

БИОЛОГИЯ

УДК 57 591.1, 57.024, 57 57.04

*А.В. Керя, М.А. Большаков, Т.А. Замощина, И.Р. Князева,
О.П. Кутенков, Ю.Н. Семенова, В.В. Ростов*

О ВЛИЯНИИ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЛАБОРАТОРНЫХ МЫШЕЙ

Работа выполнена частично при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-04-32046).

Исследовано влияние импульсно-периодического рентгеновского излучения (длительность импульса 4 нс, частота повторения 3–22 имп./с, доза в импульсе 0,02 и 0,1 мГр/имп., поглощенные дозы 0,2 и 1 Гр) на деятельность головного мозга мышей. В качестве индикаторов влияния оценивались активно-поисковая и пассивно-оборонительная составляющие поведения по методу «открытое поле». Выявлено, что после облучения головы мышей 4 000 импульсов импульсно-периодического рентгеновского излучения (однократно в течение 10 дней) могут изменяться горизонтальная, вертикальная, норковая поведенческие компоненты, груминг и количество дефекаций. Эффект зависел от частоты повторения импульсов и дозы облучения. Воздействие в дозе 0,2 Гр с частотами повторения 13, 16 и 22 имп./с инициировало повышение возбудимости мозга, в то время как после воздействия в дозе 1 Гр с частотами повторения 8, 13, 16 и 22 имп./с наблюдалось умеренное снижение возбудимости. Это может быть обусловлено модулирующим влиянием импульсно-периодического рентгеновского излучения на процессы возбуждения и торможения центральной нервной системы. Характер реагирования животных указывает на возможность участия в формировании эффектов гипоталамо-гипофизарной и ретикуло-корковых структур мозга.

Ключевые слова: импульсное рентгеновское излучение; мозг мышей; поведенческие реакции.

Введение. Принято считать, что центральная нервная система (ЦНС) является органом, относительно устойчивым к действию радиационных излучений [1]. Значимое изменение работы мозга можно наблюдать после радиационных воздействий в дозах 20–60 Гр [2]. Тем не менее в литературе имеются данные о том, что ионизирующие излучения, особенно генерируемые в импульсном режиме, могут изменять деятельность мозга при существенно меньших дозах (1 Гр и менее). С.И. Пеймер с соавт. [3] показали, что импульсное воздействие ионизирующего излучения оказывает активирующее влияние на механизмы генерации потенциалов действия нейронами. Кроме того, известно, что облучение импульсным рентгеновским излучением вызывает морфологические изменения в нервной ткани [4], биохимические изменения в ЦНС [5], угнетение агрессивности [2]. Малый объем полученных результатов, их неоднозначность, но потенциально высокая практическая значимость делают актуальным исследование влияния импульсного рентгеновского излучения на ЦНС.

Появление источников наносекундного импульсно-периодического рентгеновского излучения (ИПРИ), генерирующих импульсы длительностью от единиц до десятков наносекунд и с дозами до десятков мР/имп. [6], дало начало изучению биологического действия ИПРИ. Ранее было показано, что наносекундные импульсы оказывают влияние на морфологические и биохимические показатели печени [7], пролиферативную активность опухолевых клеток [8], на форменные элементы крови [9], дыхание митохондрий [10] и ферменты антиоксидантной защиты митохондрий печени мышей [11]. Поскольку все физиологические функции организма находятся под контролем ЦНС, то представляется актуальным изучение влияния ИПРИ на деятельность головного мозга. Все ранее проведенные исследования деятельности головного мозга после облучения в ма-

лых дозах [12] были проведены с использованием неимпульсного рентгеновского излучения.

В связи с этим целью настоящего исследования являлось изучение влияния ИПРИ в дозах 0,2 и 1 Гр на деятельность головного мозга лабораторных мышей, которая оценивалась по поведению животных в «открытом поле» [13].

Материалы и методики исследования. Работа выполнена на 108 белых беспородных мышах-самцах массой 25–30 г. Животные содержались в стандартных условиях при постоянной температуре и влажности, в условиях светового режима 12:12, пища и вода были доступны в любое время суток. Опыты проводились в одно и то же время (в утренние часы с 9.00 до 11.00) в соответствии с санитарными правилами по устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник, а также основываясь на положениях Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации от 1964 г., дополненной в 1975, 1983 и 1989 гг. [14]. Во время облучения мыши располагались в свинцовом экране таким образом, чтобы только голова животного была доступна действию ИПРИ (рис. 1, Б). Для каждого из режимов облучения было выполнено одинаковое количество воздействий (по одному в течение 10 дней). При проведении экспериментов для каждого из режимов воздействия были сформированы группы облученных и ложнооблученных животных. Последние подвергались всем аналогичным манипуляциям, что и облученные, кроме самого облучения (источники излучения не включались). Облучаемые животные ежедневно подвергались воздействию 4 000 импульсов длительностью по 4 нс с частотами повторения 3, 6, 8, 13, 16 и 22 имп./с, которые соответствовали основным частотам спектра электроэнцефалограмм мозга. В результате этого мозг мышей поглощал за один сеанс дозы 0,02 и 0,1 Гр, что обеспечивало накопленные в течение десяти дней

облучения дозы 0,2 и 1 Гр. Процедурам воздействия одновременно подвергались по две мыши с ежедневным чередованием облучаемой стороны головного мозга. Длительность воздействия варьировала от 3 до 20 мин в зависимости от частоты повторения импульсов.

В качестве источника ИПРИ использовался ускоритель электронов Синус-150 производства ИСЭ СО РАН (г. Томск) [6], тормозное излучение которого характеризовалось ускоряющим напряжением 300 кВ, током

электронного пучка 2,5 кА, что обеспечивало формирование импульсно-периодического рентгеновского излучения с длительностью на полувысоте 4 нс, с частотой повторения до 100 имп./с и энергией фотонов с максимумом 100 кЭв. Измерение поглощенной дозы ИПРИ и ее ежедневный контроль производились посредством поверенного дозиметра КДМ-02М (Россия) и электростатического дозиметра с кварцевым волокном Argow-Tech 138 (Argow-Tech, Inc. США).

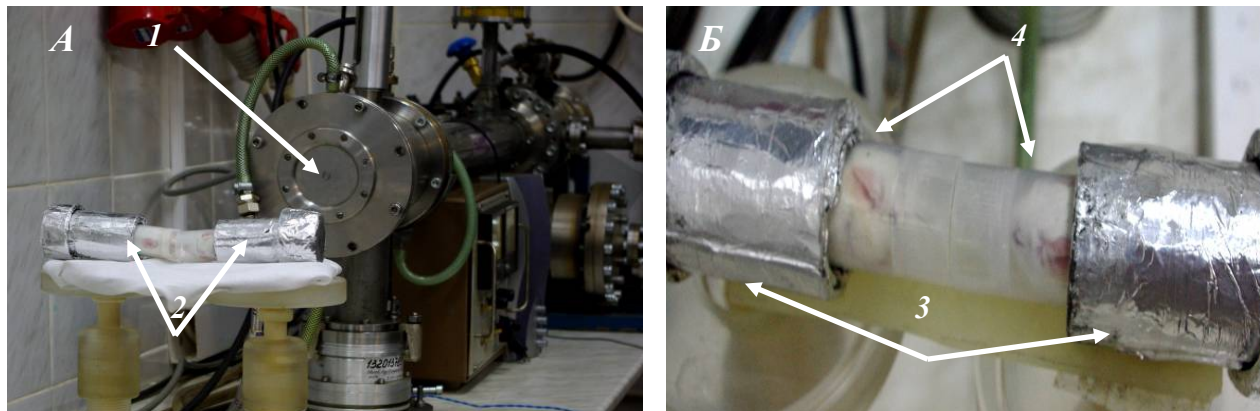


Рис. 1. Стенд для облучения мозга мышей (фото А.В. Керя, О.П. Кутенков, 2013):

А – общий вид источника ИПРИ: 1 – излучатель источника ИПРИ, 2 – облучаемые животные;

Б – белые лабораторные мыши, помещенные в свинцовый экран: 3 – свинцовый экран; 4 – облучаемая область (голова мышей)

За день до начала облучения и на следующий день после окончания оценивались поведенческие реакции животных в «открытом поле»: двигательная активность, исследовательское поведение и эмоциональность (горизонтальная, вертикальная, норковая компоненты определялись как активно-поисковая составляющая поведения, а груминг и дефекации – как пассивно-оборонительная) [13]. Активность мышей в «открытом поле» фиксировалась с помощью веб-камеры и на компьютер в реальном времени. Тестирование животных проводилось при уровне освещенности 180 лк. По завершении процедуры тестирования мышей записанные файлы анализировались и количественно оценивались все поведенческие реакции.

Полученные результаты подвергались статистической обработке, при которой рассчитывались средняя арифметическая величина и её стандартная ошибка относительного показателя для каждой из фиксируемых поведенческих реакций (вертикальной, горизонтальной, норковой активностей, груминга и дефекаций) по формуле $(M_{до} - M_{после}) / M_{до}$, где $M_{до}$ – средняя арифметическая величина показателя поведенческой активности животного в соответствующей группе до облучения, $M_{после}$ – средняя арифметическая величина показателя соответствующей активности после облучения животного, а $M_{до}$ – средняя арифметическая величина показателя поведенческой активности ложнооблученной группы животных. Рассчитанный таким образом эффект показывал величину изменения поведенческих реакций относительно их значения без облучения. Значимость различий между показателями облученных и ложнооблученных выборок определялась с помощью непараметрического U-критерия Манна–Уитни, а также рассчитывался непараметрический коэффициент корреляции Спирмена по средним

значениям относительных величин для определения возможных взаимосвязей между поведенческими реакциями [15]. Все расчёты были выполнены с использованием лицензионного пакета компьютерных программ Statsoft STATISTICA for Windows 6.0.

Результаты исследования и их обсуждение. Эксперименты показали, что десятикратное воздействие 4 000 импульсов ИПРИ в дозе 0,2 или 1 Гр может оказывать значимое влияние на некоторые поведенческие реакции облученных мышей. Степень и направленность воздействия определяются как дозой облучения, так и частотой повторения импульсов. Оказалось, что биологически наиболее эффективными режимами воздействия является облучение в дозе 0,2 Гр с частотами 13, 16 и 22 имп./с, а в дозе 1 Гр – все используемые частоты повторения, т.е. 3, 6, 8, 13, 16, 22 имп./с.

Облучение в дозе 0,2 Гр. Как следует из полученных результатов (рис. 2, а), облучение мышей в дозе 0,2 Гр с частотами 16 и 22 имп./с сопровождалось повышением у них на 20 и 30% соответственно, вертикальной активности в «открытом поле». Остальные поведенческие реакции статистически значимо не отличались от аналогичных у ложнооблученных животных. С учетом известных представлений [16] полученные результаты указывают на то, что облучение при данных параметрах способствует формированию у животных преимущественно активно-поисковой компоненты поведения. Однако облучение в той же дозе, но с другими частотами: 13 и 22 имп./с, повышало количество дефекаций на 60 и 25% (рис. 2, б), что свидетельствует об активации у мышей пассивно-оборонительной составляющей поведения. Следовательно, после облучения с частотой повторения 13 имп./с у облученных в дозе 0,2 Гр мышей в сравнении с ложнооблученными животными активировались как активно-поисковая, так и пас-

сивно-оборонительная компоненты поведения, что нашло отражение в высоком значении коэффициента

корреляции Спирмена (R между вертикальной активностью и грумингом = +0,68).

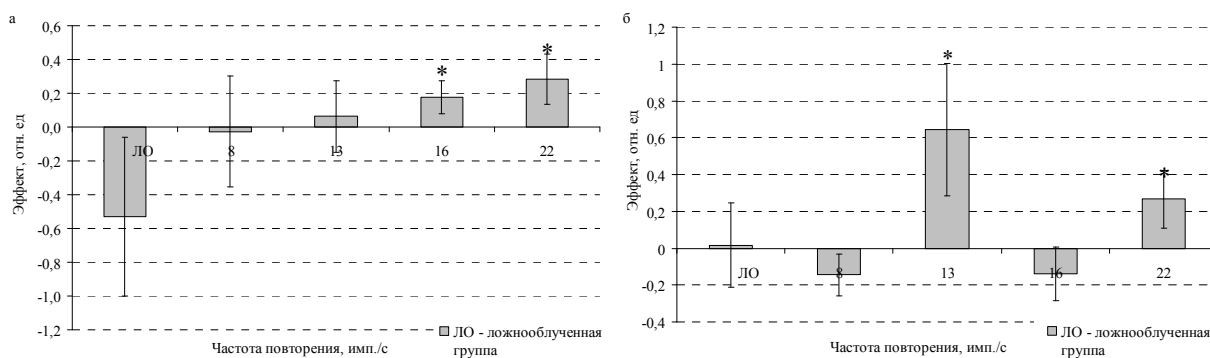


Рис. 2. Влияние наносекундного ИПРИ в дозе 0,2 Гр на вертикальную (а) и эмоциональную (б) активности мышей в «открытом поле».

* Здесь и на рис. 3, 4: различия статистически значимы по отношению к группе ложного облучения ($p \leq 0,05$)

Таким образом, облучение в дозе 0,2 Гр вызывало у мышей последовательные изменения поведения в «открытом поле» в зависимости от частоты повторения импульсов. После воздействия облучения с частотой 13 имп./с у животных преобладал страх (рост дефекаций), лежащий в основе доминирования пассивно-оборонительного поведения. После воздействия с частотой 16 имп./с у животных менялась поведенческая парадигма за счет активации ориентировочно-исследовательского рефлекса (вертикальный компонент) и формирования активно-поискового поведения. В то же время после облучения с частотой повторения 22 имп./с у животных одновременно присутствовали и страх, и любопытство, что активировало обе компоненты поведения. Такая конкуренция мотивов создает ситуацию напряжения и дезадаптации [16].

Облучение в дозе 1 Гр. Как свидетельствуют результаты проведенных экспериментов, в отличие от результатов с воздействием в дозе 0,2 Гр, облучение в дозе 1 Гр оказалось биологически эффективным при всех частотах повторения. Но если после воздействия с низкими частотами повторения (3 и 6 имп./с) усиливалась активно-поисковая составляющая поведения (R между горизонтальной и вертикальной активностями = +0,86) за счет повышения горизонтальной и вертикальной активностей (5–10 и 20–30% соответственно), в сравнении с результатами ложнооблученных животных (рис. 3, а, б), то после облучения с более высокими частотами повторения (8, 13, 16 и 22 имп./с) эффект воздействия оказывался противоположным (рис. 4).

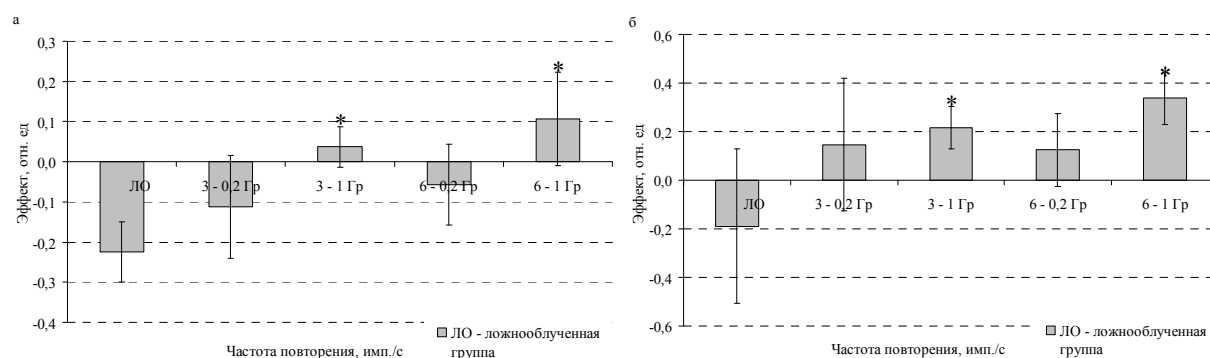


Рис. 3. Влияние наносекундного ИПРИ в дозах 0,2 и 1 Гр с частотами повторения 3 и 6 имп./с на горизонтальную (а) и вертикальную (б) активность мышей в «открытом поле».

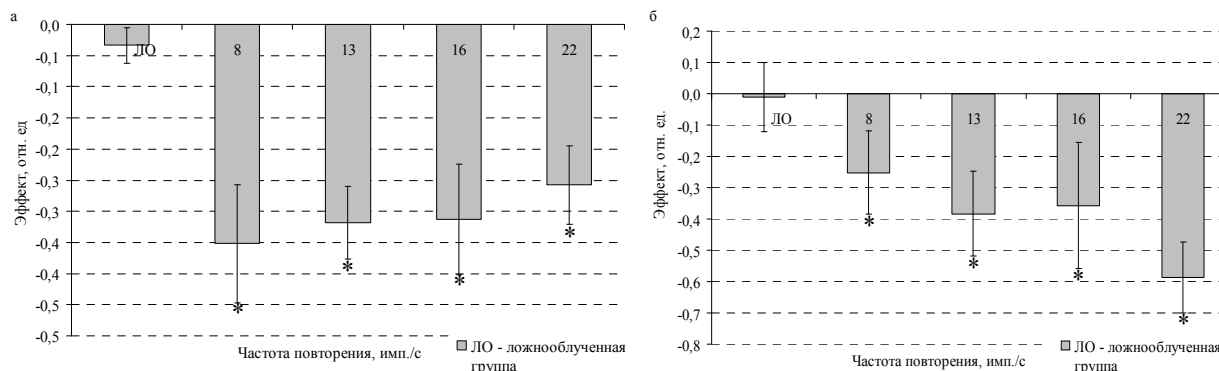


Рис. 4. Влияние наносекундного ИПРИ в дозе 1 Гр на горизонтальную (а) и носовую (б) активность мышей

В этих условиях при неизменности пассивно-оборонительной составляющей активно-поисковая компонента значительно подавлялась за счет уменьшения горизонтальной (30–40%) и норковой активностей (25–60%). Это может свидетельствовать об угнетении процессов возбуждения или активации процессов торможения в ретикуло-корковых структурах, но не лимбических [16].

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют об изменении поведенческих реакций мышей после воздействия наносекундного импульсно-периодического рентгеновского излучения в дозах 0,2 и 1 Гр. Это совпадает с ранее полученными данными о влиянии неимпульсного рентгеновского излучения в дозе 0,5 Гр на поведение животных [17]. К настоящему времени известно, что умеренное доминирование в структуре поведения активно-поисковой составляющей свидетельствует об оптимизации поведения в целом, которое призвано через взаимодействие с внешней средой удовлетворить доминирующую потребность в поведении [13, 16]. В условиях проведенных экспериментов оптимизация поведения мышей в «открытом поле» наблюдалась после облучения головы животных ИПРИ в дозе 0,2 Гр с частотой повторения 16 имп./с и в дозе 1 Гр с частотами 3 и 6 имп./с. Остальные частоты повторения можно рассматривать как дезадаптивные. Для разных доз характер воздействия был противоположным. Облучение в дозе 0,2 Гр с частотами повторения 13, 16 и 22 имп./с инициировало повышение возбудимости мозга, в то время как после воздействия в дозе 1 Гр с частотами повторения 8, 13, 16 и 22 имп./с наблюдалось

умеренное снижение возбудимости. Характер реагирования животных указывает на возможность участия в формировании эффекта таких структур мозга, как гипоталамо-гипофизарная и ретикуло-корковая системы, а также элементов этих структур. Из литературы известно, что хроническое рентгеновское излучение оказывает влияние на гипоталамо-гипофизарную систему мозга [17], более конкретно подвергается воздействию гипоталамус с повышением его возбудимости [18, 19]. Подобные результаты были получены также при исследовании влияния рентгеновского излучения в сопоставимых дозах на биоэлектрическую активность различных структур мозга непосредственно при облучении. В частности, наблюдались изменения ЭЭГ коры, ретикулярной формации и гипоталамуса, что также подтверждает возможность влияния наносекундного ИПРИ на перечисленные структуры [2].

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что ежедневное воздействие 4 000 импульсов ИПРИ в течение 10 дней в дозах 0,2 и 1 Гр влияет на деятельность головного мозга лабораторных мышей и подтверждает возможность действия на ЦНС в низких дозах. При этом эффект зависит от частоты повторения импульсов и воздействующих доз. Указанный характер реагирования отличается от эффектов непрерывного хронического воздействия рентгеновским излучением в малых дозах [12]. Это подтверждает, что импульсно-периодический режим генерации излучений более эффективен при воздействии излучением в низких дозах, что было продемонстрировано в работе [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) : учеб. М. : Физматлит, 2004. 446 с.
2. Нягу А.И., Логановский К.Н. Нейропсихиатрические эффекты ионизирующих излучений. Чернобыльинтеринформ, 1997. 349 с.
3. Пеймер С.И., Дудкин А.О., Свердлов А.Г. Непосредственное действие малых доз радиации на нейроны // Доклады АН СССР. 1985. Т. 284, № 6. С. 1481–1484.
4. Ромоданов А.П., Виницкий О.Р. Уражения головного мозга при променевої хворобі легкого ступеню // Лжарська справа. 1993. № 1. С. 10–16.
5. Гамезо Н.В., Бокуть Т.В., Аверко Р.И. Всесоюзная конференция по действию малых доз ионизирующей радиации. Киев, 1984. С. 50–51
6. Артемов К.П., Ельчанинов А.А., Кутенков О.П. и др. Импульсно-периодический источник рентгеновского излучения // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 67–68.
7. Жаркова Л.П., Князева И.Р., Иванов В.В. и др. Влияние импульсно-периодического рентгеновского и микроволнового излучений на уровень перекисей в изолированных гепатоцитах // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 333. С. 161–163.
8. Литвяков Н.В., Ростов В.В., Булдаков М.А. и др. Ингибирование пролиферации опухолевых клеток импульсно-периодическим рентгеновским излучением // Сибирский онкологический журнал. 2006. № 1 (17). С. 24–31.
9. Князева И.Р., Медведов М.А., Жаркова Л.П. и др. Воздействие импульсно-периодическим микроволновым и рентгеновским излучениями на эритроциты человека // Бюллетень сибирской медицины. 2009. № 1. С. 24–30.
10. Князева И.Р., Иванов В.В., Жаркова Л.П. и др. Влияние импульсно-периодического рентгеновского излучения на функциональную активность изолированных митохондрий печени мышей // Физика окружающей среды : материалы Рос. конф. с междунар. участием. Томск : Изд-во ТГУ, 2011. С. 280–284.
11. Knyazeva I.R., Ivanov V.V., Zharkova L.P. et al. Responses of Mice Liver Mitochondria to Repetitive Pulsed Microwaves and X-Rays // Известия вузов. Физика. 2012. № 11/3. С. 194–199.
12. Martin C., Martin S., Viret R. et al. Low dose of the gamma acute radiation syndrome (1.5 Gy) does not significantly alter either cognitive behavior or dopaminergic and serotonergic metabolism // Cellular and molecular biology. 2001. May. № 47(3). P. 459–465.
13. Симонов П.В. Эмоциональный мозг. М. : Наука, 1981. 215 с.
14. Euroguide on the accommodation and care of animals used for experimental and other scientific purposes. (Based on the revised Appendix A of the European Convention ETS 123.) FELASA: Federation of European Laboratory Animal Science Associations, London, UK. 2007. 17 с. URL: www.felasa.eu
15. Ефимов В.М., Ковалева В.Ю. Многомерный анализ биологических данных. 2-е изд., испр. и доп. СПб., 2008. 86 с.
16. Батуев А.С. Высшая нервная деятельность : учеб. М. : Высш. шк., 1991. 256 с.
17. Смирнова Н.П. Гипоталамус при воздействии на организм ионизирующей радиации : автореф. дис. ... д-ра мед. наук. М., 1969. 31 с.
18. Аклеев А.В. Реакции тканей на хроническое воздействие ионизирующего излучения // Радиационная биология. Радиозэкология. 2009. Т. 49, № 1. С. 5–25.
19. Федорова М.В., Жиленко М.И., Муратова Р.М. Патогенетические механизмы влияния малых доз радиации на плод и новорожденного // Медицинские аспекты влияния малых доз радиации на организм детей и подростков. Обнинск, 1992. С. 112–116.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 25 марта 2013 г.

Kereya Anna V. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation), Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kereya21@mail.ru

Bolshakov Mikhail A. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation), Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mbol@ngs.ru

Zamoshchina Tatiana A. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation), Siberian State Medical University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: beladona@hotmail.ru

Knyazeva Irekle R. Siberian State Medical University (Tomsk, Russian Federation), Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kir@rubl.tomsk.ru

Kutenkov Oleg P. Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation). E-mail: Kutenkov@lfe.hcei.tsc.ru

Semyonova Yulia N. Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: semenova_1992@sibmail.com

Rostov Vladislav V. Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk, Russian Federation), Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: rostov@lfe.hcei.tsc.ru

THE EFFECT OF NANOSECOND PULSE-PERIODIC X-RAYS ON THE ACTIVITY OF THE BRAIN OF MICE.

Key words: pulse-periodic X-ray; brain of mice; behavioural responses.

The effects of a nanosecond pulse-periodic X-ray on brain activity of mice were investigated. 108 white male mice weighing 25–30 g were irradiated by 4000 pulses of repetitive pulsed X-ray (maximum photon energy of 100 keV, pulse duration of 4 ns, pulse repetition frequency of 3–22 pps, and dose 0.2 and 1 Gy) daily for 10 days. The source of repetitive pulsed X-rays was the electron accelerator "Sinus 150", developed at the Institute of High Current Electronics SB RAS (Tomsk). Single exposure duration ranged from 3 to 20 minutes depending on the pulse repetition frequency. The behavioural components were assessed in the "open field" (horizontal and vertical components, hole-dipping activities, grooming and defecation) and recorded using a webcam. Then recorded files were examined and analysed, and all the behavioural responses were quantified. It was found that exposure of mice with the dose of 0.2 Gy at 16 and 22 pps increased the vertical activity by 20 and 30% respectively. Exposure with the same dose, but with frequencies of 13 and 22 pps increased the number of bowel movements by 60 and 25%. In addition, following the cranial irradiation of mice with a repetition rate of 13 pps and of 0.2 Gy the active searching and passive defensive behaviour components were activated. Exposure with the dose of 1 Gy was biologically effective for all pulse repetition. After exposure with low repetition rates (3 and 6 pps) the active searching component was activated by increasing the horizontal and vertical activity (5–10% and 20–30%, respectively). The effect is the opposite after exposure with a high repetition rate (8, 13, 16, 22 pps). In these conditions, the active searching component significantly inhibited in the form of reduced horizontal (30–40%) and hole-dipping activities (25–60%), but the passive-defence component was constant. It may indicate inhibition of excitation or activation of inhibition in the reticulo-cortical structures, but not the limbic ones. It is now known that a moderate dominance in the structure of the behaviour of the active searching component indicates the optimal behaviour on the whole, which is designed to meet the dominant need through interaction with the environment. In these experiments, the optimisation of mice behaviour in the "open field" was observed after exposure of the mice heads by repetitive pulsed X-ray with the dose of 0.2 Gy and repetition rate of 16 pps, and with the dose of 1 Gy at 3 and 6 pps. The rest of the repetition rates can be seen as maladaptive.

REFERENCES

1. Kudryashov Yu.B. Radiatsionnaya biofizika (ioniziruyushchie izlucheniya) : ucheb. M. : Fizmatlit, 2004. 446 s.
2. Nyagu A.I., Loganovskiy K.N. Neyropsikhiatricheskie efekty ioniziruyushchikh izlucheni. Chornobil'interinform, 1997. 349 s.
3. Peymer S.I., Dudkin A.O., Sverdlov A.G. Neposredstvennoe deystvie malykh doz radiatsii na neyrony // Doklady AN SSSR. 1985. T. 284, № 6. S. 1481–1484.
4. Romodanov A.P., Vinnits'kiy O.R. Urazhennyy golovnyy mozok pri promenevoi khvorobi legkogo stupenyu // Lzhars'ka sprava. 1993. № 1. S. 10–16.
5. Gamezo N.V., Bokut' T.V., Averko R.I. Vsesoyuznaya konferentsiya po deystviyu malykh doz ioniziruyushchey radiatsii. Kiev, 1984. S. 50–51
6. Artemov K.P., El'chaninov A.A., Kutenkov O.P. i dr. Impul'sno-periodicheskiy istochnik rentgenovskogo izlucheniya // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2004. № 5. S. 67–68.
7. Zharkova L.P., Knyazeva I.R., Ivanov V.V. i dr. Vliyaniye impul'sno-periodicheskogo rentgenovskogo i mikrovolnovogo izlucheniya na uroven' perekisey v izolirovannykh gepatotsitakh // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2010. № 333. S. 161–163.
8. Litvyakov N.V., Rostov V.V., Buldakov M.A. i dr. Ingibirovaniye proliferatsii opukholevykh kletok impul'sno-periodicheskim rentgenovskim izlucheniem // Sibirskiy onkologicheskii zhurnal. 2006. № 1 (17). S. 24–31.
9. Knyazeva I.R., Medvedev M.A., Zharkova L.P. i dr. Vozdeystvie impul'sno-periodicheskim mikrovolnovym i rentgenovskim izlucheniymi na eritrotsity cheloveka // Byulleten' sibirskoy meditsiny. 2009. № 1. S. 24–30.
10. Knyazeva I.R., Ivanov V.V., Zharkova L.P. i dr. Vliyaniye impul'sno-periodicheskogo rentgenovskogo izlucheniya na funktsional'nuyu aktivnost' izolirovannykh mitokhondriy pecheni myshey // Fizika okruzhayushchey sredy : materialy Ros. konf. s mezhdunar. uchastiem. Tomsk : Izd-vo TGU, 2011. S. 280–284.
11. Knyazeva I.R., Ivanov V.V., Zharkova L.P. et al. Responses of Mice Liver Mitochondria to Repetitive Pulsed Microwaves and X-Rays // Izvestiya vuzov. Fizika. 2012. № 11/3. S. 194–199.
12. Martin C., Martin S., Viret R. et al. Low dose of the gamma acute radiation syndrome (1.5 Gy) does not significantly alter either cognitive behavior or dopaminergic and serotonergic metabolism // Cellular and molecular biology. 2001. May. № 47(3). R. 459–465.
13. Simonov P.V. Emotsional'nyy mozg. M. : Nauka, 1981. 215 s.
14. Euroguide on the accommodation and care of animals used for experimental and other scientific purposes. (Based on the revised Appendix A of the European Convention ETS 123.) FELASA: Federation of European Laboratory Animal Science Associations, London, UK. 2007. 17 s. URL: www.felasa.eu
15. Efimov V.M., Kovaleva V.Yu. Mnogomernyy analiz biologicheskikh dannykh. 2-e izd., ispr. i dop. SPb., 2008. 86 s.
16. Batuev A.S. Vysshaya nervnaya deyatel'nost' : ucheb. M. : Vyssh. shk., 1991. 256 s.
17. Smirnova N.P. Gipotalamus pri vozdeystvii na organizm ioniziruyushchey radiatsii : avtoref. dis. ... d-ra med. nauk. M., 1969. 31 s.
18. Akleev A.V. Reaktsii tkaney na khronicheskoe vozdeystvie ioniziruyushchego izlucheniya // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2009. T. 49, № 1. S. 5–25.
19. Fedorova M.V., Zhilenko M.I., Muratova R.M. Patogeneticheskie mekhanizmy vliyaniya malykh doz radiatsii na plod i novorozhdennoy // Meditsinskie aspekty vliyaniya malykh doz radiatsii na organizm detey i podrostkov. Obninsk, 1992. S. 112–116.