 0,70	0,2 ± 0,08	7,7 ± 0,39	4,9 ± 0,59
		♀ (n = 32)	9,3 ± 0,75	0,3 ± 0,09	6,4 ± 0,23 [□]	3 ± 0,37 [□]
	0 Гр	♂ (n = 38)	6 ± 0,79*	0,4 ± 0,10	9,5 ± 0,52*	4,7 ± 0,46
		♀ (n = 32)	8,1 ± 1,01	0,4 ± 0,12	6,3 ± 0,36 [□]	2,9 ± 0,40 [□]

Возраст, мес.	Группа	Пол	Ошибки	Соскальзывания	Общее время ходьбы, с	Остановки
18	0,1 Гр	♂ (n = 29)	8,6 ± 0,81*	0,6 ± 0,15*	5,8 ± 0,34**	2,9 ± 0,44**
		♀ (n = 26)	7,5 ± 0,86	0,3 ± 0,12	5,1 ± 0,21**	1,7 ± 0,27**□
	1 Гр	♂ (n = 38)	10,2 ± 0,63*	0,4 ± 0,11	7 ± 0,33*	3,3 ± 0,26**
		♀ (n = 39)	10 ± 0,65	0,7 ± 0,15*	5,8 ± 0,27□	2,6 ± 0,36
	5 Гр	♂ (n = 34)	13,2 ± 0,76**	0,8 ± 0,13*	7,2 ± 0,34*	3,9 ± 0,43
		♀ (n = 26)	11,9 ± 0,89**	0,5 ± 0,10	6,5 ± 0,30	3,4 ± 0,38

Таблица составлена авторами по собственным данным

Примечание: БК — биологический контроль; * — статистически значимые отличия от показателя в группе БК соответствующего возраста, $p < 0,05$; ** — статистически значимые отличия от значения показателя в группе «0 Гр» соответствующего возраста, $p < 0,05$; □ — статистически значимые отличия показателя самок от самцов той же группы, $p < 0,05$.

Таблица 2. Результаты многофакторного дисперсионного анализа

Факторы	Сенсомоторные показатели в тесте ходьбы по сужающейся перекладине							
	Общее время ходьбы		Ошибки		Соскальзывания		Остановки	
	F	p	F	p	F	p	F	p
Возраст	71,4	<0,001	15,1	<0,001	7,6	0,001	13,0	<0,001
Доза	27,7	<0,001	12,2	<0,001	3,7	0,012	13,0	<0,001
Стресс	2,61	0,11	0,72	0,40	7,5	0,006	0,22	0,64
Пол	74,2	<0,001	6,1	0,014	16,5	<0,001	43,8	<0,001

Таблица составлена авторами по собственным данным

Примечание: p — уровень статистической значимости различий.

в группе «0 Гр» общее время ходьбы было меньше, чем в БК, при этом у самцов также снижено относительно БК число соскальзываний и ошибок, что можно интерпретировать как улучшение координации. В 18 мес. у самцов группы «0 Гр» статистически значимо меньше ошибок, чем в группе БК, но больше общее время ходьбы (табл. 1).

Возрастное нарушение координации является одним из признаков изменения сенсомоторных функций, сопровождающих нейродегенеративные заболевания. Отмечено снижение координации по мере старения животных, что проявляется в увеличении времени прохождения дорожки и повышении числа остановок. У необлученных животных (группы БК и 0 Гр) при проведении регрессионного анализа было отмечено, что зависимость между возрастом и анализируемыми показателями лучше всего описывалась линейной функцией. Выявлено статистически значимое влияние возраста на общее время ходьбы ($R^2 = 0,06$; $F = 29,5$; $p < 0,001$), что проявлялось в увеличении времени ходьбы в среднем на $0,112 \pm 0,021$ с за каждый месяц. Также были выявлены статистически значимая положительная линейная связь между возрастом и числом остановок при прохождении перекладины ($R^2 = 0,03$; $F = 12,6$; $p < 0,001$) и отрицательная связь между возрастом и числом соскальзываний

($R^2 = 0,02$; $F = 7,6$; $p = 0,006$). При проведении регрессионного анализа не зафиксировано статистически значимой связи между возрастом и числом ошибок ($F = 1,3$; $p = 0,26$).

В многофакторном дисперсионном анализе с использованием главной линейной модели для оценки влияния изучаемых факторов на показатели сенсомоторной функции показано, что такие факторы, как возраст, доза облучения и пол, оказывали статистически значимое влияние на все исследуемые сенсомоторные показатели (табл. 2), тогда как статистически значимое влияние фактора стресса отмечено только для числа соскальзываний конечности ($F = 7,5$; $p = 0,006$). Исходя из результатов многофакторного дисперсионного анализа, время, необходимое для прохождения перекладины, с возрастанием дозы облучения увеличивалось с возрастом больше у самцов, чем у самок. Однако зависимость от дозы облучения носила нелинейный характер: минимальные значения времени характерны для облученных животных в дозе 0,1 Гр, а у облученных в дозе 5 Гр этот показатель достигал значений необлученного контроля. Такие же закономерности отмечены для числа остановок при прохождении теста. Число ошибок при прохождении перекладины увеличивалось и с возрастом мышей, и с дозой облучения линейно, максимально при облучении в дозе 5 Гр, при этом

более выражено у самцов, чем у самок. Число соскальзываний уменьшалось с возрастом, но увеличивалось с дозой облучения в большей степени у самцов, чем у самок.

Для оценки влияния фактора облучения на показатели сенсомоторной функции у мышей учитывали выявленные половые и возрастные отличия. Для этого изучаемые параметры были стандартизованы по полу и возрасту: значения показателей у необлученных животных приняты за 1, а измерения для облученных самцов и самок отнесены к среднему значению соответствующего показателя самцов или самок в группе такого же возраста. При этом, поскольку многофакторный анализ не выявил существенного влияния фактора стресса на исследуемые показатели, а при сравнении групп «0 Гр» и БК по критерию Стьюдента отличия в разном возрасте носили несистемный характер, для описания изменения сенсомоторных показателей у облученных животных их сравнивали с объединенной контрольной группой (БК + «0 Гр»). Зависимость исследуемых параметров от дозы фракционированного облучения для животных разного возраста представлена на рисунках 1–4.

Показано влияние дозы фракционированного гамма-облучения на сенсомоторную функцию. Однако зависимость исследуемых параметров от дозы носила нелинейный характер. Выявлен длительно сохраняющийся (по меньшей мере до возраста 18 мес. у мышей) эффект улучшения сенсомоторных показателей (координации) у животных при облучении в дозе 0,1 Гр относительно необлученных животных. Так, в любом возрасте у животных группы «0,1 Гр» время, требуемое для прохождения перекладины, и число остановок были статистически значимо ниже, чем у необлученных животных (рис. 1, 2). Общее время ходьбы сокращалось на 15–30%, а число остановок — на 25–40%.

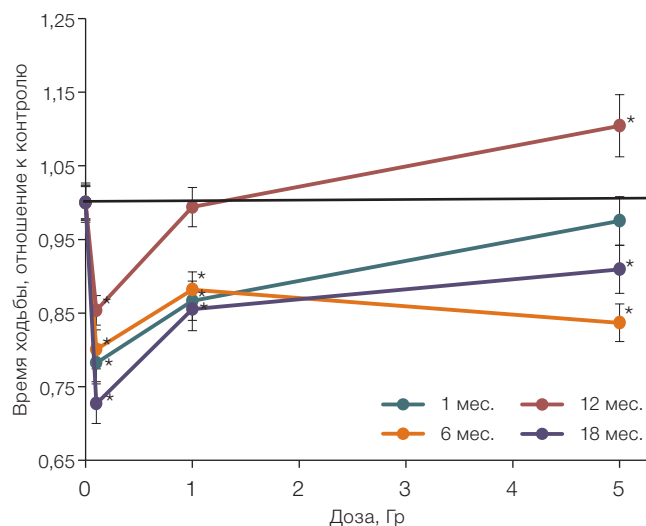


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 1. Изменение времени ходьбы по сужающейся перекладине у мышей, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-облучению в различных дозах: * — уровень статистической значимости различий по сравнению с группой необлученного контроля

В возрасте 1 мес. в этой группе также было статистически значимо снижено число ошибок (рис. 3), составлявшее в контроле $7,6 \pm 0,33$, а в группе «0,1 Гр» $6,2 \pm 0,50$ ($t = 2,28$; $p = 0,023$).

В возрасте 12 мес. отмечено снижение числа соскальзываний (рис. 4) до $0,4 \pm 0,11$ по сравнению с $0,70 \pm 0,071$ в контроле ($t = 2,46$; $p = 0,01$). Уменьшение этих параметров можно интерпретировать как длительно сохраняющееся улучшение координации у животных, облученных в дозе «0,1 Гр».

В группе «1 Гр» время ходьбы было статистически значимо меньше на 10–15%, чем в необлученном контроле, в возрасте 1, 6 и 18 мес. (рис. 1), число остановок — на 20% в возрасте 1 и 18 мес. (рис. 2), число соскальзываний — на 10% в 1 мес. и на 40% в 12 мес. (рис. 4). С другой стороны, число ошибок, совершаемых при прохождении теста животными группы «1 Гр», превышало контрольные значения в возрасте 6 мес: $10,4 \pm 0,52$ ошибки по сравнению с $8,5 \pm 0,39$ ошибок в контроле ($t = 3,03$; $p = 0,003$) и 18 мес.: $10,1 \pm 0,54$ ошибок по сравнению с $7,9 \pm 0,43$ ошибок в контроле ($t = 3,36$; $p < 0,001$); соответствующие данные представлены на рисунке 3.

При увеличении дозы облучения до 5 Гр общее время ходьбы и число ошибок и соскальзываний увеличивалось, не превышая, однако, контрольных значений до возраста 12 мес. При облучении животных в дозе 5 Гр время прохождения дорожки было статистически значимо снижено по сравнению с контролем в возрасте 6 и 18 мес. (рис. 1), а в возрасте 12 мес. отмечено увеличение среднего времени ходьбы до $6,3 \pm 0,2$ с по сравнению с $5,7 \pm 0,1$ с в контроле ($t = 2,46$; $p = 0,014$). Число остановок в этой группе было меньше, чем в контроле, только у животных в возрасте 1 мес.: $2,3 \pm 0,22$ остановки по сравнению с $3,0 \pm 0,20$ остановок в контроле ($t = 2,39$; $p = 0,018$)

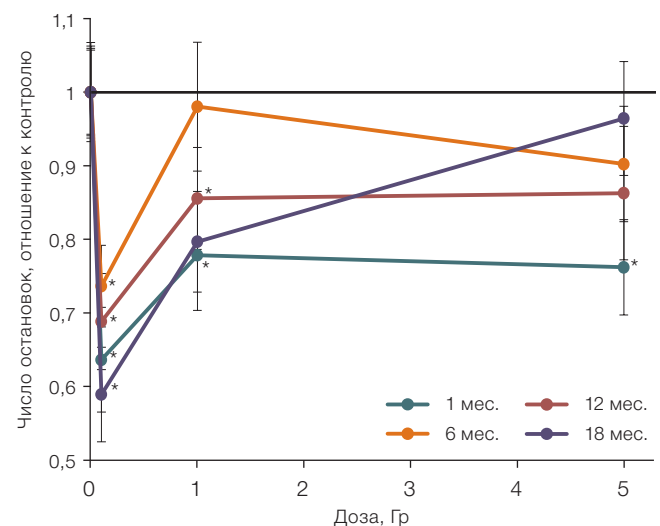


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 2. Изменение числа остановок при ходьбе по сужающейся перекладине у мышей, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-облучению в различных дозах: * — уровень статистической значимости различий по сравнению с группой необлученного контроля

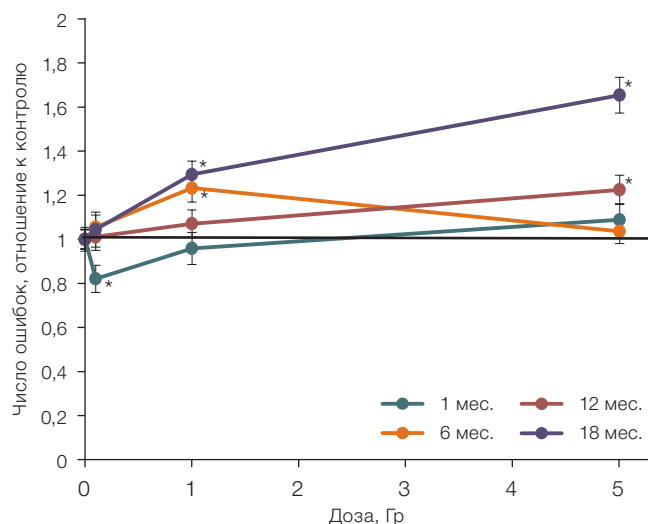


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 3. Изменение числа ошибок при ходьбе по сужающейся перекладине у мышей, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-облучению в различных дозах: * — уровень статистической значимости различий по сравнению с группой необлученного контроля

(рис. 2). При этом в отдаленном периоде после облучения в дозе 5 Гр статистически значимо увеличилось число ошибок в выполнении теста мышами в возрасте 12 мес.: $10,6 \pm 0,63$ ошибок против $8,7 \pm 0,37$ ошибок в контроле ($t = 2,68$; $p = 0,008$); в возрасте 18 мес.: $12,7 \pm 0,61$ ошибок против $7,9 \pm 0,43$ ошибок в контроле ($t = 6,52$; $p < 0,001$) (рис. 3). В возрасте 18 мес. также возросло до $0,72 \pm 0,13$ число соскальзываний конечностей с дорожки при значении этого показателя в контроле $0,36 \pm 0,05$ ($t = 3,05$; $p = 0,002$) (рис. 4). Эти изменения указывают на ухудшение сенсомоторных показателей у животных в отдаленном периоде после завершения фракционированного облучения.

Таким образом, в последний срок обследования (в возрасте 18 мес.) отмечены признаки снижения способности к координации у животных, облученных в кумулятивной дозе 5 Гр: хотя общее время ходьбы не отличалось от такового у необлученных животных, мыши группы «5 Гр» делали статистически значимо больше ошибок и допускали больше соскальзываний конечностей с перекладины. Такие изменения можно интерпретировать как признаки более раннего, чем в контрольной группе, возрастного изменения сенсомоторной функции.

Проведены попарные сравнения значений показателей в различных дозовых группах, нормированных по полу и возрасту, с помощью *post-hoc* анализа в однофакторном дисперсионном анализе с поправкой Бонферрони. Выявлено, что по критерию времени ходьбы и числу остановок группа «0,1 Гр» статистически значимо отличается от всех остальных экспериментальных групп ($p < 0,001$), а группы «1 Гр» и «5 Гр» не имеют значимых отличий по этим показателям друг от друга. По числу ошибок группа «0,1 Гр» статистически значимо отличается от групп «1 Гр» и «5 Гр» ($p < 0,001$), но не имеет отличий от необлученных животных, тогда

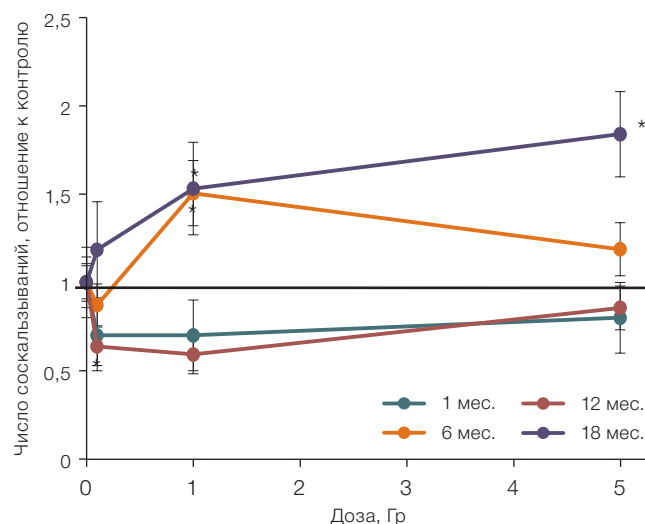


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 4. Изменение числа соскальзываний при ходьбе по сужающейся перекладине у мышей, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-облучению в различных дозах: * — уровень статистической значимости различий по сравнению с группой необлученного контроля

как между группами «5 Гр» и «1 Гр» нет значимых отличий по этому показателю. Стандартизованное число соскальзываний в группе «0,1 Гр» меньше, чем в группе «5 Гр» ($p = 0,039$).

Корреляционный анализ выявил наличие умеренной прямой корреляционной связи между различными параметрами теста ходьбы по сужающейся перекладине друг с другом. Так, показана умеренная прямая корреляционная зависимость между временем ходьбы и числом остановок ($r = 0,67$; $p < 0,001$), а также выявлена связь между возрастом и общим временем ходьбы ($r = 0,32$; $p < 0,001$). Полученные данные позволяют верифицировать пригодность использованного инструмента для оценки координации у животных. При нарушении координации животное цепко держится за перекладину, боясь падения, что удлиняет время ходьбы по перекладине, а чем лучше у животного координация, тем меньше общее время ходьбы, тем меньше животное допускает ошибок, реже оступается и останавливается.

Рассматриваемые в данной работе исследования сенсомоторной функции у облученных в раннем возрасте мышей являются частью более крупного эксперимента по оценке различных параметров высшей нервной деятельности и состояния головного мозга при фракционированном облучении. Так, например, в возрасте 2 мес. у животных, облученных в кумулятивной дозе 0,1 Гр, нами была выявлена стимуляция когнитивной функции (пространственной обучаемости) в лабиринте Барнса [16], а в течение всей жизни у этих же мышей отмечалось более тревожное, неадекватное поведение в тесте закапывания стеклянных шариков [17]. При иммуногистохимическом исследовании зубчатой извилины гиппокампа у облученных в дозе 0,1 Гр мышей нами была обнаружена существенная стимуляция нейрогенеза (повышенное содержание

PROM1⁺ клеток), а также увеличение доли и числа GAP43⁺ клеток, экспрессирующих нейромодулин, ассоциированный с формированием синапсов [16]. Вероятно, изменения нейрогенеза и синаптической пластичности, а также стимуляция пространственной обучаемости и более выраженное неопобное поведение, повышение тревожности у облученных в дозе 0,1 Гр животных могут иметь отношение и к описанному здесь повышению скорости движения животных по приподнятой сужающейся перекладине.

В некоторых исследованиях представлены данные о нарушении координации животных в тесте подъема по перекладинам сразу после фракционированного облучения (5 фракций по 0,1 Гр рентгеновского излучения ежедневно, кумулятивная доза 0,5 Гр) [18], сопровождающееся также повышением тревожности животных и их двигательной активности в тесте открытого поля. В нашей работе не выявлено ранних нарушений координации при облучении в кумулятивных дозах 0,1–5 Гр, однако нужно учесть и другой, более протяженный режим фракционирования с меньшими дозами на каждую фракцию облучения.

В отдаленном периоде другими авторами описаны изменения сенсомоторной функции, выявленные в тесте реакции на акустический испуг: после однократного облучения в возрасте 10 недель в дозе 0,5 Гр у животных отмечалось снижение скорости реакции на звуковой раздражитель, эффект сохранялся до возраста 12 мес., а в возрасте 12 и 18 мес. у этих животных была снижена двигательная активность в тесте открытого поля [19]. При облучении же в малой дозе (0,063 Гр) не было обнаружено ранних эффектов, а в возрасте 18 мес. было показано повышение исследовательской активности животных в открытом поле и улучшение реакции на акустический испуг по сравнению с контрольными животными. Эти данные согласуются с полученными в нашей работе эффектами облучения в малой (0,1 Гр) и большой (5 Гр) дозах.

В целом нейропротективное действие облучения в малых дозах по таким критериям, как снижение провоспалительной активации микроглии, стимуляция когнитивной функции и нейрогенеза, показано в ряде

работ [10]. При облучении в больших дозах основными механизмами снижения когнитивных функций считаются нарушение взрослого нейрогенеза в нейрогенных нишах головного мозга (в гиппокампе и мозжечке), провоспалительная активация микроглии, нарушение окислительно-восстановительного статуса, энергетического обмена и функции митохондрий [2]. Эти же эффекты наряду с когнитивными изменениями потенциально могут приводить и к нарушению координации. Так, есть данные о снижении активности нейрогенеза и развитии нейровоспаления в мозжечке у крыс после фракционированного облучения в высоких дозах [20], хотя в данной работе не оценивали моторную функцию у облученных животных. В продолжение проведенного нами анализа можно рекомендовать провести гистологические исследования мозжечка и моторной коры подвергнутых фракционированному облучению в кумулятивной дозе 0,1 и 5 Гр животных в отдаленном периоде после облучения для поиска морфологических коррелятов выявленных поведенческих изменений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены изменения сенсомоторных показателей, характеризующих координацию у лабораторных животных, подвергнутых в раннем возрасте фракционированному гамма-излучению в различных дозах. Фракционированное гамма-облучение вызывает разнонаправленные, зависящие от дозы изменения сенсомоторной функции у мышей как в раннем, так и в отдаленном периоде. Сразу после завершения фракционированного облучения показано стимулирующее влияние облучения в кумулятивной дозе 0,1 Гр на сенсомоторные показатели у мышей; обнаруженное улучшение координации при облучении в дозе 0,1 Гр сохранялось вплоть до возраста 18 мес. При облучении в кумулятивной дозе 5 Гр впервые в эксперименте выявлены признаки ухудшения координации движений у мышей в отдаленном периоде после облучения, при этом в первые 6 мес. после облучения признаков нарушения сенсомоторной функции не выявлено.

Литература / References

1. Ушаков ИБ. Современные достижения и актуальные задачи космической радиобиологии. *Клинический вестник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна*. 2022;2:26–33. Ushakov IB. Current Achievements and Relevant Tasks of Space Radiobiology. *A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center Clinical Bulletin*. 2022;2:26–33 (In Russ.). <https://doi.org/10.33266/2782-6430-2022-2-26-33>
2. Kumar R, Kumari P, Kumar R. Central nervous system response against ionizing radiation exposure: cellular, biochemical, and molecular perspectives. *Molecular Neurobiology*. 2025;62(6):7268–95. <https://doi.org/10.1007/s12035-025-04712-z>
3. Sharma NK, Sharma R, Mathur D, Sharad S, Minhas G, Bhatia K, et al. Role of ionizing radiation in neurodegenerative diseases. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2018;10:134. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00134>
4. Azizova TV, Bannikova MV, Grigoryeva ES, Rybkina VL, Hamada N. Occupational exposure to chronic ionizing radiation increases risk of Parkinson's disease incidence in Russian Mayak workers. *International Journal of Epidemiology*. 2020;49(2):435–47. <https://doi.org/10.1093/ije/dyz230>
5. Laurent O, Samson E, Caër-Lorho S, Fournier L, Laurier D, Leuraud K. Updated mortality analysis of SELTINE, the French cohort of nuclear workers, 1968–2014. *Cancers*. 2022;15(1):79. <https://doi.org/10.3390/cancers15010079>
6. Kinoshita H, Tanaka K, Nakao R, Iso F, Honda S, Tanaka G, et al. Comparison of mental cognitive function of A-bomb survivors and non-A-bomb survivors in Nagasaki. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*. 2019;73(9):594. <https://doi.org/10.1111/pcn.12898>
7. Ishihara K, Kato N, Misumi M, Kitamura H, Hida A, Yamada M. Radiation effects on late-life neurocognitive function in childhood atomic bomb survivors: a radiation effects research foundation adult health study. *Radiation Research*. 2022;197(4):403–7. <https://doi.org/10.1667/RADE-21-00122.1>

8. Motamed MR, Fereshtehnejad SM, Abbasi M, Sanei M, Abbaslou M, Meysami S. X-ray radiation and the risk of multiple sclerosis: Do the site and dose of exposure matter? *Medical Journal of the Islamic Republic of Iran*. 2014;28:145.
9. Lopes J, Leuraud K, Klokov D, Durand C, Bernier MO, Baudin C. Risk of developing non-cancerous central nervous system diseases due to ionizing radiation exposure during adulthood: systematic review and meta-analyses. *Brain Science*. 2022;12(8):984.
<https://doi.org/10.3390/brainsci12080984>
10. Boyd A, Byrne S, Middleton RJ, Banati RB, Liu GJ. Control of Neuroinflammation through Radiation-Induced Microglial Changes. *Cells*. 2021;10(9):2381.
<https://doi.org/10.3390/cells10092381>
11. Fleming SM, Ekhaton OR, Ghisays V. Assessment of sensorimotor function in mouse models of Parkinson's disease. *JoVE*. 2013;(76):50303.
<https://doi.org/10.3791/50303>
12. Curzon P, Zhang M, Radek RJ, Fox GB. The behavioral assessment of sensorimotor processes in the mouse: acoustic startle, sensory gating, locomotor activity, rotarod, and beam walking. In: Buccafusco JJ, editor. *Methods of Behavior Analysis in Neuroscience*; 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis; 2009.
13. Атаманюк НИ, Обвинцева НА, Перетыкин АА, Андреев СС, Тюхай МВ, Стяжкина ЕВ и др. Влияние фракционированного гамма-излучения в раннем постнатальном периоде на сенсомоторные показатели у мышей. *Вопросы радиационной безопасности*. 2025;2(118):69–75.
Atamanyuk NI, Obvintseva NA, Peretykin AA, Andreev SS, Tyukhay MV, Styazhkina EV, et al. Effect of fractionated gamma irradiation on sensorimotor indices in mice in the early postnatal period. *Radiation Safety Problems*. 2025;2(118):69–75 (In Russ.).
EDN: [ADDTOR](https://doi.org/10.3791/2376)
14. Luong TN, Carlisle HJ, Southwell A, Patterson PH. Assessment of motor balance and coordination in mice using the balance beam. *JoVE*. 2011;(49):2376.
<https://doi.org/10.3791/2376>
15. Нотова СВ, Казакова ТВ, Маршинская ОВ. Современные методы и оборудование для оценки поведения лабораторных животных (обзор). *Животноводство и кормопроизводство*. 2018;101(1):106–15.
Notova SV, Kazakova TV, Marshinskaya OV. Modern methods and equipment for assessing the behavior of laboratory animals (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2018;101(1):106–15 (In Russ.).
EDN: [OYSMIX](https://doi.org/10.21870/0131-3878-2024-33-4-107-118)
16. Атаманюк НИ, Обвинцева НА, Тюхай МВ, Андреев АИ, Пряхин ЕА. Влияние фракционированного гамма-облучения в первый месяц жизни на когнитивную функцию у мышей. *Радиация и риск*. 2024;33(4):107–18.
Atamanyuk NI, Obvintseva NA, Tyukhay MV, Andreev AI, Pryakhin EA. Effect of fractionated gamma irradiation on cognitive function in mice of the first month of life. *Radiation and Risk*. 2024;33(4):107–18 (In Russ.).
<https://doi.org/10.21870/0131-3878-2024-33-4-107-118>
17. Atamanyuk NI, Obvintseva NA, Peretykin AA, Pryakhin EA. The dose-dependent effect of fractionated γ -radiation on anxiety-like behavior in neonatal mice. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2024;176(6):727–30.
<https://doi.org/10.1007/s10517-024-06097-w>
18. Koturbash I, Jadavji NM, Kutanzi K, Rodriguez-Juarez R, Kogosov D, Metz GAS, et al. Fractionated low-dose exposure to ionizing radiation leads to DNA damage, epigenetic dysregulation, and behavioral impairment. *Environmental Epigenetics*. 2017;2(4):dvw025.
<https://doi.org/10.1093/eep/dvw025>
19. Ung MC, Garrett L, Dalke C, Leitner V, Dragosa D, Hladik D, et al. Dose-dependent long-term effects of a single radiation event on behaviour and glial cells. *International Journal of Radiation Biology*. 2021;97(2):156–69.
<https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1857455>
20. Zhou K, Boström M, Ek CJ, Li T, Xie C, Xu Y, et al. Radiation induces progenitor cell death, microglia activation, and blood-brain barrier damage in the juvenile rat cerebellum. *Science Reports*. 2017;7:46181.
<https://doi.org/10.1038/srep46181>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: Н.И. Атаманюк — создание рукописи и ее редактирование; Н.А. Обвинцева — проведение экспериментов, сбор данных; И.А. Шапошникова — статистический анализ данных; С.С. Андреев — разработка методов и процедур; Е.А. Пряхин — научное руководство проектом.

Об авторах:

Атаманюк Наталья Игоревна, канд. биол. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8293-2730>

Обвинцева Надежда Александровна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5914-8913>

Шапошникова Ирина Александровна, канд. биол. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0769-8267>

Андреев Сергей Сергеевич, канд. биол. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7192-7239>

Пряхин Евгений Александрович, д-р биол. наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5990-9118>