

УДК 576.3:591.88:57.087:599.323.4:57.084.1:539.1.047

DOI 10.25587/SVFU.2023.30.1.007

О. П. Гундарова, В. П. Федоров, А. Н. Кварацхелия, Н. В. Маслов

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. При воздействии даже малых доз ионизирующего излучения у пострадавших в дальнейшем наблюдался существенный рост психоневрологических заболеваний, которые трудно поддавались лечению и сохранялись в течение всей последующей жизни. В большинстве случаев нарушения имели пограничный характер, но они снижали качество жизни пострадавших и проявлялись когнитивными расстройствами, снижением работоспособности и ранним старением организма. Высокая медико-социальная значимость таких состояний определяет актуальность выявления в центральной нервной системе соответствующих нейроморфологических изменений. Однако традиционные нейроморфологические и статистические методики не позволяют выявить среди множества факторов, присущих радиационным инцидентам, приоритетный в поражении головного мозга и оценить роль ионизирующего излучения в росте заболеваемости достаточно затруднительно. Вполне очевидно, что необходимы междисциплинарные подходы к оценке радиационно-индуцированных изменений в головном мозге, в частности экспериментального и математического моделирования.

Ключевые слова: радиационные аварии, повышенный радиационный фон, головной мозг, пограничные расстройства нервной системы, экспериментальное и математическое моделирование, пострadiационные церебральные эффекты.

ГУНДАРОВА Ольга Петровна – ассистент кафедры нормальной анатомии человека ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, г. Воронеж, ул. Студенческая, д. 10; e-mail: episheva65@mail.ru, тел. 8 960 1373666.

GUNDAROVA Olga Petrovna – Assistant Lecturer, Department of Normal Human Anatomy, N.N. Burdenko Voronezh State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Voronezh, ul. Studencheskaya, 10; e-mail: episheva65@mail.ru

ФЕДОРОВ Владимир Петрович – доктор мед. наук, профессор кафедры медико-биологических дисциплин ФГБОУ ВО «Воронежская государственная академия спорта» Минспорта России, г. Воронеж, ул. Карла Маркса, 59; e-mail: fedor.vp@mail.ru, тел. 8 903 6568209.

FEDOROV Vladimir Petrovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Department of Medical and Biological Disciplines, Voronezh State Academy of Sports of the Ministry of Sports of Russia, Voronezh, ul. Karla Marksa, 59; e-mail: fedor.vp@mail.ru

КВАРАЦХЕЛИЯ Анна Гуладиевна – канд. биол. наук, доцент кафедры нормальной анатомии человека ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, г. Воронеж, ул. Студенческая, д. 10; e-mail: anna_kvar_83@mail.ru, тел. 8 920 4133880.

KVARATSKHELIA Anna Guladievna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Normal Human Anatomy, N.N. Burdenko Voronezh State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Voronezh, ul. Studencheskaya, 10; e-mail: anna_kvar_83@mail.ru

МАСЛОВ Николай Владимирович – канд. мед. наук, ассистент кафедры нормальной анатомии человека ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, г. Воронеж, ул. Студенческая, д. 10; e-mail: lovem@list.ru, тел. 8 910 2459568.

MASLOV Nikolai Vladimirovich – Candidate of Medical Sciences, Assistant Professor, Department of Normal Human Anatomy, N.N. Burdenko Voronezh State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Voronezh, ul. Studencheskaya, 10; e-mail: lovem@list.ru

O. P. Gundarova, V. P. Fedorov, A. N. Kvaratskhelia, N. V. Maslov

INTERDISCIPLINARY APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF CEREBRAL CHANGES UNDER RADIATION EXPOSURE

Abstract. When exposed to even a small dose of an ionizing phenomenon, a significant increase in neuropsychiatric diseases is observed in the future, which were difficult to succumb to and persisted throughout the life span. Despite the fact that in most cases there is a dysfunction of a borderline nature, they are manifested by cognitive disorders, decreased performance and early aging of the body. High medical and social sensitivity to such problems is detected, the relevance of identifying neuromorphological changes in the central nervous system is determined. However, the observed neuromorphological and statistical methods do not make it possible to reveal the probability of the occurrence of radiation damage to the brain and to assess the role of the ionizing factor in the growth of morbidity is rather laborious. It is clear that interdisciplinary approaches are needed to assess radiation-induced changes in the brain in experimental experimental and mathematical modeling.

Keywords: radiation accidents, increased radiation background, brain, borderline disorders of the nervous system, experimental and mathematical modeling, post-radiation cerebral effects.

Введение.

Авария на Чернобыльской АЭС привела к существенным изменениям экологии, объектов живой природы, повлияла на здоровье населения. Обширные территории страны оказались загрязненными радионуклидами, а проживающее на них население подверглось облучению в дозах, соответствующих критериям так называемых «малых» доз [1, 2]. Современные представления о влиянии ионизирующего излучения на организм учитывают принципы системного ответа клеток на повреждение радиационных мишеней и регуляции клеточного гомеостаза [3]. Считается, что ионизирующее излучение приводит в первую очередь к изменениям на молекулярном уровне. При этом большая часть повреждений восстанавливается, но остается какая-то не реparable часть, способная к накоплению [4, 5]. Возможно, что это и способствует росту заболеваемости среди участников аварийно-спасательных работ по локализации последствий ядерного взрыва на ЧАЭС. У целого ряда лиц, принимавших участие в локализации источника радиации, наблюдались повышенная эмоциональная лабильность, раздражительность, быстрая утомляемость, головные боли, головокружение, внутреннее напряжение, нарушение сна, кошмарные сновидения, замкнутость, снижение памяти, нарушение концентрации внимания, снижение либидо, тревога и депрессия. Такие состояния значительно снижали качество жизни и проявлялись у пострадавших когнитивными расстройствами, снижением работоспособности, инвалидизацией, ранним старением организма [6, 7, 8, 9]. Несмотря на высокую медико-социальную значимость пограничных психоневрологических состояний, общепринятого мнения о этиологии и патогенезе расстройств как психического, так и соматического здоровья у участников ликвидации последствий радиационной аварии нет. Это связано с тем, что радиационно-индуцированные патологические нарушения, особенно в головном мозге, не всегда возможно отдифференцировать от проявлений радиофобии, психоэмоционального стресса, сопутствующих заболеваний и даже ложных рентных установок [10, 11]. Все это обуславливает актуальность выявления в центральной нервной системе соответствующих нейроморфологических эквивалентов. Однако экспериментальное исследование радиационных изменений в головном мозге на человеке в принципе невозможно, а имеющиеся единичные случаи его аварийного облучения, как правило, отягощены целым каскадом вторичных изменений, связанных с формированием лучевой болезни, лечебными и диагностическими процедурами, психоэмоциональным состоянием пострадавшего и др. Поэтому экспериментальные исследования радиационно-индуцированных церебральных изменений проводят на лабораторных животных. Для этого в настоящее время разработаны методические основы экстраполяции результатов исследования с животных на человека [12].

Цель исследования. Методами экспериментального и математического моделирования оценить роль малых доз ионизирующего излучения в изменении структурно-функционального состояния нейронов головного мозга.

Материал и методы исследования.

Экспериментальной моделью служили 180 белых беспородных крыс-самцов с исходной массой 210 ± 10 г, которых подвергали воздействию ионизирующего излучения в дозах и режимах, сопоставимых с полученными ликвидаторами последствий аварии на ЧАЭС [13, 14, 15, 16] и исследованных на протяжении всей последующей жизни. Структуры головного мозга (моторная и сенсорная зона коры, подкорковые ядра, мозжечок) извлекали с соблюдением правил биоэтики и после стандартных нейроморфологических процедур изготавливали гистологические срезы. Традиционными методами окрашивания выявляли нервные и глиальные клетки, содержание в них белка, ядерной ДНК, цитоплазматической и ядрышковой РНК. На криостатных срезах выявляли активность основных дегидрогеназ (СДГ, ЛДГ и Г-6-ФДГ) по общепринятым в гистохимии методикам. На срезах мозга окрашенных по Нисслю подсчитывали количество нейронов с различной функциональной активностью (покой, возбуждение, торможение), а также с необратимыми изменениями в процентах от всей нейронной популяции. Морфометрические показатели нейронов и оптическую плотность продуктов гистохимических реакций оценивали с помощью компьютерной программы «Image J».

При анализе результатов измерений использовали параметрические методы статистики с вычислением средних и доверительных интервалов с помощью пакетов программ Statistica 6.1, MS Excel. Нулевая гипотеза отвергалась при $p < 0,05$ (t-критерий Стьюдента для парного сравнения независимых выборок между группами). Для установления приоритета среди воздействующих факторов (γ -облучение, прошедшее время) на изменение показателей состояния нейронов использовали регрессионный анализ [17, 18]. Математическую модель представляли в виде уравнения регрессии: $ПНК = {}_0a + {}_1a\gamma + {}_2az + {}_3a\gamma z + {}_4\gamma^2 + {}_5az^2 + {}_6a\gamma^3 + {}_7az^3$, где ПНК – рассматриваемый показатель, γ – доза радиационного воздействия; z – время восстановления; γz – совместное влияния факторов; γ^2 , z^2 , γ^3 , z^3 – нелинейное влияние факторов; ${}_0a$, ${}_1a$, ${}_2a$ и т.д. – коэффициенты регрессии.

Результаты и обсуждение.

При облучении животных в эквивалентных для ликвидаторов последствий радиационной аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 году (до 100 сГр) дозах значимых патоморфологических изменений в различных отделах головного мозга не установлено. Не установлена также дозовая или временная зависимость в диапазоне облучения в дозах от 0,1 до 1,0 Гр. Из диаграмм (рис. 1) следует, что возрастная перестройка нейронов моторной зоны коры у облученных животных заключается в снижении количества нервных клеток, находящихся в состоянии покоя за счет увеличения количества клеток в состоянии торможения функциональной активности. Просматривается также тенденция к увеличению количества деструктивных нервных клеток. В дальнейшем количество нейронов с неизменной организацией статистически значимо снижалось, а количество нервных клеток, находящихся в состоянии торможения функциональной активности, соответствовало возрастному контролю.

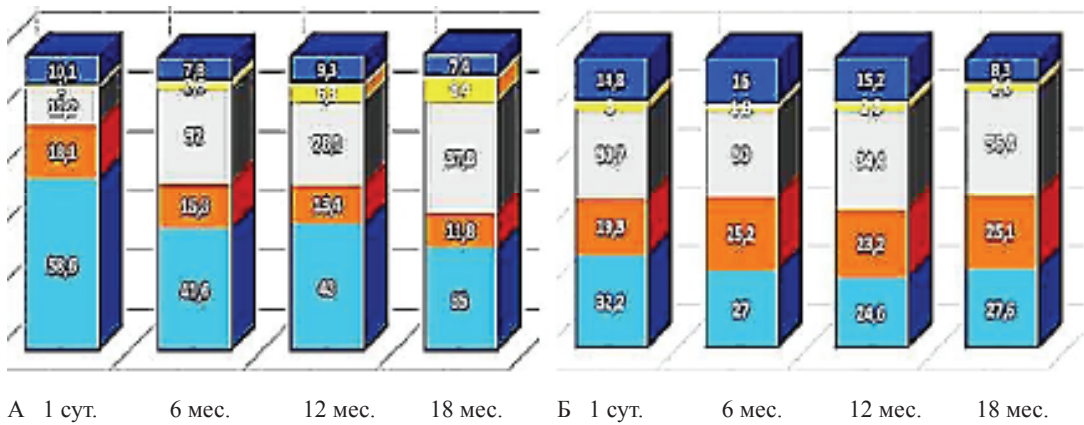


Рис. 1. Возрастная динамика функциональных типов нейронов двигательной зоны коры контрольных (А) и облученных (Б) животных в дозе 0,5 Гр. (нейроны без изменений, в состоянии возбуждения, в состоянии торможения функциональной активности, нейроны с альтерацией)

Отмечается также значимое увеличение количества нейронов, находящихся в состоянии возбуждения. При этом количество нейронов с признаками альтерации в ранние сроки пострадиационного периода превышало таковое у контрольных животных ($p < 0,05$), а к окончанию пострадиационного периода практически соответствовало ему.

В других структурах мозга также выявлялись незначимые изменения состояния нейронов по сравнению с возрастным контролем. В частности, не выявлено снижения количества нейронов на площади как при однократном, так и фракционированном облучении в суммарной дозе 50 сГр, а также при мощностях дозы воздействия в интервале от 50 до 660 сГр/ч (рис. 2).

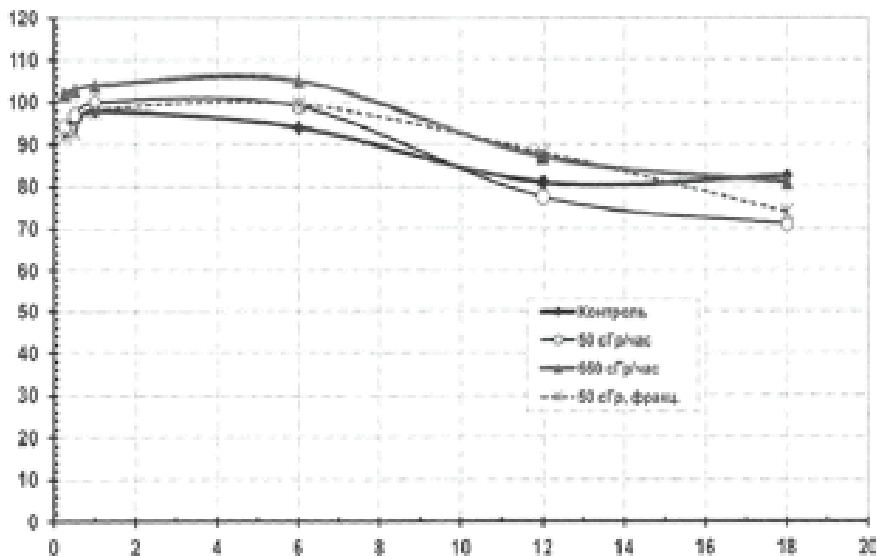


Рис. 3. Динамика изменений количества нейронов на 1 мм² коры при различных режимах радиационного воздействия в дозе 0,5 Гр. Примечание: по оси абсцисс – время после начала эксперимента в месяцах, по оси ординат – количество нейронов на площади в процентах к контролю

Наибольшей лабильностью отличались показатели нейронов, отражающие функциональную активность нервных клеток, менее заметно проявлялись признаки альтерации. Однако в отдельные доза-временные интервалы изменения нейронов имели пограничный характер, что свидетельствовало о нарушении их структурного постоянства и изменении функциональной активности.

Из приведенного выше следует, что патогистологические методы исследования не выявляют нейроморфологические эквиваленты нарушений психоневрологического статуса. Поэтому с помощью математического моделирования оценен вклад каждого из воздействующих факторов (γ -облучение, время восстановления) в пострadiационные эффекты. Алгоритм моделирования показан на примере динамики нейронов с альтерацией (НКА). Ниже приведены числовые характеристики переменных: средние значения, 95% – доверительный интервал для средних значений, минимальные и максимальные значения, размах, стандартные отклонения и ошибки, а также коэффициенты асимметрии и эксцесса, анализ которых свидетельствует, что переменные имеют распределения близкие к нормальному.

Таблица 1 – Числовые характеристики переменных

Показатель	Среднее	Доверительный интервал	Доверит -95%	Минимум +95%	Максимум	Размах	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка	Асимметрия	Эксцесс
Облучение, доля	0,251	0,178	0,323	0,000	1,000	1,000	0,391	0,037	0,414	0,042
Время, доля	0,324	0,254	0,394	0,001	1,000	0,999	0,377	0,035	0,757	-0,981
НКА, доля	0,493	0,459	0,526	0,133	1,000	0,867	0,179	0,017	0,512	0,462

Количество нейронов с альтерацией статистически значимо зависело от времени восстановления и совместного влияния времени и γ -облучения. Наиболее значительный вклад (снижает показатель НКА) вносит время восстановления, но совместное воздействие облучения и времени восстановления увеличивает количество нейронов с деструктивными изменениями. Воздействия таких факторов как мощность дозы облучения и время восстановления на динамику изменения нейронов приемлемый: уровень значимости модели менее $<1 \cdot 10^{-19}$ при коэффициенте диагностической значимости $R^2=0,53$ (табл. 2). Параметры, характеризующие модель и некоторые другие представлены в табл. 3.

Таблица 2 – Зависимость количества нейронов с альтерацией от воздействия рассматриваемых факторов

Показатель	Коэффициент оценки	Стандартная ошибка	T-статистика	Коэффициент достоверности
Константа	0,569	0,019	30,132	$<1 \cdot 10^{-19}$
a_1	-0,293	0,045	-6,573	$<1 \cdot 10^{-19}$
a_3	0,166	0,063	2,614	0,0102

Параметры, характеризующие модель и некоторые другие, представлены ниже (табл. 3).

Таблица 3 – Оценка адекватности математической модели влияния параметров на динамику изменений нейронов с альтерацией

Параметр	Сумма квадратов отклонений	Степени свободы	Средний квадрат	F-статистика	Коэффициент достоверности
Модель	28,752	3,000	9,584	411,208	$<1 \cdot 10^{-19}$
Остаток	2,587	111,000	0,023		
Модель с приведенной суммой	28,752	3,000	9,584	299,661	$<1 \cdot 10^{-19}$

Уравнение регрессии, описывающее динамику воздействия изучаемых факторов на динамику изменений альтеративных нейронов, выглядит следующим образом: $HKA=0,569-0,293z+0,165769yz$. Визуальная оценка зависимости количества нейронов с необратимыми изменениями от мощности дозы облучения и времени восстановительного периода представлена на трехмерном графике (рис. 4).

Из графика следует, что максимальное значение НКА соответствует минимальному значению прошедшего времени и максимальному значению мощности дозы облучения. С увеличением времени и уменьшением мощности дозы облучения показатель НКА снижается.

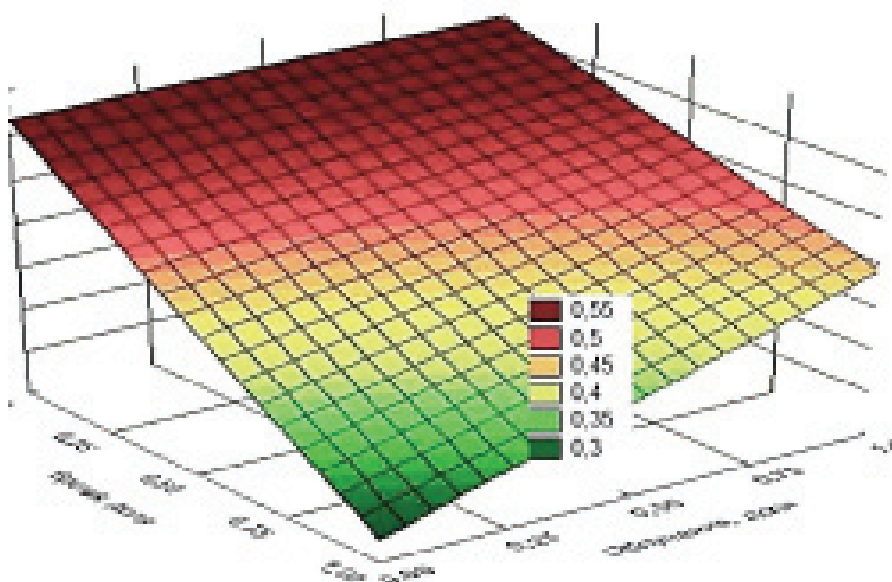


Рис. 4. Линейная зависимость количества нейронов с необратимыми изменениями от мощности дозы γ -облучения и времени восстановительного периода.

Примечание: по оси x отложено нормированное значение мощности дозы γ -облучения, по оси y – нормированное значение времени восстановления и по оси z нормированные значения показателя количества нервных клеток с необратимыми изменениями

Для нейронов без морфологических изменений (нормохромные) уравнение регрессии имело вид: $HNK=0,634+0,174z-0,144y^2$. Коэффициент диагностической значимости модели средний ($R^2=0,49$), но корреляция аргументов с пострadiационным эффектом слабая ($r=0,24$). Из уравнения следует, что с увеличением мощности дозы радиационного воздействия количество нейронов без морфологических изменений уменьшалось, в то время как с увеличением времени восстановления показатель повышался.

Для нейронов с измененной функциональной активностью (возбуждение, торможение) уравнение регрессии имеет вид: $HN\Phi=0,76867+0,0479z^2$. При этом диагностическая значимость модели была низкой ($R^2=0,23$), а корреляционная связь аргументов практически отсутствовала ($r=0,24$). Из уравнения следует, что время восстановления имело более сильное влияние на динамику изменений рассматриваемого показателя, чем мощность дозы облучения. Таким образом, радиационное воздействие вызывало отклик у нейронов головного мозга, но время восстановления вносило коррективы в наблюдаемые пострadiационные церебральные эффекты.

Аналогично анализировали приоритет каждого воздействующего фактора в изменение других нейроморфологических показателей значения, которых при традиционных методах патоморфологического исследования не имели статистически значимых отличий от возрастного контроля. Оказалось, что достаточно высокий отклик только на γ -облучение демонстрировали

такие показатели состояния нейронов, как площадь перикариона, содержание ядерной ДНК, цитоплазматической и ядрышковой РНК. Только от времени восстановительного периода (возраста животного) зависели содержание общего белка в нейронах и внутриклеточные соотношения ядра и цитоплазмы. Динамика изменений других показателей состояния нейронов зависела как от дозы облучения и времени восстановления, так и от совместного их воздействия. При этом один из воздействующих факторов имел приоритетное влияние на изменение соответствующего показателя. Так, доза γ -облучения оказывала большее влияние, чем время восстановления, на следующие показатели: нервные клетки без морфологических изменений, нервные клетки с необратимыми изменениями, нервные клетки, находящиеся в состоянии возбуждения или торможения функциональной активности, размеры ядра и ядрышка.

Таким образом, убедительных данных зависимости изменений нейронов как от рассмотренного диапазона доз радиационного воздействия, так и от мощности дозы γ -облучения в восстановительном периоде не установлено. Радиационно-индуцированные отклики нейронов со временем репарировались. Пострадиационные изменения соответствовали возрастному контролю.

Заключение.

В предшествующих наших публикациях по рассматриваемой проблеме подробно рассмотрена экологическая обстановка в зоне Чернобыльской катастрофы, профессиональная деятельность ликвидаторов ее последствий, их дозы облучения и состояние психоневрологического статуса как во время выполнения поставленных задач в очаге радиационного загрязнения, так и в течение всей последующей жизни [16, 19, 20]. Показано, что, не смотря на выраженные клинические проявления психоневрологических и соматических расстройств у облученных лиц, в нейронах различных отделов головного мозга отсутствовали функционально значимые патогистологические изменения в диапазоне доз γ -облучения от 0,1 до 1 Гр, а также от мощности дозы радиационного воздействия в диапазоне от 50 до 660 сГр/ч [21, 22, 23, 24]. Данное исследование в целом подтвердило эти наблюдения, однако математическое моделирование позволило изменить представление о роли такого важнейшего экологического фактора, как повышенный радиационный фон в росте психоневрологических заболеваний. Проведенные исследования показали, что пострадиационные церебральные эффекты зависели не только от интенсивности воздействия, но и от времени, прошедшего после начала эксперимента. Радиационное воздействие вызывало отклик у большинства показателей функционального состояния нейронов, но в последующем они нивелировались. Возможно, что какая-то часть изменения сохранялась и со временем накапливалась, что и приводило к отдельным экстремумам нарушения нервной деятельности. Такие флуктуации нейроморфологических показателей в отдельные доза-временные интервалы, хотя и имели стохастический характер, свидетельствовали о нестабильности постоянства структурно-функциональной организации нервных клеток и изменении их функционального состояния. Таким образом, малые радиационные воздействия, даже в регламентированных дозах, способны вызывать в головном мозге структурно-функциональные изменения, проявляющиеся пограничными расстройствами здоровья у пострадавшего контингента.

Литература

1. Василенко И.Я. Малые дозы ионизирующей радиации / И.Я. Василенко // Мед. радиология. – 1991. – № 1. – С. 48–54.
2. Ильин Л.А. О некоторых итогах выполнения программы С 27 / Л.А. Ильин // Вестник АМН СССР. – 1991. – № 11. – С. 27–37.
3. Кудряшов Ю.Б. Основные принципы в радиобиологии // Радиационная биология и радиоэкология / Ю.Б. Кудряшов. – 2001. – Т. 4. – № 5. – С. 531–547.
4. Василенко И.Я. Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС: роль внутреннего облучения / И.Я. Василенко, О.И. Василенко // Бюллетень по атомной энергии. – 2006. – № 4. – С. 65–70.

5. Захарченко М.П. Радиация, экология, здоровье / М.П. Захарченко, В.Х. Хавинсон, С.Б. Оникиенко. – СПб.: Гуманистика, 2003. – 330 с.
6. Ушаков И.Б. Воздействие факторов Чернобыльской аварии на психоневрологический статус ликвидаторов-вертолетчиков // Медицинская радиология и радиационная безопасность / И.Б. Ушаков, В.П. Федоров. – 2018. – Т. 63. – № 4. – С. 22–32.
7. Ушаков И.Б. Радиационные риски вертолетчиков при ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС: ранние и отдаленные нарушения здоровья / И.Б. Ушаков, В.П. Федоров // Медицина катастроф. – 2021. – № 3. – С. 52–57.
8. Шамрей В.К. Радиационная психосоматическая болезнь у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС / В.К. Шамрей, Е.И. Чистякова, Е.Н. Матыцина // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2016. – № 1. – С. 21–34.
9. Торубаров Ф.С. Спектрально-корреляционный анализ ЭЭГ у ликвидаторов аварии на ЧАЭС с неврологическими нарушениями / Ф.С. Торубаров, М.В. Кулешова, С.Н. Лукьянова // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 40–45.
10. Гуськова А.К. Радиация и мозг человека / А.К. Гуськова // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2001. – Т. 46. – № 5. – С. 47–55.
11. Алексанин С.С. Патогенетические закономерности формирования соматической патологии после радиационных аварий в отдаленном периоде / С.С. Алексанин // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2008. – Т. 23. – № 3. – С. 10–13.
12. Даренская Н.Г. От эксперимента на животных – к человеку: поиски и решения / Н.Г. Даренская, И.Б. Ушаков, И.В. Иванов. – Воронеж: Научная книга, 2010. – 237 с.
13. Ушаков И.Б. Человек в небе Чернобыля: летчик и радиационная авария / И.Б. Ушаков, Б.И. Давыдов, С.К. Солдатов. – Ростов-на-Дону, 1994. – 168 с.
14. Ушаков И.Б. Квалиметрия жизни и отдаленные последствия Чернобыльской катастрофы / И.Б. Ушаков. – М., 1999. – 123 с.
15. Астахова А. Н., Радиационные риски в авиации. История и современность / А.Н. Астахова, В.П. Федоров, И.Б. Ушаков. – Воронеж: Научная книга, 2019. – 396 с.
16. Матрюков А.А. Ядерная катастрофа века: исторический очерк / А.А. Матрюков, В.П. Федоров. – Воронеж: Научная книга, 2016. – 404 с.
17. Федоров В.П. Обоснование и разработка моделей для оценки церебральных последствий у летного состава после работ на радиоактивно загрязненной местности / В.П. Федоров, И.Б. Ушаков, А.Н. Астахова // Материалы науч. конференции «Актуальные проблемы авиационной и космической медицины». СПб: ВМА, 2018. – С. 294–296.
18. Федоров В.П. Математическое моделирование как неотъемлемый этап исследований церебральных пограничных состояний / В.П. Федоров, О.М. Холодов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2022. – Т. 21. – № 2. – С. 86–93.
19. Ушаков И.Б. Экология человека после Чернобыльской катастрофы: радиационный экологический стресс и здоровье человека / И.Б. Ушаков, Н.И. Арлащенко, С.К. Солдатов. – Воронеж: ВГУ, 2001. – 723 с.
20. Федоров В.П. Радиоэкология и стадии реабилитации / В.П. Федоров, О.Ю. Терезанов, А.В. Петров // Аллергология и иммунология. – 2007. – Т. 8. – № 3. – С. 347–348.
21. Ушаков И.Б. Малые радиационные воздействия и мозг / И.Б. Ушаков, В.П. Федоров. – Воронеж: Научная книга, 2015. – 536 с.
22. Гундарова О.П. Мозжечок и радиация / О.П. Гундарова, В.П. Федоров, А.Г. Кварацхелия. – М.: Научная книга, 2021. – 312 с.
23. Федоров В.П. Церебральные эффекты у ликвидаторов Чернобыльской аварии / В.П. Федоров, И.Б. Ушаков, Н.В. Федоров. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 390 с.
24. Федоров В.П. Риск церебральных нарушений при пролонгированных малых радиационных воздействиях / В.П. Федоров // Вестник Российской Военно-медицинской академии. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 111–113.

References

1. Vasilenko I.YA. Malye dozy ioniziruyushchej radiacii / I.YA. Vasilenko // Med. radiologiya. –1991. – № 1. – S. 48–54.
2. Il'in L.A. O nekotoryh itogah vypolneniya programmy S 27 / L.A. Il'in // Vestnik AMN SSSR. – 1991. – № 11. – S. 27–37.
3. Kudryashov YU.B. Osnovnye principy v radiobiologii // Radiacionnaya biologiya i radioekologiya / YU.B. Kudryashov. – 2001. – T. 4. – № 5. – S. 531–547.
4. Vasilenko I.YA. Medicinskie posledstviya avarii na CHernobyl'skoj AES: rol' vnutrennego oblucheniya / I.YA. Vasilenko, O.I. Vasilenko // Byulleten' po atomnoj energii. – 2006. – № 4. – S. 65–70.
5. Zaharchenko M.P. Radiaciya, ekologiya, zdorov'e / M.P. Zaharchenko, V.H. Havinson, S.B. Onikienko. – SPb.: Gumanistika, 2003. – 330 s.
6. Ushakov I.B. Vozdejstvie faktorov CHernobyl'skoj avarii na psihonevrologicheskij status likvidatorov-vertoletchikov // Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost' / I.B. Ushakov, V.P. Fedorov. – 2018. – T. 63. – № 4. – S. 22–32.
7. Ushakov I.B. Radiacionnye riski vertoletchikov pri likvidacii posledstvij avarii na CHernobyl'skoj AES: rannie i otdalennye narusheniya zdorov'ya / I.B. Ushakov, V.P. Fedorov // Medicina katastrof. – 2021. – № 3. – S. 52–57.
8. Shamrej V.K. Radiacionnaya psihosomaticeskaya bolezni' u likvidatorov posledstvij avarii na CHernobyl'skoj AES / V.K. SHamrej, E.I. CHistyakova, E.N. Matycina // Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah. – 2016. – № 1. – S. 21–34.
9. Torubarov F.S. Spektral'no-korrelyacionnyj analiz EEG u likvidatorov avarii na CHAES s nevrologicheskimi narusheniyami / F.S. Torubarov, M.V. Kuleshova, S.N. Luk'yanova // Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'. – 2019. – T. 64. – № 3. – S. 40–45.
10. Gus'kova A.K. Radiaciya i mozg cheloveka / A.K. Gus'kova // Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'. – 2001. – T. 46. – № 5. – S. 47–55.
11. Aleksanin S.S. Patogeneticheskie zakonomernosti formirovaniya somaticheskoi patologii posle radiacionnyh avarij v otdalennom periode / S.S. Aleksanin // Vestnik Rossijskoj voenno-medicinskoj akademii. – 2008. – T. 23. – № 3. – S. 10–13.
12. Darenskaya N.G. Ot eksperimenta na zhivotnyh – k cheloveku: poiski i resheniya / N.G. Darenskaya, I.B. Ushakov, I.V. Ivanov. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2010. – 237 s.
13. Ushakov I.B. CHelovek v nebe CHernobylya: letchik i radiacionnaya avariya / I.B. Ushakov, B.I. Davydov, S.K. Soldatov. – Rostov-na-Donu, 1994. – 168 s.
14. Ushakov I.B. Kvalimetriya zhizni i otdalennye posledstviya CHernobyl'skoj katastrofy / I.B. Ushakov. – M., 1999. – 123 s.
15. Astashova A. N., Radiacionnye riski v aviacii. Istoriya i sovremennost' / A.N. Astashova, V.P. Fedorov, I.B. Ushakov. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2019. – 396 s.
16. Mastryukov A.A. YAdernaya katastrofa veka: istoricheskij ocherk / A.A. Mastryukov, V.P. Fedorov. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2016. – 404 s.
17. Fedorov V.P. Obosnovanie i razrabotka modelej dlya ocenki cerebral'nyh posledstvij u letnogo sostava posle rabot na radioaktivno zagryaznennoj mestnosti / V.P. Fedorov, I.B. Ushakov, A.N. Astashova // Materialy nauch. konferencii «Aktual'nye problemy aviacionnoj i kosmicheskoi mediciny». SPb: VMA, 2018. – S. 294–296.
18. Fedorov V.P. Matematicheskoe modelirovanie kak neot'emlemyj etap issledovanij cerebral'nyh pograničnyh sostojanij / V.P. Fedorov, O.M. Holodov // Sistemnyj analiz i upravlenie v biomedicinskih sistemah. – 2022. – T. 21. – № 2. – S. 86–93.
19. Ushakov I.B. Ekologiya cheloveka posle CHernobyl'skoj katastrofy: radiacionnyj ekologicheskij stress i zdorov'e cheloveka / I.B. Ushakov, N.I. Arlashchenko, S.K. Soldatov. – Voronezh: VGU, 2001. – 723 s.
20. Fedorov V.P. Radioekologiya i stadii rehabilitacii / V.P. Fedorov, O.YU. Terezanov, A.V. Petrov // Allergologiya i immunologiya. – 2007. – T. 8. – № 3. – S. 347–348.

21. Ushakov I.B. Malye radiacionnye vozdejstviya i mozg / I.B. Ushakov, V.P. Fedorov. – Voronezh: Nauchnaya kniga, 2015. –536 s.
22. Gundarova O.P. Mozzhechok i radiaciya / O.P. Gundarova, V.P. Fedorov, A.G. Kvarackheliya.– М.: Nauchnaya kniga, 2021.–312 s.
23. Fedorov V.P. Cerebral'nye efekty u likvidatorov CHernobyl'skoj avarii / V.P. Fedorov, I.B. Ushakov, N.V. Fedorov. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 390 s.
24. Fedorov V.P. Risk cerebral'nyh narushenij pri prolongirovannyh malyh radiacionnyh vozdejstviyah / V.P. Fedorov // Vestnik Rossijskoj Voenno-medicinskoj akademii. – 2018. – Т. 63. – № 3. – S. 111–113.