

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
MINISTRY OF HEALTHCARE OF THE RUSSIAN FEDERATION
ФЕДЕРАЛЬНОЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО (ФМБА РОССИИ)
FEDERAL MEDICAL BIOLOGICAL AGENCY (THE FMBA OF RUSSIA)

МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ

И

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

MEDICAL RADIOLOGY AND RADIATION SAFETY

Meditinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost

2020

Том 65

№ 3

Периодический научный журнал. Издаётся с 1956 года
Periodical Scientific Journal. Published since 1956

Журнал включен в перечень ВАК ведущих рецензируемых научных журналов,
рекомендованных для опубликования результатов диссертационных исследований.
The journal is included in the list of HAC (Higher Attestation Commission) of the leading
peer-reviewed scientific journals recommended for publication of the results of thesis works

Журнал вошел в международную библиографическую базу данных Scopus
и в Перечень Russian Science Citation Index (RSCI), размещенный на платформе Web of Science
The journal entered the bibliographic database Scopus
and the Russian Science Citation Index (RSCI), hosted on the Web of Science platform

Москва
Moscow

МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Журнал основан в январе 1956 года
(до 30 декабря 1993 года выходил под названием «Медицинская радиология»)
Периодичность издания: шесть выпусков в год

ISSN 1024-6177 (Print)
ISSN 2618-9615 (Online)

Журнал выходит при поддержке Федерального медико-биологического агентства России (ФМБА России)

Главный редактор В.В. УЙБА – д.м.н., проф.

Редакционная коллегия:

Г.М. Аветисов – д.б.н., проф.; И.И. Амосов – д.м.н., проф.; А.В. Бойко – д.м.н., проф.; А.П. Бирюков – д.м.н., проф.;
А.Ю. Бушманов – д.м.н., проф.; А.А. Вайнсон – д.б.н., проф.; В.Ф. Демин – д.т.н., к.ф.-м.н., доцент;
И.П. Коренков – д.б.н., к.т.н., проф.; А.Н. Котеров – д.б.н.; М. Марков – PhD, проф., США;
Б.Я. Наркевич – д.т.н., к.ф.-м.н., проф., научный и выпускающий редактор; К. Нурлыбаев – к.т.н.; В.В. Романов;
А.С. Самойлов – д.м.н., проф., член-корр. РАН, зам. главного редактора; М.К. Сневе – PhD, Норвегия;
С.И. Ткачев – д.м.н., проф.; И.Е. Тюрин – д.м.н., проф.; П. Урингтон – PhD, проф., США; Б.Н. Фаунтес – PhD, США;
Н.К. Шандала – д.м.н.; А.В. Шафиркин – д.б.н.; С.М. Шинкарев – д.т.н.

Редакционный совет:

С.С. Алексанин – д.м.н., проф., Санкт-Петербург; М.И. Балонов – д.б.н., проф., Санкт-Петербург;
А.Х. Гонзалес – академик, представитель НКДАР ООН, член МАГАТЭ, Аргентина; М.В. Забелин – д.м.н., проф.;
В.К. Иванов – д.т.н., проф., член-корр. РАН, Обнинск; Л.А. Ильин – д.м.н., проф., академик РАН;
П.К. Казымбет – д.м.н., проф., Казахстан; Н.М. Оганесян – д.м.н., проф., Армения;
М. Пинак – член МАГАТЭ; А.В. Рожко – д.м.н., доцент, Белоруссия; В.А. Саенко – д.б.н., ассоциированный проф., Япония

Все статьи в журнале печатаются бесплатно

Заведующая редакцией Э.С. Зубенкова
Компьютерная верстка В.В. Колесниченко
Технический редактор В.В. Колесниченко

Адрес редакции журнала:

123098, Москва, ул. Живописная, 46
Телефон: (499) 190-95-51

E-mail: medradiol@fmbcfmba.ru

Сайт журнала: <http://medradiol.fmbafmbc.ru/>

Годовой подписной индекс Агентства «Роспечать» – 71814

Подписано в печать 27.07.2020. Формат 60 × 88/8

Печать офсетная. 11,0 печ. л. Тираж 1000 экз. Заказ №

Отпечатано в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА
России. 123098, Москва, ул. Живописная, 46

MEDICAL RADIOLOGY AND RADIATION SAFETY

The journal was founded in January 1956
Up to 30 December 1993 was published under the title «Medical Radiology»
Frequency of publication: six issues per year

ISSN 1024-6177 (Print)
ISSN 2618-9615 (Online)

The journal is published with support of The Federal Medical-Biological Agency of Russia FMBA of Russia

Editor in Chief Vladimir Uiba – Dr. Sci. Med., Prof.

Editorial Board:

G. M. Avetisov – Dr. Sci. Biol., Prof.; V. I. Amosov – Dr. Sci. Med., Prof.; A. V. Boiko – Dr. Sci. Med., Prof.;
A. P. Biryukov – Dr. Sci. Med., Prof.; A. Yu. Bushmanov – Dr. Sci. Med., Prof.; A. A. Wainson – Dr. Sci. Biol., Prof.;
V. F. Demin – Dr. Sci. Tech., Cand. Sci. Phys.-Math., Assistant Prof.; I. P. Korenkov – Dr. Sci. Biol., PhD Tech., Prof.;
A. N. Kotterov – Dr. Sci. Biol.; M. Markov – Prof., USA; B. Ya. Narkevich – Dr. Sci. Tech., PhD Phys.-Math., Prof., Scientific
and Production Editor; K. N. Nurlybaev – PhD Tech.; V. V. Romanov; A. S. Samoylov – Dr. Sci. Med., Prof., Corresponding Member
of RAS, Deputy Chief Editor; M. K. Sneve – Norway; S. I. Tkachev – Dr. Sci. Med., Prof.; I. E. Tyurin – Dr. Sci. Med., Prof.;
P. Wrington USA; B. N. Fountas – USA; N. K. Shandala – Dr. Sci. Med.; A. V. Shafirkin – Dr. Sci. Biol.; S. M. Shinkarev – Dr. Sci. Tech.

Editorial Council:

S. S. Aleksanin – Dr. Sci. Med., Prof.; M. I. Balonov – Dr. Sci. Biol., Prof.; A. J. Gonzalez – Academician, Member of the IAEA;
M. V. Zabelin – Dr. Sci. Med., Prof.; V. K. Ivanov – Dr. Sci. Tech., Prof., Chairman of the Russian Scientific Commission on
Radiological Protection, Corresponding Member of RAS, L. A. Il'yin – Dr. Sci. Med., Prof., Academician of RAS;
P. K. Kazymbet – Dr. Sci. Med., Prof., Kazakhstan; N. M. Oganessian – Dr. Sci. Med., Prof., Armenia;
M. Pinak – Member of the IAEA; A. V. Rozhko – Dr. Sci. Med., Associate Prof., Belarus;
V. A. Saenko – Dr. Sci. Biol., Associate Prof., Japan

All articles in the journal are printed free of charge

Head of Editorial Office: E. S. Zubenkova
Computer-aided makeup: V. V. Kolesnichenko
Technical Editor: V. V. Kolesnichenko

Address of Editorial Board:

46, Zhivopisnaya st., 123098, Moscow, Russia
Phone: +7 (499) 190-95-51

E-mail: medradiol@fmbcfmba.ru

The journal website: <http://medradiol.fmbafmbc.ru/>

The annual subscription index Agency «Rospechat» – 71814

Signed to print 27.07.2020. Format 60 × 88/8

Offset printing. 11,0 printed sheets. 1000 copies. Order #

Printed by SRC-FMBC.

123098, Moscow, Zhivopisnaya st. 46

СОДЕРЖАНИЕ № 3 – 2020

РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ	5	Основные подходы к экстраполяции данных с животных на человека в радиобиологическом эксперименте <i>И.В. Иванов, И.Б. Ушаков</i>
РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	13	Оценка вклада Государственного научного центра «НИИ атомных реакторов» в формирование техногенных рисков для населения Димитровграда <i>А.А. Аракелян, М.В. Ведерникова, Е.А. Гаврилина, К.А. Печкурова</i>
	20	Операционные величины радиоактивного загрязнения кожи в случае радиационной аварии <i>М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Ю.В. Абрамов, Г.П. Фролов, В.Н. Клочков, Б.А. Кухта, И.К. Теснов</i>
	27	О необходимости корректировки НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010 <i>Б.Е. Серебряков</i>
РАДИАЦИОННАЯ ЭПИДЕМИОЛОГИЯ	31	Состояние здоровья населения в районе расположения судоремонтного завода «Нерпа», осуществляющего работы по утилизации объекта ядерного наследия – плавучей технической базы «Лепсе» <i>А.М. Лягинская, Н.К. Шандала, С.М. Киселев, А.П. Ермалицкий, Д.В. Исаев, В.В. Купцов</i>
	40	Здоровье работников с поступлением радионуклидов при травмах кожных покровов <i>А.В. Гурьев, А.Р. Туков, А.Ю. Бушманов, М.Ю. Калинина, А.В. Зубов</i>
	45	Прогноз радиационных рисков населения на загрязнённых ¹³⁷Cs территориях России в соответствии с современными рекомендациями МКРЗ <i>А.Н. Меняйло, В.В. Кащеев, Е.А. Пряхин, С.Ю. Чекин, М.А. Максютлов, К.А. Туманов, В.К. Иванов</i>
НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ	53	Постлучевые эффекты низкоинтенсивного электромагнитного излучения с частотой 900 МГц в печени крыс <i>М.С. Петросян, Л.С. Нерсесова, Е.М. Каралова, А.С. Аветисян, Л.О. Аброян, Л.А. Акопян, М.Г. Газарянц, Ж.И. Акопян</i>
РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА, ТЕХНИКА И ДОЗИМЕТРИЯ	59	Дисперсность, морфология и элементный состав аэрозольных частиц на производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива <i>А.Г. Цовьянов, А.Е. Карев, С.М. Шинкарев, И.П. Коренков, А.С. Самойлов, В.А. Стебельков, А.В. Жуков, К.М. Измestьев, С.Г. Терентьев</i>
ОБЗОР	66	Международные и отечественные подходы к проведению йодной профилактики при аварии ядерного реактора <i>Е.Г. Метляев, Л.С. Богданова, М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Г.П. Фролов, А.М. Лягинская</i>
ЛЕКЦИЯ	73	Применение рентгеновской компьютерной томографии для оценки концентрации интратиреоидного йода и запасов тиреоидных гормонов непосредственно в щитовидной железе <i>И.О. Томашевский, И.А. Курникова, R. V. Sargar</i>
ДИСКУССИЯ	77	К дискуссии о внесении изменений в федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» <i>С.М. Шинкарев, О.А. Кочетков, В.Н. Клочков, В.Г. Барчуков</i>
ЗДРАВООХРАНЕНИЕ И ПАНДЕМИЯ	79	Уроки для здравоохранения: авария на ЧАЭС и пандемия COVID-19 <i>А.Ю. Бушманов, И.А. Галстян, В.Ю. Соловьев, М.В. Кончаловский</i>
	85	Радиационная обработка защитных комбинезонов и выбор средств индивидуальной защиты персонала, контактирующего с коронавирусной инфекцией <i>А.С. Самойлов, Ю.Д. Удалов, В.И. Рубцов, В.П. Зиновьев, И.В. Оленина, А.Н. Тимошенко, В.В. Андреев, Ю.А. Бушманов, А.В. Белоусов, А.С. Кретов, Н.А. Селезнев, Ю.Е. Смирнов</i>
НЕКРОЛОГ	95	Памяти В.Ф. Демина
	96	Памяти В.Н. Мальцева

CONTENTS No. 3 – 2020

RADIATION BIOLOGY	5	Basic Approaches to the Extrapolation of Data of Animals to Human in Radiobiological Experiment <i>I.V. Ivanov, I.B. Ushakov</i>
RADIATION SAFETY	13	Assessment of the Contribution of Research Institute of Atomic Reactors in Technogenic Risks Formation for the Population of the City Dimitrovgrad <i>A.A. Arakelyan, M.V. Vedernikova, E.A. Gavrilina, K.A. Pechkurova</i>
	20	Operational Values of Radioactive Skin Contamination in the Case of Radiological Accident <i>M.I. Grachev, Yu.A. Salenko, Yu.V. Abramov, G.P. Frolov, V.N. Klochkov, B.A. Kukhta, I.K. Tesnov</i>
	27	About of the Necessary of Corrections of the NRB-99/2009 and OSPORB-99/2010 <i>B.E. Serebryakov</i>
RADIATION EPIDEMIOLOGY	31	Examination of the Health Status of the Population in the Vicinity of the Nerpa Shipyard Involved in the Decommission and Dismantlement of the Nuclear Legacy Facility – FTB Lepse <i>A.M. Lyaginskaya, N.K. Shandala, S.M. Kiselev, A.P. Ermalitsky, D.V. Isaev, V.V. Kuptsov</i>
	40	The Health of Workers with the Intake of Radionuclides in Case of Skin Damage <i>A.V. Guryev, A.R. Turov, A.Yu. Bushmanov, M.Yu. Kalinina, A.V. Zubov</i>
	45	Forecast of Radiation Risks of the Population in the Contaminated ¹³⁷Cs Territories of Russia, in Accordance with Current ICRP Recommendations <i>A.N. Menyajlo, V.V. Kashcheev, E.A. Pryakhin, S.Yu. Chekin, M.A. Maksimov, K.A. Tumanov, V.K. Ivanov</i>
NON-IONIZING RADIATION	53	Postradiation Effects of Low Intensity Electromagnetic Radiation with a Frequency of 900 MHz in Rat Liver <i>M.S. Petrosyan, L.S. Nersisova, E.M. Karalova, A.S. Avetisyan, L.O. Abroyan, L.A. Akopian, M.G. Gazaryants, J.I. Akopian</i>
RADIATION PHYSICS, TECHNOLOGY AND DOSIMETRY	59	Size Distribution, Morphology and Elemental Composition of Aerosol Particles on the Fabrication of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel <i>A.G. Tsovyannov, A.E. Karev, S.M. Shinkarev, I.P. Korenkov, A.S. Samoylov, V.A. Stebelkov, A.V. Zhukov, K.M. Izmaytyev, S.G. Terentiev</i>
REVIEW	66	International and National Approaches to the Conducting of Iodine Thyroid Blocking in the Accident of a Nuclear Reactor <i>E.G. Metlyayev, L.S. Bogdanova, M.I. Grachev, Yu.A. Salenko, G.P. Frolov, A.M. Lyaginskaya</i>
LECTURE	73	The Use of X-ray Computed Tomography to Assess the Intrathyroidal Iodine Concentration and its Storage in the Thyroid Gland <i>I.O. Tomashevskiy, I.A. Kurnikova, R.V. Sargar</i>
DISCUSSION	77	To Discussion on Amendments to the Federal Law as of 09.01.1996 No. 3-FZ «About Radiation Safety of the Public» <i>S.M. Shinkarev, O.A. Kochetkov, V.N. Klochkov, V.G. Barchukov</i>
HEALTH AND THE PANDEMIC	79	Lessons for Health Service: the Chernobyl Accident and the COVID-19 Pandemic <i>A.Yu. Bushmanov, I.A. Galstyan, V.Yu. Soloviev, M.V. Konchalovsky</i>
	85	Radiation Treatment of Protective Overalls and Selection of Personal Protection Equipment for the Personnel Exposed to Coronavirus Infection <i>A.S. Samoylov, Yu.D. Udalov, V.I. Rubtsov, V.P. Zinoviev, I.V. Olenina, A.N. Timoshenko, V.V. Andreev, Yu.A. Bushmanov, A.V. Belousov, A.S. Kretov, N.A. Seleznev, Yu.E. Smirnov</i>
COMMEMORATION	95	Commemoration of V. F. Demin
	96	Commemoration of V. N. Maltsev

И.В. Иванов^{1,2}, И.Б. Ушаков³

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДАННЫХ С ЖИВОТНЫХ НА ЧЕЛОВЕКА В РАДИОБИОЛОГИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

¹ Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава РФ (Сеченовский Университет), Москва, Россия

² Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины МО РФ, Санкт-Петербург, Россия

³ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия
Контактное лицо: Иванов Иван Васильевич, ivanov-iv@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Обосновать основные подходы к переносу экспериментальных данных с лабораторных животных на человека в радиобиологии.

Материал и методы: Рассмотрены общие закономерности строения организма животных и человека и динамики процессов их жизнедеятельности, в том числе при воздействии различных факторов окружающей среды, а также тенденция их приближения в эволюционном ряду от низших млекопитающих к человеку.

Результаты: Выбор критериев и методов оценки состояния организма человека и сопоставления с таковыми у животных в моделируемых ситуациях систематизирован по трем основным уровням – физиолого-биохимическому, нейропсихологическому и социальному. К первому уровню отнесены параметры физиологических реакций, клинично-лабораторные и биохимические показатели, ко второму уровню – показатели, характеризующие функции высшей нервной деятельности, нейродинамические реакции, выполнение целенаправленных действий и психологических проявлений, к третьему уровню – характеристики межличностных взаимодействий. Рассмотрены виды, задачи и методики исследований, которые проводятся на мелких животных-грызунах (скрининговые) и на более крупных животных из других отрядов млекопитающих, более близких по эволюционному развитию и другим параметрам к человеку (углубленные).

Заключение: Показано, что при сопоставлении результатов исследований, полученных в опытах на животных и в наблюдениях на людях, важно использовать коэффициенты для количественного переноса данных с животных на человека, которые требуют тщательного обоснования с учетом межвидовых особенностей млекопитающих и человека.

Ключевые слова: радиобиология, медико-биологический эксперимент, лабораторные животные, коэффициенты экстраполяции, параметры физиологических реакций, клинично-лабораторные показатели, высшая нервная деятельность, нейродинамические реакции, межличностные взаимодействия

Для цитирования: Иванов И.В., Ушаков И.Б. Основные подходы к экстраполяции данных с животных на человека в радиобиологическом эксперименте. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):5-12.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-5-12

Введение

Экстраполяция на человека данных, получаемых в экспериментальных исследованиях на животных, является важной задачей современной биологии и медицины [1–4]. Она имеет большое научное и практическое значение, особенно в связи с необходимостью экспериментальной оценки воздействия на организм человека различных неблагоприятных факторов окружающей среды. Влияние многих из них практически невозможно количественно оценить непосредственно на людях. В то же время в экспериментах довольно трудно и не всегда возможно точно смоделировать различные ситуации и условия, в которых может оказаться человек. В связи с этим перед исследователями ставятся задачи изучения общих закономерностей действия различных факторов и разработки методик переноса их на человека. Изучение эффектов различных фармакологических средств, в том числе радиопротекторов, до применения их на людях, в соответствии с нормативными актами также требует предварительного изучения их в экспериментах на животных.

Литературные данные в этой области представляют несомненный теоретический интерес, но они посвящены, в основном, методам математической обработки и моделирования [5–7], токсикологическим

аспектам [3, 8–10], канцерогенезу [11–14] и не содержат конкретных для экспериментатора-радиобиолога данных по путям экстраполяции и количественных оценок межвидовых переносов дозо-временных параметров лучевого поражения организма.

Цель обзорного исследования состояла в обосновании основных подходов к переносу экспериментальных данных с лабораторных животных на человека в радиобиологии.

Экстраполяция экспериментальных данных на человека

В общем виде проблема переноса экспериментальных данных на человека обычно решается с целью определения в конечном итоге, во-первых, характеристик воздействующего фактора, который будет (или не будет) вызывать у человека определенные изменения, сходные с реакциями у животных; во-вторых, с целью определения динамики этих изменений во времени (время начала и продолжительность), в-третьих, для установления и учета качественных отличий в реакциях человека по сравнению с другими видами млекопитающих.

В большинстве подобных работ затрагиваются вопросы экстраполяции эффектов при острых и однократных воздействиях ионизирующего излучения.

Менее разработаны подходы к переносу данных по степени выраженности и длительности реакций организма при протяженных и многократных экспозициях. Эта задача становится также актуальной в связи с увеличением частоты встречаемости длительных воздействий на человека многочисленных неблагоприятных факторов окружающей среды. Решение задач переноса на человека подобных продолжительных воздействий в экспериментах на животных невозможно без учета адаптационных и предельных компенсаторных и восстановительных возможностей организма. Обычно такие исследования заканчиваются теоретическим обоснованием предельно-допустимых уровней (ПДУ) воздействующего фактора для человека в профессиональных условиях и всего населения.

Для допустимости переноса экспериментальных данных с модели на человека необходимо соблюдение главного условия моделирования, а именно принципа подобия экспериментальной модели процессу, который она должна воспроизвести, в том числе возникающему при воздействии какого-либо фактора окружающей среды. Принцип подобия должен реализоваться через критерии подобия: сходство морфо-физиологических характеристик человека и выбранной модели; общность метаболизма веществ; единство критических органов и систем, реагирующих на то или иное воздействие, и, как следствие, воспроизводимость симптомов изучаемых процессов. Кроме того, необходимо учитывать и временной фактор развития патологического процесса у человека и используемого животного. Поэтому при моделировании любых процессов, изменяющихся во времени, например, скорости его развития, параметров кинетики и репарации, необходимо определение степени подобия модели и по временному критерию, что возможно сделать путем расчета соответствующих коэффициентов.

Корректная экстраполяция экспериментальных данных невозможна без систематизированного представления о существе процессов и вскрытия основных закономерностей, подлежащих переносу на человека. Органотопика, характер, выраженность изменений и развитие реакций на исследуемые агенты во времени (их кинетика) определяется силой воздействия, а также закономерностями строения и реагирования критических клеточных систем, то есть систем, изменение структуры которых определяет в основном характер нарушений или поражения организма при данном уровне и условиях воздействия. В связи с этим в подобных исследованиях важно получить экспериментальные дозовые (доза-эффект) и кинетические (время-эффект) кривые, адекватно отражающие закономерности реакции критических органов и систем млекопитающих разных видов в зависимости от степени и условий воздействия изучаемых факторов.

При экстраполяции необходимо также учитывать, что между результатами наблюдения на людях и исследованиями на лабораторных животных имеются не только количественные, но и некоторые качественные различия. Так, в опытах на некоторых видах животных невозможно воспроизвести отдельные биохимические и обменные реакции, происходящие в организме человека при воздействии специфических факторов

внешней среды. Поэтому в зависимости от характера и задач исследования, в каждом конкретном случае необходимо выбирать такую модель, которая наиболее адекватно позволит воссоздать соответствующий процесс у человека. В экспериментальных же исследованиях этому важному вопросу не всегда уделяется достаточное внимание.

Разработка путей и принципов экстраполяции экспериментальных данных с животных на человека является чрезвычайно трудной проблемой. Сложность определяется, прежде всего, неразрывной связью у человека социальных и биологических процессов, а также существованием у него ряда специфических биологических особенностей, свойственных только человеку и требующих соответствующего учета. Это, прежде всего, различия в уровне развития высшей нервной деятельности и продолжительности жизни животных и человека, в кинетике обновления клеточных популяций и в скорости течения обменных процессов, в темпах восстановления после повреждения, в чувствительности к воздействию разнообразных агентов. Кроме того, необходимо учитывать отдельные отличия в распределении различных веществ в организме человека и кинетике их выведения.

Сложность экстраполяции заключается также и в том, что, во-первых, тесная взаимосвязь всех систем и функций на разных уровнях организации и функционирования приводит к тому, что законы для всего организма не складываются аддитивно из законов, справедливых для отдельных уровней; во-вторых, воздействие какого-либо фактора любой интенсивности влияет в той или иной степени на все метаболические процессы и функции на всех уровнях, изменяя характер и скорость метаболических процессов; степень же нарушения отдельных процессов и клеточных структур не всегда соответствует их роли в жизнедеятельности организма и развитию патологического процесса; в-третьих, огромное разнообразие клеток в организме, обладающих различными функциями и отличающихся разной степенью дифференцировки, различным темпом деления и продолжительностью жизни, неодинаковой чувствительностью к воздействию различных факторов, обеспечивает согласованное функционирование этих различных клеточных систем и целостную жизнедеятельность всего организма, отличаясь определенным своеобразием у животных и человека.

Все это приводит к тому, что при одних и тех же условиях воздействия исследуемых факторов на организм реакции разных видов млекопитающих отличаются как по выраженности, так и по времени их развития, что обуславливает трудности при поиске закономерностей и обосновании единого методического подхода к переносу результатов экспериментов на человека. Отдельные особенности функционирования организма человека по сравнению с животными неизбежно требуют введения ряда допущений при экстраполяции экспериментальных данных на человека. В то же время, несмотря на имеющиеся видовые особенности, разработка подходов к экстраполяции возможна и необходима, так как существует близость анатомо-физиологических свойств и биохимических процессов организма животных и человека:

- наличие одинаковых органов, однотипность их функционирования, сходство основных функций;
- сходство химического состава и структуры большинства тканей организма;
- качественная однородность основных биологических процессов;
- основные реакции обмена веществ и энергии, обусловленные окислительно-восстановительными процессами, качественно сходны у всех животных и человека;
- сходство в изотопном составе поступающих в организм из окружающей среды воды, воздуха, органических и неорганических питательных веществ;
- динамика обмена попавших в организм веществ обусловлена и количественно связана с основными метаболическими процессами, происходящими в организме;
- изменения, развивающиеся в организме животных и человека после воздействия разных факторов окружающей среды, в основном, качественно однотипны.

Следовательно, общность основных закономерностей строения и динамики разнообразных изменений в организме животных и человека в процессе функционирования и при воздействии различных факторов окружающей среды, а также тенденция их приближения в эволюционном ряду от низших млекопитающих к человеку позволяют считать принципиально возможной разработку подходов к количественному переносу экспериментальных данных с животных на человека с учетом определенных допущений и отдельных ограничений.

В практике медико-биологических исследований используются два направления по переносу экспериментальных данных на человека. Одно из них может быть обозначено как формальное и сводится к прямому переносу изменений отдельных показателей у животных и человека при воздействии одного и того же фактора. Определяется, например, характер какой-либо реакции и её выраженность на воздействие одного из факторов определенной силы. При этом не учитывается, что при одной и той же силе воздействия у разных видов животных характер развития реакции, ближайшие и отдаленные последствия могут существенно отличаться. И хотя это направление имеет определенное значение, оно мало перспективно.

Второе направление основано на знании и понимании общих закономерностей видовых различий в реакции на воздействие какого-либо фактора различной силы, то есть это направление базируется на определении количественных закономерностей [1]. В этом случае в качестве основной предпосылки рассматриваются закономерности развития процессов повреждения и восстановления у животных разных видов и человека.

Для характеристики особенностей поражения на разных уровнях организации организма необходимо использование разных биологических критериев, соответствующих каждому уровню. Для оценки поражения на молекулярном уровне требуется использование критериев, отражающих особенности строения жизненно важных биохимических систем; на клеточном

– знание пространственного расположения и строения наиболее важных структур клетки; на тканевом – применение критериев, учитывающих физиологические и морфологические особенности тканей, их чувствительность и скорость обновления. Процессы на этих уровнях интегрируются и проявляются в особенностях патологических процессов на уровне целого организма. Для характеристики особенностей эффектов токсических факторов на уровне целостного организма необходимо использование критериев, отражающих состояние критических систем, наиболее поражаемых при воздействии того или иного фактора, а также регулирующих систем, таких как центральная нервная система, нейроэндокринная и иммунная, которые регулируют физиологические процессы и поддерживают постоянство внутренней среды организма и его реактивность (табл. 1).

Данные по выбору критериев и методов оценки состояния организма человека и животных в моделируемых ситуациях представляется возможным систематизировать по трем основным уровням – физиолого-биохимическому, нейропсихологическому и социальному. К первому уровню отнесены параметры физиологических реакций, клиничко-лабораторные и биохимические показатели, к второму уровню – показатели, характеризующие функции высшей нервной деятельности, нейродинамические реакции, выполнение целенаправленных действий и психологических проявлений, к третьему уровню – характеристики межличностных взаимодействий.

Возможности экспериментального моделирования состояния человека в опытах на животных для каждого из этих уровней не одинаковы и уменьшаются от первого к третьему уровню. На первом уровне подходы к экстраполяции, ввиду достаточно выраженного соответствия организма человека и животных, могут основываться на прямых соотношениях и других количественных закономерностях в ряду низшие животные → высшие животные → человек с учетом отдельных качественных видовых особенностей биохимических, физиологических и обменных реакций организма (например, отсутствие отдельных ферментов, участков желудочно-кишечного тракта, потовых желез, наличие шерстного покрова и др.).

При изучении особенностей течения и исходов экспериментально моделируемых состояний организма в опытах на мелких лабораторных животных оценивают следующие показатели: двигательную активность, массу тела, количество эритроцитов, гемоглобина, лейкоцитов в периферической крови, биохимические показатели, патологоанатомические изменения, токсико-кинетические особенности исследуемых агентов, сроки наступления гибели и смертность.

В ходе экспериментов на собаках и обезьянах исследуют частоту, сроки развития и длительность сохранения клинических проявлений экстремального (или патологического) состояния, таких как гиподинамия, диспептические нарушения (рвота, снижение пищевой возбудимости), диарея, гипертермия, состояние кожи и слизистых (бледность, кровоизлияния, язвенно-некротические процессы), дефицит массы

Таблица 1

Сопоставление методических подходов к исследованиям функций у человека с экспериментальным моделированием их на лабораторных животных

Comparison of methodological approaches to research of human functions with experimental modeling of them on laboratory animals

Критерии оценки	Методы исследования	
	Человек	Животные
Уровень 1		
Физиологические реакции	регистрация температуры тела, частоты дыхания, артериального давления, сердечных сокращений, показателей кардиоинтервалографии, электрокардиографии, внешнего дыхания, двигательной активности, теплообмена, потребления кислорода, основного обмена, эхографии и т.д.	
Клинико-лабораторные и биохимические показатели	оценка показателей соматического статуса, крови (СОЭ, количество эритроцитов, гемоглобина, форменных элементов белой и красной крови и др.), мочи (удельный вес, суточное количество, микроскопия осадка, наличие белка, эритроцитов, лейкоцитов и др.), биохимических показателей крови и сред организма, и т.д.	
Уровень 2		
Высшая нервная деятельность и нейродинамические реакции	основаны на реакциях 1-ой и 2-ой сигнальной систем	основаны на реакциях 1-ой сигнальной системы
	показатели выработки классических условных рефлексов (скорость появления, закрепления, время угасания, устойчивость в пробах, время условной и безусловной реакции и др.); показатели выработки дифференцировочных рефлексов (скорость появления и закрепления, время угасания, устойчивость др.); электроэнцефалографические и нейродинамические показатели	
Выполнение целенаправленных действий		
а) физическая выносливость	основаны на реакциях 1-ой и 2-ой сигнальной систем; бег на местности, на ленте тредбана, велоэргометрия, PWC-170, плавание, кистевая и станковая динамометрия, преодоление полосы препятствий и др.	основаны на реакциях 1-ой сигнальной системы; бег в тредмиле, на ленте тредбана, PWC- 170, плавание, скоростное плавание по Kiplinger, измерение силы сгибателей передних конечностей, преодоление барьеров и др.
б) операторские действия	результаты выполнения целенаправленных действий дискретного (действия по сигналам) или интегрального (действия со слезением) характера	результаты выполнения навыков с выбором образца, оперантных (инструментальных) навыков в челночной, прыжковой, одно- и двухпедальной камерах и др.
Психологические проявления		
а) мыслительные способности	методы оценки внимания (корректируная проба, красно-черная таблица и др.), памяти (на образы, на числа, оперативной памяти и др.), логического мышления (закономерности числового ряда, сложные аналогии, компасы, часы и др.)	результаты выполнения тестов в лабиринтах (в Т-, У-образном, многоходовом, круговом и т.д.), неподкрепляемые манипулирования с предметами (метод «проблемной клетки») и др.
б) личностные (характерологические) особенности	изучение характеристики и биографии, вопросники темперамента, свойств (акцентуаций) личности (СМИЛ, Айзенка, Кэттела, Леонгарда, Шмишека, личностный дифференциал и др.); проективные тесты Роршаха, ТАТ, ситуаций, Розенцвейга и др.; создание экспериментальных ситуаций	этологическое наблюдение и зоопсихологические исследования с изучением структуры поведения животных; показатели поведения в «открытом поле» – у мелких лабораторных животных, спонтанной и вызванной двигательной активности – у крупных лабораторных животных
в) эмоции	шкалы самооценки; личностная и ситуативная тревожность (Спилбергера); шкалы тревоги (СМИЛ, Гамильтона, Шихана и др.); нервно – психическая устойчивость; опросник значимости эмоций (Додонова); тест состояния агрессии («Басса-Дарки»); тест агрессивности (Ассингера); опросники депрессии (Гамильтона, Бека, Цунга и др.); цветовой тест Люшера	показатели поведенческих (эмоциональных) реакций в методиках открытое поле крестообразный приподнятый лабиринт в экспериментальных камерах разной конструкции; в экспериментах с чрезкраниальным электрораздражением центральных структур головного мозга
г) мотивация	оценка мотивационных факторов по Гилфорду, Кеттелу; незаконченные предложения; ценностные ориентации (М.Рокича); направленность личности (ориентационные анкеты)	в экспериментальных ситуациях с разномодалным подкреплением вырабатываемых навыков; в экспериментах с чрезкраниальным раздражением разных эмоциогенных структур головного мозга; в экспериментах с косвенной количественной оценкой пищевой, питьевой, половой, родительской, оборонительной и др. видов мотивации
Уровень 3		
Межличностные взаимодействия	межличностные отношения (Лири); предрасположенность к конфликтному поведению (Томаса); тенденции поведения человека в группе «Q-сортировка»; отношение родителей к семейной жизни и ребенку (RARI); метод социометрических измерений в группе (матриц); отношение ребенка к его окружению (Рене Жилия); коммуникативные умения и групповая сплоченность (Сишора); социально-психологический климат в группе (коллективе) и др.	этологические наблюдения и зоопсихологические исследования особенностей коммуникации и ролевых взаимоотношений внутри групп, семейств и сообществ животных (муравьи, пчелы, дикие животные); анализ поведения особей в экспериментальных ситуациях с выработкой навыков путем безусловно-рефлекторного подкрепления другой особи

Таблица 2

**Ориентировочные эффекты равноэффективных по смертности экспозиционных доз
равномерного однократного гамма-облучения* животных**

Approximate effects of equally effective mortality exposure doses of uniform single gamma irradiation* of animals

Вид животных	Летальные дозы (ЛД) при основных формах лучевой болезни (Гр), в скобках средние сроки гибели (сут)			
	Кровотворная		Кишечная	Церебральная
	ЛД 50/30; ЛД 50/45**	ЛД 90/30; ЛД 90/45**	ЛД 50/5; ЛД 50/7**	ЛД 50/2
Мыши белые нелинейные	7,5 (11,2)	10,0 (6,2)	11,0 (3,5)	320 (2,2)
Крысы белые нелинейные	7,2 (15,0)	9,0 (6,2)	11,0 (4,0)	215 (2,5)
Собаки	2,7 (18,3)	3,5 (16,2)	8,5 (5,8)	–

Примечание: * – для источников ^{137}Cs (1,33 – 3,42 Р/с) и ^{60}Co (500 Р/с); ** – для собак

Таблица 3

**Соотношение поражающих доз ионизирующего излучения при воздействии
на млекопитающих разных видов**

The ratio of damaging doses of ionizing radiation when exposed to on mammals of different species

Форма лучевой болезни	Показатели и условия облучения	Крыса	Собака	Обезьяна	Человек
Кровотворная	ЛД 50/30-60, экспозиционная доза гамма-излучения	2,1	1,1	1,4	1
	ЛД 50/30-60, тканевая доза по средней линии импульсного гамма-нейтронного излучения	2	1	1,9	1
	Лучевая реакция	3	1,5	3	1
	ОЛБ 1 степени	2,5	1,5	2	1
	ОЛБ 2 степени	2	1,1	2	1
	ОЛБ 3 степени	2	1,3	1,3	1
	ОЛБ 4 степени	2	1,3	1,1	1
	Минимальная абсолютно летальная доза	1,6	1,1	1	1
Кишечная	ЛД 50/5-8, экспозиционная доза гамма-излучения	1,1	0,8	1	1
Церебральная	ЛД 50/2, экспозиционная доза гамма-излучения, вызывающая необратимое снижение дееспособности	2,5	1,3	0,8	1

Таблица 4

**Временные показатели реакций млекопитающих разных видов и человека
на воздействия ионизирующего излучения**

Time indicators of reactions of mammals of different species and humans on the effects of ionizing radiation

Форма лучевой болезни	Показатели	Крыса	Собака	Обезьяна	Человек
Кровотворная	СПЖ при ЛД 50/30, сут	10	16	20	40
	К экстраполяции	0,25	0,4	0,5	1
Кишечная	СПЖ при ЛД 50/5-8, сут	3,3	4,0	6,5	12
	К экстраполяции	0,3	0,3	0,54	1
Кишечная	СПЖ при ЛД 50/3-5, сут	3,0	3,5	5,5	6
	К экстраполяции	0,5	0,6	0,9	1
Церебральная	СПЖ при ЛД 50/2, ч	15-28	25	20	46
	К экстраполяции	0,3-0,6	0,5	0,4	1

Примечание: СПЖ – средняя продолжительность жизни; ЛД – летальная доза; К экстраполяции – коэффициент экстраполяции

тела, а также гематологические и биохимические показатели, патологоанатомические изменения, сроки гибели и смертность.

В экспериментах на трех видах животных были получены следующие значения доз излучения и средних сроков гибели животных (табл. 2). а также установлены соотношения поражающих доз, в том числе при разных степенях острой лучевой болезни (ОЛБ) (табл. 3) и временных показателей реакций животных разных видов и человека (табл. 4) [2].

На втором уровне возможности полной экстраполяции ограничиваются большими качественными отличиями – более высокой организацией высшей нервной деятельности человека по сравнению с

животными, появлением у него второй сигнальной системы и психических функций. В то же время возможности экстраполяции существуют и на втором уровне, они основаны на сходстве основных принципов функционирования нервной клетки и центральной нервной системы животных и человека [4]. При этом необходимо учитывать определенные допущения и ориентировочный характер экстраполяционных оценок, позволяющий судить лишь об общих тенденциях в изменениях характеристик процессов, психологических проявлений и целенаправленных действий с определенной вероятностью прогноза конкретных количественных показателей [15–18].

Таблица 5

Коэффициенты экстраполяции (K) экспериментальных данных с млекопитающих разных видов на человека после воздействия ионизирующего излучения
Coefficients of extrapolation (K) of experimental data from mammals of different species to humans after exposure to ionizing radiation

Критерий экстраполяции	Форма лучевой болезни	К крыса	К собака	К обезьяна	К человек
По дозе облучения	кроветворная	2	1,3	1,5	1
	кишечная	1,1	1	1	1
	токсемическая	2	1	1	1
	церебральная	2,5	1,3	1	1
По времени развития постлучевых эффектов	кроветворная	0,3	0,5	0,7	1
	кишечная	0,3	0,3	1	1
	токсемическая	0,5	0,6	–	1
	церебральная	0,4	0,5	0,4	1

При прогностических оценках уровней работоспособности человека после облучения нами были использованы коэффициенты экстраполяции, установленные по данным экспериментов на животных (табл. 5) [18].

На третьем уровне (межличностных взаимодействий) экстраполяция принципиально также возможна ввиду общебиологического характера групповых взаимоотношений: у человека – межличностных, семейных, коллективных, у животных – межиндивидуальных, семейственных, стадных (племенных). Однако на этом уровне экстраполяция методически затруднена еще больше вследствие отсутствия возможности получения словесной информации (как в большинстве социометрических тестов), требует долговременных и крупномасштабных зоопсихологических наблюдений за поведением животных в группах в естественных условиях. Для решения подобных задач перспективными могут быть эксперименты по зоосоциальному взаимодействию животных в экспериментальных камерах различного рода.

Учитывая это, в настоящее время при изучении разнообразных факторов материалы подобных исследований [1–3, 15, 18] отражают в большей степени показатели 1-го (физиолого-биохимического и клинического) и 2-го (нейропсихологического) уровней. При этом исходят из морфо-функционального сходства звеньев системы поведенческого акта человека и животных, подобия нейрофизиологических механизмов функционирования клеток коры головного мозга в процессе принятия решения [4], а также общих механизмов патологических процессов в нервных клетках животных и человека и нарушений их функций после однотипных воздействий. Это позволяет рассматривать условно-рефлекторную реакцию животных как модель звена процесса принятия решения и других центральных звеньев системы поведенческого акта, а инструментальный условный навык, вырабатываемый у животных, – как модель произвольного движения, элемента целенаправленной деятельности, выполняемого человеком. Исследователей в итоге в наибольшей степени интересуют экстраполяционные оценки способности к выполнению целенаправленной деятельности человека и животных при воздействии неблагоприятных факторов [15, 18].

Важным моментом, предвещающим проведение любого исследования, является выбор подходящих для решения определенной задачи видов экспериментальных животных. Выбор вида животного для проведения радиобиологического исследования при воздействиях тех или иных видов излучения, диапазонов доз должен быть в каждом случае мотивирован. Он определяется этапами и задачами эксперимента, а также объемом финансирования каждого конкретного исследования (табл. 6).

При выборе схемы исследования следует учитывать необходимость формирования экспериментальных групп животных, т.е. опытных групп и групп биологического контроля. В каждой из этих групп должно быть не менее 5–10 мелких либо не менее 3–5 крупных животных. Для решения поставленных задач исследования должны формироваться опытные группы с учетом изучаемых условий воздействия (вид излучения, его доза и мощность дозы, геометрия облучения, наличие факторов защиты, профилактики или лечения, способы и методики применения исследуемых агентов или введения фармакологических препаратов и т.д.), биологических особенностей животных (размеров и массы тела, пола, возраста, индивидуальной исходной реактивности).

В идеальных условиях эксперименты должны быть поставлены на нескольких видах мелких и нескольких видах крупных лабораторных животных [1–3]. Основными ограничивающими факторами являются высокая стоимость и сложность содержания крупных животных. При их использовании трудно сформировать статистически представительные группы, а продолжительные сроки эмбриогенеза и жизни затрудняют набор материала по эмбриотоксичности и отдаленным последствиям, в частности, по канцерогенности.

В связи с этим скрининговые исследования обычно проводятся на мелких животных-грызунах (мышях, крысах, хомячках), а углубленные – как на мелких (мышь, крыса, хомячок, морских свинках, кроликах), так и на крупных животных (миниатюрных свинках, овцах, собаках, обезьянах). У крупных животных строение и функциональные особенности ряда органов и систем ближе к человеку, чем у грызунов. Поэтому в ряде исследований, особенно на заключительных эта-

Таблица 6

Виды животных, используемые в биологических исследованиях в зависимости от задач
Animal species used in biological research, depending on the task

Задачи исследования	Используемые животные	
	Мелкие	Крупные
1. Исследование биологических зависимостей доза-эффект, время-эффект	мыши, крысы, хомячки, морские свинки, кролики	собаки, миниатюрные свиньи, овцы
2. Изучение клинических проявлений	крысы, кролики	собаки, миниатюрные свиньи, овцы, обезьяны
3. Специальные методы исследования: поведенческие кардиореспираторные гематологические биохимические иммунологические условнорефлекторные электроэнцефалографические	мыши, крысы, кошки крысы, кролики крысы, морские свинки, кролики крысы, морские свинки, кролики крысы, морские свинки, кролики крысы, кролики кролики, кошки	собаки, обезьяны собаки, миниатюрные свиньи, обезьяны собаки, миниатюрные свиньи, овцы, обезьяны собаки, миниатюрные свиньи, обезьяны собаки, миниатюрные свиньи, обезьяны собаки, миниатюрные свиньи, обезьяны собаки, обезьяны

пах оценки новых антидотов и радиозащитных препаратов, других фармакологических средств, их использование обязательно.

Следует отметить, что эксперименты на обезьянах ввиду их высокой стоимости целесообразны лишь в отдельных случаях (например, при исследованиях специфического для представителей отряда приматов гормонального обмена и, соответственно, гормональных средств, вирусов и возбудителей, патогенных лишь для представителей отряда приматов, либо при оценке высших мнестических функций). При решении большинства остальных задач другие крупные животные (мини-свиньи, овцы, собаки) вполне соответствуют человеку как по размерам тела, так и по основным биологическим особенностям.

Выводы

1. Рассмотренные подходы и принципы переноса данных с лабораторных животных на человека важно использовать при определении задач эксперимен-

тального исследования, планировании его этапов и продолжительности, стоимости материалов и трудозатрат, формировании необходимых экспериментальных групп определенных видов животных и общей схемы (дизайна) исследования.

2. Сопоставление результатов радиобиологических исследований, полученных в опытах на животных и в наблюдениях на людях, должно проводиться с учетом межвидовых особенностей, а количественный перенос данных с животных на человека требует тщательного обоснования и использования экстраполяционных коэффициентов.

3. Приведенные материалы позволяют получить представления о возможных направлениях и качественных особенностях межвидового переноса данных в радиобиологическом эксперименте, а экстраполяционные коэффициенты могут быть использованы при прогнозировании у человека выраженности эффектов, времени их появления и продолжительности с учетом конкретных условий облучения.

Basic Approaches to the Extrapolation of Data of Animals to Human in Radiobiological Experiment

I.V. Ivanov^{1,2}, I.B. Ushakov³

¹ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia, ivanov-iv@yandex.ru

² State Scientific Research Institute of the Military Medicine, Saint-Petersburg, Russia

³ A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: Substantiate the main directions of transferring experimental data from laboratory animals to humans.

Methods: The general patterns of the structure of the organism of animals and humans and the dynamics of the processes of their vital activity, including under the influence of various environmental factors, as well as the tendency of their approximation in the evolutionary series from lower mammals to humans are considered.

Results: The choice of criteria and methods for assessing the state of the human body and comparison with those in animals in simulated situations is systematized according to 3 main levels – physiological-biochemical, neuropsychological and social. Parameters of physiological reactions, clinical laboratory and biochemical parameters are assigned to level 1, parameters characterizing the functions of higher nervous activity, neurodynamic reactions, targeted actions and psychological manifestations to level 2, characteristics of interpersonal interactions to level 3. The types, tasks and methods of research that are carried out on small rodent animals (screening) and on larger animals from other mammalian orders that are closer in terms of evolutionary development and other parameters to humans (in-depth) are considered.

Conclusion: It is shown that when comparing the results of studies obtained in animal experiments and in human observations, it is important to use coefficients for the quantitative transfer of data from animals to humans, which require careful substantiation taking into account the interspecific characteristics of mammals and humans.

Key words: radiobiology, biomedical experiment, laboratory animals, extrapolation coefficients, parameters of physiological reactions, clinical and laboratory indicators, higher nervous activity, neurodynamic reactions, interpersonal interactions

For citation: Ivanov IV, Ushakov IB. Basic Approaches to the Extrapolation of Data of Animals to Human in Radiobiological Experiment. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):5-12. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-5-12

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Даренская Н.Г. Сопоставление зависимости доза-эффект для разных видов животных и значение этих данных для человека. В сб.: Радиобиологический эксперимент и человек. М.: Атомиздат; 1970. С. 50-62. [Darenskaya NG. Comparison of dose-effect relationships for different species of animals and the significance of these data for humans. In: Radiobiological experiment and humans. Moscow. 1970:50-62. (In Russ.).]
2. Даренская Н.Г., Ушаков И.Б., Иванов И.В., Иванченко А.В., Насонова Т.А. От эксперимента на животных – к человеку: поиски и решения. Воронеж: Научная книга. 2010. 237 с. [Darenskaya NG, Ushakov IB, Ivanov IV, Ivanchenko AV, Nasonova TA. From experiment on animals – to the person: searches and decisions. Voronezh. 2010. (In Russ.).]
3. Красовский Г.Н., Рахманин Ю.А., Егорова Н.А. Экстраполяция токсикологических данных с животных на человека. М.: ОАО «Издательство «Медицина», 2009. 208 с. [Krasovsky GN, Yegorova NA, Rakhmanin YuA. Extrapolation of toxicological data from animals to humans. Moscow. 2009. (In Russ.).]
4. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. – М.: Медицина; 1968. 547 с. [Anokhin PK. Biology and neurophysiology of the conditioned reflex. Moscow. 1968. (In Russ.).]
5. Becker RA, Ankley GT, Edwards SW, Kennedy SW, Linkov I, Meek B, et al. Increasing Scientific Confidence in Adverse Outcome Pathways: Application of Tailored Bradford-Hill Considerations for Evaluating Weight of Evidence. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2015;72:514-37. DOI: 10.1016/j.yrtph.2015.04.004.
6. Becker RA, Dellarco V, Seed J, Kronenberg JM, Meek B, Foreman J, et al. Quantitative weight of evidence to assess confidence in potential modes of action. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2017;86:205-20. DOI: 10.1016/j.yrtph.2017.02.017.
7. Boobis AR, Doe JE, Meek ME(Bette), Munn Sh, Ruchirawat M, Schlatter J, et al. IPCS Framework for Analyzing the Relevance of a Noncancer Mode of Action for Humans. Critical Reviews in Toxicology. 2008;38:87-96. DOI: 10.1080/10408440701749421.
8. Slikker WJr, Andersen ME, Bogdanffy MS, Bus JS, Cohen SD, Conolly RB, et al. Dose-dependent transitions in mechanisms of toxicity. Toxicol Appl Pharmacol. 2004;201(3):203-25. DOI: 10.1016/j.taap.2004.06.019.
9. Seed J, Carney EdW, Corley RA, Crofton KM, DeSesso JM, Foster PMD, et al. Overview: Using Mode of Action and Life Stage Information to Evaluate the Human Relevance of Animal Toxicity Data. Critical Reviews in Toxicology. 2005;35:663-72. DOI: 10.1080/10408440591007133.
10. Meek ME, Boobis A, Cote I, Dellarco V, Fotakis G, Munn S, et al. New developments in the evolution and application of the WHO/IPCS framework on mode of action/species concordance analysis. J Appl Toxicol. 2014;34(1):1-18. DOI: 10.1002/jat.2949.
11. Sonich-Mullin C, Fielder R, Wiltse J, Baetcke K, Dempsey J, Fenner-Crisp P, et al. IPCS Conceptual Framework for Evaluating a Mode of Action for Chemical Carcinogenesis. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2001;34:146-52. DOI:10.1006/rtph.2001.1493.
12. Meek ME(Bette), Bucher JR, Cohen SM, Dellarco V, Hill RN, Lehman-McKeeman LD, et al. A Framework for Human Relevance Analysis of Information on Carcinogenic Modes of Action. Critical Reviews in Toxicology. 2003;33(6):591-653. DOI: 10.1080/10408440390250136.
13. Becker RA, Patlewicz G, Simon TW, Rowlands JC, Budinsky RA. The adverse outcome pathway for rodent liver tumor promotion by sustained activation of the aryl hydrocarbon receptor. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2015;73:172-90. DOI: 10.1016/j.yrtph.2015.06.015.
14. Lynch HN, Loftus CT, Cohen JM, Kerper LE, Kennedy EM, Goodman JE. Weight-of-evidence evaluation of associations between particulate matter exposure and biomarkers of lung cancer. Regulatory Toxicology and Pharmacology. 2016;82:53-93. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.10.006.
15. Иванов И.В. Методики оценки работоспособности лабораторных животных при экспериментальном воздействии патогенных и экстремальных факторов. Военно-медицинский журнал. 2012;333(2):42-7 [Ivanov IV. Methods of evaluation of efficiency of laboratory animals in the experimental influence of pathogenic and extreme factors. Military Medical Journal. 2012;333(2):42-7. (In Russ.).]
16. Шустов Е.Б., Каркищенко Н.Н., Уйба В.В., Каркищенко В.Н. Очерки спортивной фармакологии. Т. 1. Векторы экстраполяции. СПб.: ООО «Айсинг». 2013. 288 с. [Shustov EB, Karkischenko NN, Uiba VV, Karkischenko VN. Sketches of sports pharmacology. Vol. 1. Extrapolation vectors. Saint Petersburg. 2013. (In Russ.).]
17. Ушаков И.Б., Штемберг А.С., Шафиркин А.В. Реактивность и резистентность организма млекопитающих. – М.: Наука, 2007. 493 с. [Ushakov IB, Shtemberg AS, Shafirkin AV. Reactivity and resistance mammalian organism. Moscow. 2007. (In Russ.).]
18. Иванов И.В. Исходная реактивность организма и радиационные воздействия: лечебно-профилактические аспекты проблемы. Научно-практическое руководство. М. 2005. 394 с. [Ivanov IV. Initial reactivity of organism and radiation effects: medical-prophylactic aspects of the problem. Moscow. 2005. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 11.09.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 11.09.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

А.А. Аракелян, М.В. Ведерникова, Е.А. Гаврилина, К.А. Печкурова**ОЦЕНКА ВКЛАДА ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА
«НИИ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ» В ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ
ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ДМИТРОВГРАДА**

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Контактное лицо: Аракелян Арам Айкович, arakelyan@ibrae.ac.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Оценить вклад современной деятельности Государственного научного центра «НИИ атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР») в формирование техногенных рисков для населения г. Дмитровграда Ульяновской области.

Материал и методы: Исследованы и проанализированы результаты мониторинга состояния окружающей среды, метеорологические особенности района расположения АО «ГНЦ НИИАР», данные по радиационной и санитарно-эпидемиологической обстановке в Дмитровграде. В качестве источников исходных данных были использованы материалы государственных докладов, ежегодных отчетов и аналитических справок Роспотребнадзора, Приволжского УГМС, Ульяновскстата, Министерства экологии и природопользования Ульяновской области и Межрегионального управления № 172 ФМБА России, а также результаты производственного и экологического контроля, предоставленные непосредственно АО «ГНЦ «НИИАР».

Для оценки вклада деятельности АО «ГНЦ НИИАР» в формирование загрязнения атмосферного воздуха города выполнено моделирование рассеивания современных годовых газоаerosольных выбросов. Расчет рисков проведен согласно методологии НКДАР ООН по оценке радиационного риска и утверждённому Минздравом РФ Руководству по оценке воздействия токсических и канцерогенных химических веществ.

Результаты: Значение среднегодовой эффективной дозы для населения Дмитровграда за счёт современных выбросов АО «ГНЦ НИИАР» по результатам консервативных расчётов составляет 0,9 мкЗв/год. Значение радиационного риска для населения селитебной зоны находится на уровне $2,9 \cdot 10^{-8}$, в целом же для всей территории Дмитровграда – $5,4 \cdot 10^{-8}$. Полученное значение радиационного риска для здоровья населения, проживающего в селитебной зоне города, более чем в 30 раз ниже границы уровня пренебрежимо малого риска ($1 \cdot 10^{-6}$).

Суммарное значение химического риска от всех источников загрязнения воздушной среды Дмитровграда составляет $1,3 \cdot 10^{-3}$. Уровень риска находится в диапазоне неприемлемого риска ни для населения, ни для профессиональных групп. Оценка канцерогенного риска от загрязняющих веществ предполагает в качестве негативного эффекта случаи возникновения злокачественных новообразований (ЗНО). Суммарное значение канцерогенного риска составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$, что несколько превышает верхнюю границу приемлемого для населения уровня.

Заключение: Вклад техногенного радиационного фактора в общую структуру риска менее 0,003 %. Роль АО «ГНЦ НИИАР» в загрязнении воздуха селитебной зоны города ничтожно мала и не создаёт токсических рисков для населения Дмитровграда. Таким образом, можно заключить, что современная деятельность АО «ГНЦ НИИАР» приводит к пренебрежимо малым значениям канцерогенных рисков для населения Дмитровграда.

Ключевые слова: АО «ГНЦ НИИАР», радиационная безопасность, радиационный риск, химический риск, экологическая обстановка

Для цитирования: Аракелян А.А., Ведерникова М.В., Гаврилина Е.А., Печкурова К.А. Оценка вклада Государственного научного центра «НИИ атомных реакторов» в формирование техногенных рисков для населения Дмитровграда. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):13–9.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-13-19

Введение

В 1956 г. на основании Постановления Совмина СССР от 15 марта в г. Мелекесе (с 1972 г. – Дмитровград) началось строительство комплекса объектов Научно-исследовательского института атомных реакторов (ныне – АО «ГНЦ НИИАР») и Западного жилого района (соггорода) для его работников на 50 тыс. жителей. С того момента и по сей день АО «ГНЦ НИИАР» является единственным предприятием, осуществляющим выбросы радионуклидов в атмосферу, и остаётся градообразующим предприятием Дмитровграда, который на 2018 г. насчитывает порядка 116 тыс. жителей.

Сегодня на территории города функционирует более 260 промышленных предприятий и организаций, вносящих до 18 % в объём производства всей Ульяновской области. Помимо выбросов и сбросов вредных веществ, образующихся в ходе работы промышленных предприятий Дмитровграда, на техногенное загрязнение окружающей среды в городе оказывают влияние выбросы железнодорожного и автотранспорта, работы предприятий коммунально-

бытовой сферы, а также накопление промышленных и бытовых отходов.

Степень техногенного загрязнения, сформированного за счёт всех перечисленных источников, может быть оценена по содержанию загрязняющих веществ, в том числе радиоактивных, в компонентах окружающей среды. Анализ актуальных данных регулярного мониторинга радиационной и эколого-токсической обстановки в городе, а также данных о выбросах загрязняющих веществ (ЗВ), позволяет оценить радиационные и токсические риски для населения города Дмитровграда.

В настоящей работе представлены результаты оценки радиационных и химических рисков для населения Дмитровграда, основанные на актуальных данных, а также модельных оценок по рассеиванию выбросов АО «ГНЦ НИИАР» с целью определения роли предприятия в общей структуре техногенных рисков. Исследуемый период в большей степени охватывает 2013–2017 гг. Результаты работы могут стать ориентиром для принятия решений органами управления и органами защиты окружающей среды с целью

проведения дополнительных мероприятий по снижению выбросов ЗВ в атмосферный воздух и по развитию сети мониторинга окружающей среды.

Материал и методы

Для выполнения количественных оценок воздействия содержащихся в окружающей среде ЗВ на население, позволяющих принимать управленческие решения, в США, а затем и в европейских странах в конце прошлого века стали развивать подход, основанный на оценке риска сокращения жизни для населения. Этот же подход в начале XXI века начал пробивать себе дорогу и в России [1]. В последнее десятилетие появилось значительное число исследовательских работ, в которых методология риска использовалась для сравнительного анализа источников техногенного загрязнения селитебных территорий [2, 3].

В качестве исходных данных в настоящей работе были использованы сведения из открытых источников, а также детализированные данные о выбросах АО «ГНЦ «НИИАР», предоставленные самой организацией. В основу сформированной в ИБРАЭ РАН базы данных положена информация, содержащаяся в государственных докладах, ежегодных отчётах и аналитических справках Роспотребнадзора, территориального органа Федеральной службы государственной статистики (Ульяновскстат), Министерства экологии и природопользования Ульяновской области, Росгидромета, Приволжского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «Приволжское УГМС»), Межрегионального управления № 172 ФМБА России. В ходе работы проанализированы информационные материалы, характеризующие современное состояние окружающей среды, метеорологические особенности, а также санитарно-эпидемиологическую и демографическую обстановку в Ульяновской области.

Для оценки вклада деятельности АО «ГНЦ НИИАР» в формирование загрязнения атмосферного воздуха города выполнено моделирование рассеивания современных годовых газоаэрозольных выбросов. Основные данные об объёме и номенклатуре выбросов предприятия приведены в ежегодных отчётах по экологической безопасности АО «ГНЦ НИИАР» [6]. Расчёт проводился с помощью созданных ИБРАЭ РАН программно-технических средств, позволяющих выполнять оценку распространения выбросов в воздушной среде с учётом метеорологических особенностей изучаемой территории и характеристик состава газоаэрозольной смеси. Модельные расчёты по распространению выбрасываемых вредных примесей проводились с помощью локальной гауссовой модели рассеивания. Детальное описание модели, расчётных характеристик и получаемых результатов приведены в [5].

Для определения потенциальных радиационных рисков для населения Димитровграда применяется методология оценки пожизненного риска НКДАР ООН [6].

Для вычисления рисков в конкретном регионе оценивался показатель избыточного абсолютного радиационного риска (EAR), который определялся с учётом особенности онкологической обстановки на изучаемой территории:

$$EAR(e,s,D,a) = ERR(e,s,D,a) \cdot h_0(e,s,a), \quad (1)$$

где $h_0(e,s,a)$ – фоновая онкологическая заболеваемость (смертность) группы лиц пола s , в диапазоне лет от e до a в регионе, где проводится оценка риска.

Избыточный относительный риск (ERR) неблагоприятных последствий вследствие возникновения солидных раков (2) и лейкозов (3) оценивается следующим образом:

$$ERR_{solid}(e,s,D,a) = 601 \cdot D \cdot \exp(0,6 \cdot s + \ln(a-e) - 2), \quad (2)$$

$$ERR_{leukemia}(D,a) = (865 \cdot D + 1021 \cdot D^2) \cdot \exp(-1,65 \ln(a)) \quad (3)$$

где D – доза облучения в модели для солидных раков и кровеносной системы в модели для лейкозов (ЗВ); s – фиктивная переменная, характеризующая пол индивида ($s = 1$ для женщин и $s = 0$ для мужчин).

Оценка риска проводилась для критической группы населения, которой является преобладающее в городе взрослое население селитебной зоны. В силу диспропорции статистики заболеваний и смертности от ЗНО (злокачественных новообразований) в зависимости от пола, проведено осреднение показателей риска отдельно для мужчин и женщин.

Оценка химических рисков заболеваемости и смертности от ЗНО имеет схожую с радиационным воздействием методологию. Априорно устанавливается, что воздействие ЗВ, обладающих канцерогенными свойствами, так же как и для радиационного фактора, носит беспороговый характер. На единицу концентрации (дозы) каждого химического агента приходится определённая вероятность негативных эффектов, которая характеризуется фактором канцерогенного потенциала (SF). Все вещества, относимые к первой группе, согласно классификации Международного агентства по исследованию рака, имеют уникальные значения SF , которые описывают наклон зависимости доза-эффект в области низких доз для прогнозирования потенциального пожизненного риска (на 70 лет жизни) [7].

Основным руководящим документом для оценки риска от химических веществ, обладающих канцерогенными свойствами, является утверждённое Минздравом РФ Руководство Р 2.1.10.1920-04, гармонизированное с международными рекомендациями [8, 9]. В общих чертах канцерогенный риск связан с поступлением в организм небольших количеств (с точки зрения оказания токсического воздействия на организм) химических веществ, воздействие которых в любых дозах потенциально создаёт вероятность возникновения ЗНО, описываемой следующей формулой:

$$ICR = LADD \times SF, \quad (4)$$

где $LADD$ – пожизненная среднесуточная доза, рассчитываемая с учётом длительности воздействия, физических параметров индивида, периода осреднения экспозиции, мг/(кг·день); SF – фактор канцерогенного потенциала, (мг/(кг·сут))⁻¹.

Что касается оценки потенциальных рисков неканцерогенного характера, необходимо отметить существование порога в концепции прогнозирования этой группы рисков. В руководстве по оценке риска при воздействии ЗВ предполагается наличие референсных уровней воздействия (дозы – RfD и кон-

центрации – RfC), при соблюдении которых вероятность неблагоприятных эффектов будет нулевой [8]. Зарубежные рекомендации и руководящие документы также основаны на аналогичном подходе. Таким образом, можно утверждать об относительной безопасности хронического воздействия токсических веществ, содержащихся в воздухе на уровне ниже RfC . В основе моделей токсического риска лежит подход, определяющий наступление неблагоприятных эффектов как функцию кратности превышения фактической концентрации над референсным уровнем [1, 8]:

$$\Delta_{сл} = -(y_o [\exp(\beta \Delta_{вещ})]), \quad (5)$$

где $\Delta_{сл}$ – риск дополнительных случаев развития определённого заболевания (увеличения смертности) при воздействии ЗВ; y_o – фоновый уровень регистрации определённого заболевания (смертности по причине) изучаемой популяции; β – параметр модели, определяемый для каждого заболевания и химического вещества; $\Delta_{вещ}$ – изменение среднесуточной концентрации ЗВ (превышение над референсным уровнем).

Результаты и обсуждение

Результаты анализа данных радиационной обстановки

Анализ данных радиационного мониторинга показывает, что основным техногенным источником радиоактивного загрязнения рассматриваемой территории 30-км зоны вокруг АО «ГНЦ НИИАР» остаются глобальные выпадения, обусловленные испытаниями ядерного оружия во второй половине прошлого века, а также в небольшой степени выпадения после аварии на Чернобыльской АЭС. Выполненная авторами оценка уровней воздействия радиационного фактора посредством моделирования рассеивания современных выбросов основных стационарных источников города показала, что значение среднегодовой эффективной дозы для селитебной зоны находится на уровне 0,9 мкЗв/год. При этом АО «ГНЦ НИИАР» является единственным источником радиоактивных выбросов в атмосферу.

Согласно данным, приведённым в радиационно-гигиенических паспортах региона, среднегодовая индивидуальная эффективная доза за счёт деятельности предприятий, использующих источники ионизирующего

излучения, составляет 0,2 мкЗв/год [10], что согласуется с полученной модельной оценкой. В то же время годовые дозы облучения населения природными источниками в среднем для Ульяновской области за 2001–2015 гг. находились на уровне 2,3 мЗв, т.е. в 250–1000 раз выше оценок техногенной составляющей [11]. В целом существующее техногенное загрязнение не изменяет естественный радиационный фон в части формирования доз облучения населения. Техногенная добавка не выходит за рамки естественного колебания дозовых нагрузок от природных источников облучения и в практических оценках экологической обстановки может не учитываться.

Из десятка наиболее крупных предприятий Димитровграда, чьи выбросы и сбросы определяют экологическую обстановку в селитебной зоне, лишь одно – АО «ГНЦ НИИАР» потенциально может вносить вклад в радиационную обстановку в ближайших населённых пунктах.

Результаты анализа данных загрязнения воздуха химическими веществами

В 2017 г. стационарные источники выбросили в атмосферу г. Димитровграда более 2466 т ЗВ (данные Ульяновскстата) [12]. Большая часть выбросов – 47 % приходилась на углеводороды, ещё 7 % – на летучие органические соединения (ЛОС) (рис. 1). Отметим, что в рассмотренный период объём валовых выбросов ЗВ в атмосферу существенно колебался, например, для 2015 и 2017 гг. он различается более чем в 2 раза.

Суммарные выбросы основных загрязняющих веществ АО «ГНЦ НИИАР» в среднем за рассмотренный период составляют всего 0,2 % от общегородских выбросов всех стационарных источников (рис. 2) [4]. В выбросах АО «ГНЦ НИИАР» присутствуют и специфические вещества, такие как хром шестивалентный, который является канцерогеном.

В исследованный период превышение ПДК в воздушной среде города отмечалось для взвешенных веществ (ВВ), диоксида азота, диоксида серы, бензола и формальдегида (табл. 1). Обращает на себя внимание высокая запыленность воздуха (табл. 2).

Содержание радиоактивных и вредных химических веществ в питьевой воде и продуктах питания соответствует санитарно-гигиеническим требованиям [4, 14].

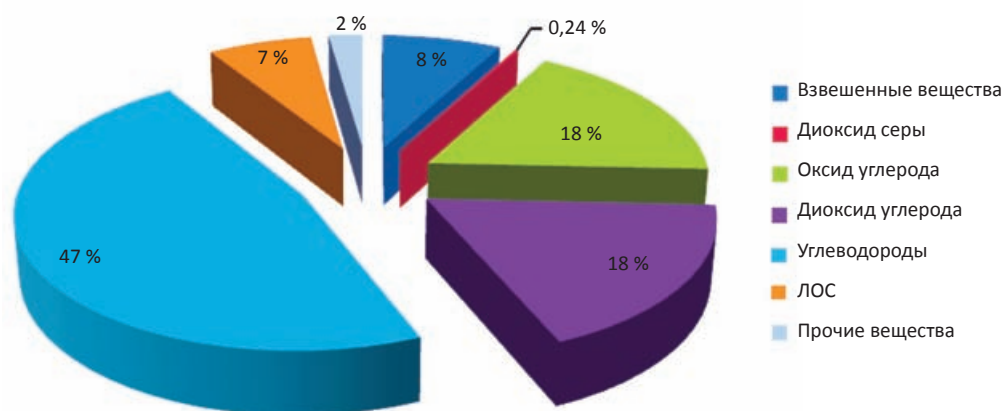


Рис. 1. Вклад основных ЗВ, выброшенных в атмосферу Димитровграда в 2017 г. от стационарных источников
Fig. 1. Contribution of the main pollutants released into the atmosphere of Dimitrovgrad in 2017 from stationary sources

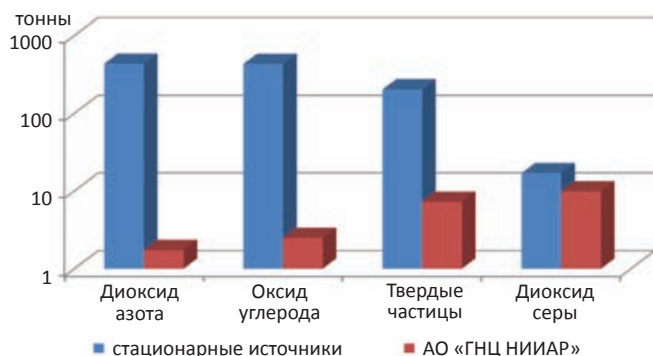


Рис. 2. Усреднённый за 2014–2017 гг. вклад АО «ГНЦ НИИАР» в выбросы основных ЗВ от стационарных источников по Дмитровграду

Fig. 2. Averaged over 2014–2017 contribution of JSC “SSC RIAR” in the emissions of major pollutants from stationary sources in Dimitrovgrad

Таблица 1

Среднесуточные концентрации основных загрязняющих веществ в атмосферном воздухе Дмитровграда в осреднении за 2013–2015, 2017 гг., мкг/м³ [13, 14]

Average daily concentrations of major pollutants in the air of Dimitrovgrad averaged for 2013–2015, 2017, µg/m³ [13, 14]

ЗВ	Годы				ПДК _{с.с.}
	2013	2014	2015	2017	
ВВ	104	120	163	150	150
SO ₂	40	40	45	42	50
CO	1	1	1,4	1,2	3000
NO ₂	43	57	55	37	40
NO	17	н.д.	34	н.д.	60
Фенол	3	4	3	2	6
Формальдегид	8	7	10	9	10

Таблица 2

Концентрация взвешенных веществ в приземном слое воздуха Дмитровграда в различные годы по данным ЦГиЭ №172 ФМБА России, мкг/м³
The concentration of suspended substances in the surface layer of air in Dimitrovgrad in various years according to the Institution CSE No. 172 FMBA of Russia, µg/m³

Номер поста наблюдения	Годы					
	2012	2013	2014	2016	2017	Среднее
1	38	248	50	50	н.д.	97
2а	83	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	83
2б	н.д.	140	190	100	170	150
3	25	40	100	110	270	109
4	155	293	180	100	170	180
5	50	198	50	50	50	80
6	25	90	90	120	50	75
7	50	13	150	110	50	75
8	н.д.	н.д.	170	100	330	200
Среднее	61	146	123	93	156	–

Оценка уровней риска для населения Дмитровграда

Среднее значение годовой мощности дозы для населения Дмитровграда за счёт современных вы-

бросов АО «ГНЦ НИИАР» по результатам консервативных расчётов составляет 0,9 мкЗв/год. Более чем на 90 % доза определяется внешним облучением за счёт прохождения радиоактивного облака, в котором основными дозообразующими нуклидами являются инертные радиоактивные газы. Значение радиационного риска для населения селитебной зоны находится на уровне $2,9 \cdot 10^{-8}$, в целом же для всей территории Дмитровграда – $5,4 \cdot 10^{-8}$ (рис. 3). Границы города находятся в пределах изолинии с уровнем потенциального риска $1 \cdot 10^{-8}$, максимальное значение радиационного риска достигается в точке на границе с санитарно-защитной зоной АО «ГНЦ НИИАР» и составляет $6,7 \cdot 10^{-8}$ (при гипотетическом сценарии постоянного нахождения индивида в данной точке), тем самым определяя возможный диапазон значений пожизненного радиационного риска для населения Дмитровграда.

Действующие санитарные правила и нормативы НРБ-99/2009 при обосновании радиационной защиты устанавливают следующее граничное значение обобщенного риска (произведения вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением) для населения при облучении в течение года – $1 \cdot 10^{-5}$ [15]. Расчётные значения потенциального радиационного риска для населения Дмитровграда на 2–3 порядка ниже установленных нормативных уровней. Кроме того, полученное среднее значение радиационного риска для здоровья населения, проживающего в селитебной зоне города, более чем в 30 раз ниже границы уровня пренебрежимо малого риска ($1 \cdot 10^{-6}$).

Выбросы АО «ГНЦ НИИАР» вносят пренебрежимо малый вклад в загрязнение воздушной среды Дмитровграда и «классическими» загрязнителями. Среднее значение концентрации оксида углерода в воздухе селитебной зоны, обусловленной деятельностью АО «ГНЦ НИИАР», в 300 раз ниже фактического содержания СО в атмосфере. Содержание диоксида азота, диоксида серы и ВВ (в пересчёте на мелкодисперсную фракцию РМ_{2,5}, на долю которой приходится 33–35 % от общей концентрации ВВ [1]) за счёт выбросов АО «ГНЦ НИИАР» в среднем по городу на 4–5 порядков ниже значений, наблюдаемых различными службами мониторинга. Сводные статистические параметры расчётных показателей загрязнения воздуха выбросами АО «ГНЦ НИИАР» представлены в табл. 3. Поскольку ни по одному из ЗВ за рассмотренный период не имело места превышение референсных концентраций, риск наступления неблагоприятных эффектов полагается равным нулю.

В работе также выполнена оценка химических рисков на основе данных регулярного мониторинга загрязнения атмосферного воздуха города.

Суммарное значение риска от всех источников загрязнения воздушной среды Дмитровграда составляет $1,3 \cdot 10^{-3}$. Уровень риска находится в диапазоне неприемлемого риска ни для населения, ни для профессиональных групп. Основной вклад среди отдельно взятых ЗВ в формирование риска вносят т. н. «классические» ЗВ: взвешенные вещества и диоксид серы.

По результатам оценки техногенных рисков радиационного и химического происхождения проведено ранжирование рисков от различных ЗВ для здоровья

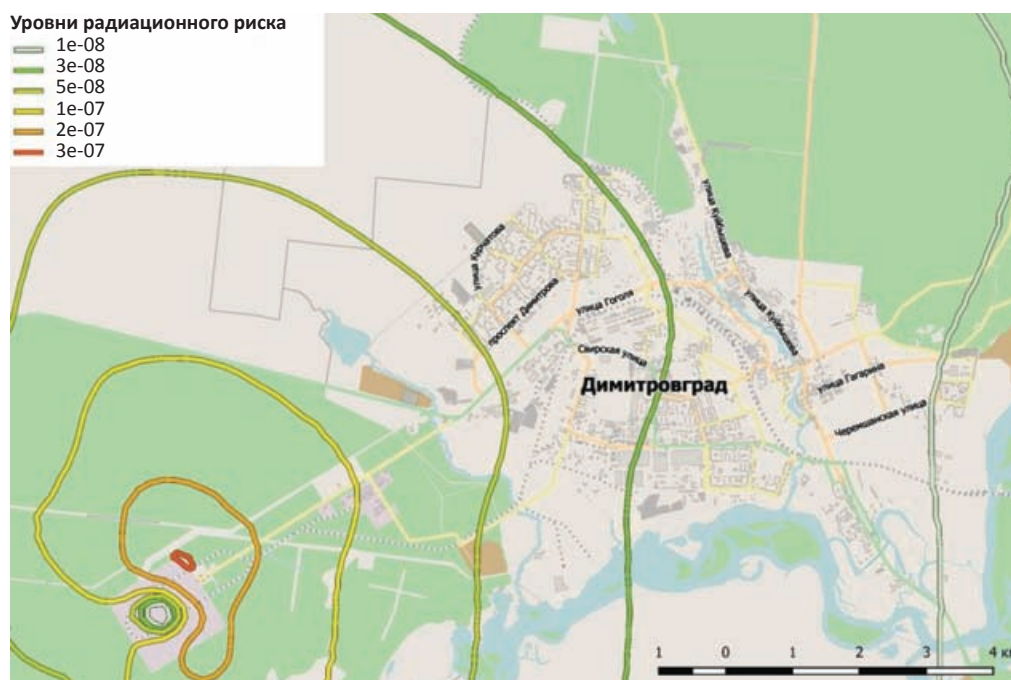


Рис. 3. Уровни радиационного риска, обусловленного выбросами радиоактивных веществ от АО «ГНЦ НИИАР»
Fig. 3. Levels of radiation risk caused by releases of radioactive substances from JSC «SSC RIAR»

Таблица 3

Некоторые статистические параметры уровней загрязнения атмосферы, полученных моделированием распространения выбросов АО «ГНЦ НИИАР», мкг/м³

Some statistical parameters of atmospheric pollution levels obtained by simulating the distribution of emissions of JSC «SSC RIAR», µg/m³

Наименование примеси	Статистические параметры			RfC
	макс	сред	медиана	
CO	0,014	0,003	0,002	3000
NO ₂	0,014	0,002	0,002	40
SO ₂	0,062	0,012	0,007	20
PM _{2,5}	0,016	0,003	0,002	10

населения Димитровграда (табл. 4). При оценке вклада различных примесей в формирование техногенного риска для одной группы веществ, предположительно, учтены все источники загрязнения окружающей среды в силу использования данных мониторинга в качестве исходных данных, для другой – выбросы отдельно взятых стационарных источников: АО «ГНЦ НИИАР» и предприятие теплоэнергетического комплекса ООО «НИИАР-Генерация».

Величина техногенного риска для населения Димитровграда на 87 % определяется загрязнением атмосферного воздуха двумя «классическими» ЗВ – диоксидом серы и взвешенными веществами. Для каждого из этих веществ уровень риска находится в диапазоне приемлемого для профессиональных групп, но неприемлемого для населения. Около 10 % от суммарного значения риска приходится на вещества, обладающие канцерогенными свойствами, – формальдегид и бензол. Ещё один «классический» загрязнитель, диоксид азота, вносит вклад в общую структуру тех-

ногенного риска на уровне 3 % и находится в области допустимых рисков.

Среди канцерогенных веществ, выбрасываемых стационарными источниками Димитровграда, наибольшим индексом потенциальной опасности обладает шестивалентный хром. Из располагаемых нами данных о выбросах основных предприятий количественное содержание Cr(VI) отмечено лишь в общем объёме выпуска ЗВ АО «ГНЦ НИИАР». При этом на долю предприятия приходится не более 7 % от валового значения выбросов шестивалентного хрома всеми стационарными источниками города.

Основной путь поступления в организм человека шестивалентного хрома, содержащегося в атмосфере-

Таблица 4

Ранжирование факторов негативного воздействия на здоровье населения Димитровграда по значениям пожизненного риска

Ranking of factors of negative impact on the health of the population of Dimitrovgrad by lifetime risk values

Фактор риска	Техногенный риск	Вклад в суммарный техногенный риск, %
Взвешенные вещества	$9,8 \cdot 10^{-4}$	76
Диоксид серы	$1,4 \cdot 10^{-4}$	11
Бензол	$9,6 \cdot 10^{-5}$	7
Диоксид азота	$3,9 \cdot 10^{-5}$	3,1
Формальдегид	$3,8 \cdot 10^{-5}$	2,9
Свинец	$1,9 \cdot 10^{-7}$	0,015
⁴¹ Ag	$2,7 \cdot 10^{-8}$	0,002
Хром шестивалентный*	$6,9 \cdot 10^{-9}$	0,001
Остальные радионуклиды*	$1,95 \cdot 10^{-9}$	0,0002
Сумма	$1,3 \cdot 10^{-3}$	100

Примечание: * – за счет газоаэрозольных выбросов АО «ГНЦ НИИАР»

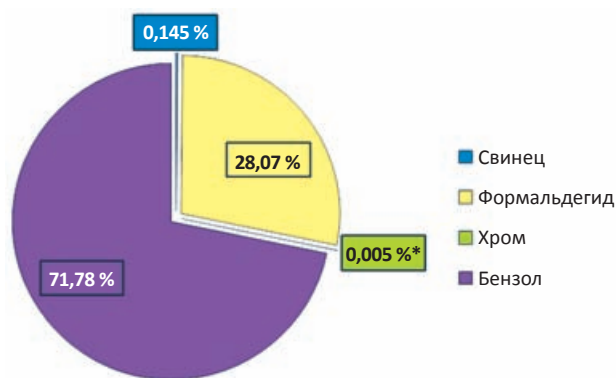


Рис. 4. Структура канцерогенного риска для населения Димитровграда (* – за счёт газоаэрозольных выбросов АО «ГНЦ НИИАР»)

Fig. 4. Structure of carcinogenic risk for the population of Dimitrovgrad (* – at the expense of gas-aerosol emissions of JSC «SRC RIAR»)

ном воздухе, ингаляционный, но мониторинг содержания Cr(VI) в атмосферном воздухе города не проводится. Среди канцерогенных веществ регулярный контроль загрязнения на стационарных постах города проводится для примесей бензола, формальдегида и свинца. Их присутствие в воздухе города, с большой вероятностью, обусловлено деятельностью предприятий машиностроительной и химической промышленности, а также (для бензола в большей степени) выхлопами автотранспорта. Структура канцерогенного риска за счёт воздействия этих веществ отражена на рис. 4.

Формируемый канцерогенный риск возникновения ЗНО за счёт экспозиции шестивалентного хрома от выбросов АО «ГНЦ НИИАР» и непрерывного вдыхания вредной примеси населением в среднем для жилой зоны города составляет $1,4 \cdot 10^{-8}$, что почти в 150 раз меньше нижней границы области приемлемого риска и может быть также классифицировано как пренебрежимо малый риск. Других ЗВ, обладающих канцерогенными свойствами, среди выбросов АО «ГНЦ НИИАР» не отмечено.

Оценка канцерогенного риска от ЗВ предполагает в качестве негативного эффекта случаи возникновения ЗНО. Для сопоставления с рисками другого характера полученные ранее оценки были скорректированы с учётом статистики онкологической смертности. Суммарное значение канцерогенного риска составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$, что несколько превышает верхнюю границу приемлемого для населения уровня риска. Однако контроль содержания канцерогенных веществ в воздухе города организован лишь на незначительном числе постов мониторинга, и поэтому основанная на этих данных оценка может не отражать полной картины по Димитровграду в целом.

Заключение

Вклад техногенного радиационного фактора в общую структуру риска составляет менее 0,003 %.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

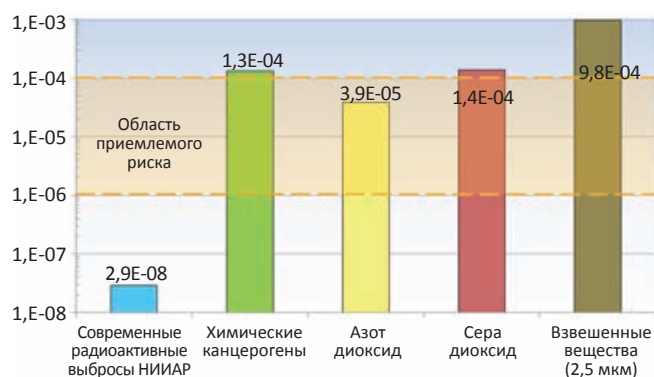


Рис. 5. Сравнение рисков воздействия техногенных факторов различной природы на здоровье населения Димитровграда

Fig. 5. Comparison of risks of impact of technogenic factors of various nature on the health of the population of Dimitrovgrad

Значения концентраций «классических» ЗВ за счёт выбросов АО «ГНЦ НИИАР» на 2–6 порядков ниже референсных уровней, а, значит, и не создают по отдельности токсических рисков для населения Димитровграда. Взвешенные вещества являются ведущим фактором в формировании техногенных рисков. Вклад АО «ГНЦ НИИАР» в загрязнение воздуха города взвешенными веществами (в пересчёте на мелкодисперсную фракцию $PM_{2,5}$) не превышает 0,008 %. Таким образом, можно заключить, что современная деятельность АО «ГНЦ НИИАР» приводит лишь к пренебрежимо малым значениям канцерогенных рисков для населения Димитровграда (рис. 5).

В настоящей статье представлены оценки техногенных рисков, которые можно использовать для определения приоритетов в области радиационной и химической безопасности населения, а также охраны окружающей среды. Полученные результаты могут быть полезны при решении вопросов оптимизации территориальных систем контроля загрязнения радионуклидами и ЗВ природных сред в районах расположения объектов использования атомной энергии и при определении комплекса мероприятий, направленных на улучшение благосостояния окружающей среды. Среди таковых можно отметить возможное совершенствование систем мониторинга в городе, основанное на расширении номенклатуры контролируемых ЗВ и радионуклидов на различных постах, в том числе установленных в перспективе в тех локациях, где риски от этих веществ принимали максимальные значения.

Кроме того материалы статьи могут быть использованы при анализе эпидемиологической обстановки и учтены в принимающей актуальность сегодня концепции доказательной оценки риска [16].

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 11.09.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 11.09.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

Assessment of the Contribution of Research Institute of Atomic Reactors in Technogenic Risks Formation for the Population of the City Dimitrovgrad

A.A. Arakelyan, M.V. Vedernikova, E.A. Gavrilina, K.A. Pechkurova

Nuclear Safety Institute, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: The assess the contribution of modern activity of Research Institute of Atomic Reactors (JSC «SSC RIAR») in the formation of man-made risks for the population of Dimitrovgrad, Ulyanovsk region.

Material and methods: The results of monitoring of the state of the environment, meteorological features of the area of JSC «SSC RIAR» location, data on the radiation and sanitary-epidemiological situation in Dimitrovgrad were studied and analyzed. The materials of the state reports, annual reports and analytical references of the Rospotrebnadzor, the Volga UGMS, Ulyanovskstat, the Ministry of Ecology and Nature Management of the Ulyanovsk Region and the Interregional Department № 172 of the FMBA of Russia, as well as the results of industrial and environmental monitoring provided directly by JSC «SSC RIAR» were used as the sources of the initial data.

The work was carried out dispersion modeling of current annual gas and aerosol emissions to estimate the contribution of JSC «RIAR» in the formation of ambient city air pollution. The calculation of risks was carried out in accordance with the UNSCEAR methodology for the assessment of radiation risk and the Guidelines for the assessment of the effects of toxic and carcinogenic chemicals approved by the Ministry of Health of the Russian Federation.

Results: The average annual dose rate for the population of Dimitrovgrad caused by current emissions of JSC «SSC RIAR» according to the results of conservative calculations is $0.9 \mu\text{Sv/year}$. The value of radiation risk for the population of the residential zone is at the level of $2.9 \cdot 10^{-8}$, while for the entire territory of Dimitrovgrad it is $5.4 \cdot 10^{-8}$. The resulting value of the radiation risk to the health of people living in a residential area of the city is more than 30 times lower than the level of acceptable risk ($1 \cdot 10^{-6}$).

The total value of chemical risk from all sources of air pollution in Dimitrovgrad is $1.3 \cdot 10^{-3}$. This risk level is in the range of unacceptable risk neither for the population nor for professional groups. Assessment of a carcinogenic risk from pollutants suggests the occurrence of malignant neoplasms as a negative effect. The total value of carcinogenic risk is $1.3 \cdot 10^{-4}$, which slightly exceeds the upper limit of the acceptable risk level for the population.

Conclusion: The contribution of anthropogenic radiation factor to the overall risk structure is less than 0.003 %. The role of JSC «SSC RIAR» in the air pollution of the residential zone of the city is negligible and does not create toxic risks for the population of Dimitrovgrad. Thus the current activity of JSC «SSC RIAR» leads to negligible values of carcinogenic risks for the population of the area of the nuclear facility location.

Key words: JSC «SSC RIAR», radiation safety, radiation risk, chemical risk, the state of the environment

For citation: Arakelyan AA, Vedernikova MV, Gavrilina EA, Pechkurova KA. Assessment of the Contribution of Research Institute of Atomic Reactors in Technogenic Risks Formation for the Population of the City Dimitrovgrad. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):13-9. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-13-19

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Онищенко Г.Г. и др. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: НИИ ЭЧ и ГОС. 2002. 408 с. [Onishchenko GG, et al. Principles of Risk Assessment for Health of the Population with Exposure to Chemical Substances, Polluting the Environment. Moscow. 2002. 408 p. (In Russ.).]
2. Авалиани С.Л. и др. Управление окружающей средой на основе методологии анализа риска. М., 2006. 186 с. [Avaliani SL, et al. Environmental management based on risk analysis methodology. Tutorial. Moscow. 2006. 186 p. (In Russ.).]
3. Anenberg SC, et al. Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools. Risk Analysis. 2016;36(9):1718-36. Special Issue: Air Pollution Health Risks.
4. Отчет по экологической безопасности. АО «ГНЦ НИИАР». Отчёт за 2017 г. Димитровград. 2018. 89 с. [Environmental safety report. JSC «SRC RIAR». 2017 Report. Dimitrovgrad. 89 p. (In Russ.).]
5. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Методические подходы для оценок радиационной обстановки, ожидаемого облучения и эффективности контрмер при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу в модели «ПРОЛОГ» (ч. 1). Препринт ИБРАЕ № IBRAE-2011-02. 2011. 40 с. [Bogatov SA, Kiselev AA, Shvedov AM. Methodological approaches for the assessment of the radiation situation, the expected exposure and the effectiveness of the countermeasures at short-term release of radioactive substances into the atmosphere in the model «PROLOG» (P. 1). Preprint № IBRAE-2011-02. 2011. 40 p. (In Russ.).]
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. New York: United Nations sales publication. 2008. 310 p.
7. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France. 2016. 454 p.
8. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду Р 2.1.10.1920-04. Москва. 2004. 340 с. [Guidelines for assessing the risk to public health when exposed to chemicals that pollute the environment Р 2.1.10.1920-04. Moscow; 2004. 340 p. (In Russ.).]
9. United States Environmental protection agency. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment). Washington DC: U.S. EPA. 2004. 156 p.
10. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2016 год. Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М. 2017. 126 с. [The results of radiation hygienic certification in the subjects of the Russian Federation for 2016. Radiation hygienic passport of the Russian Federation. Moscow. 2017. 126 p. (In Russ.).]
11. Романович И.К. и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Под ред. Г.Г. Онищенко, А.Ю. Поповой. СПб.: 2018. 432 с. [Romanovich IK, et al. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures P.V. Ramzayev NIIRG. Ed. Onishchenko GG, Popova AYU. St. Petersburg. 2018. 432 p. (In Russ.).]
12. Письмо Ульяновскстата № 64/ОГ от 19.07.2018 г. за подписью ВРИО руководителя О.В. Каравашкина о предоставлении информации по статистике по форме 2-ТП с электронным приложением. [Letter of Ulyanovskstat No. 64 / OG dated July 19, 2018 signed by the Acting Director O.V. Karavashkina on providing information on statistics on the form 2-TP with an electronic application. (In Russ.).]
13. Состояние загрязнения атмосферного воздуха на территории деятельности Приволжского УГМС. Ежегодник за 2017 г. М. 2018. [The state of air pollution in the territory of the Volga UGMS activities. Yearbook for 2017. Moscow. 2018. (In Russ.).]
14. База данных по социально-гигиеническому мониторингу Межрегионального управления № 172 ФМБА России. [Database on social and hygienic monitoring of the Interregional Management No. 172 of the FMBA of Russia. (In Russ.).]
15. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Гигиенические нормативы СП 2.6.1.2523-09. М. 2009. 100 с. [Radiation safety standards NRB-99/2009. Hygienic standards SP 2.6.1.2523-09. Moscow. 2009. 100 p. (In Russ.).]
16. Рахманин Ю.А. и др. Современные проблемы оценки риска воздействия факторов окружающей среды на здоровье населения и пути ее совершенствования. Анализ риска здоровью. 2015;2(10):24-34. [Rakhmanin YuA, et al. Actual problems of environmental factors risk assessment on human health and ways to improve it. Health Risk Analysis. 2015;2(10):24-34. (In Russ.).]

М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Ю.В. Абрамов, Г.П. Фролов, В.Н. Клочков, Б.А. Кухта, И.К. Теснов
ОПЕРАЦИОННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОЖИ
В СЛУЧАЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

Контактное лицо: Саленко Юрий Анатольевич, salenkoua@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка рекомендаций по применению в медицинской практике учреждений ФМБА России операционных величин загрязнения радиоактивными веществами (РВ) кожных покровов лиц, пострадавших в случае радиационных аварий (РА).

Материал и методы: В качестве операционных величин использованы легко измеряемые радиационные параметры: мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) γ -излучения, плотность загрязнения кожи γ -, β - и α -излучающими радионуклидами. Значения операционных величин загрязнения кожи РВ оценены на основании описанных в литературе экспериментальных данных и моделей по кинетике транспорта РВ в организме, принятых значений дозовых критериев для детерминированных и стохастических эффектов. Резорбция РВ через кожу оценена по результатам экспериментальных исследований на лабораторных животных (в основном, поросята) для ограниченного набора химических соединений радионуклидов.

Результаты: Представлены значения МАЭД γ -излучения основных дозообразующих радионуклидов, измеряемой на расстоянии 10 см от поверхности кожи в диапазоне значений 10–1000 мкЗв/ч, и соответствующие этим значениям возможные последствия для здоровья в результате облучения кожи и поступления РВ в организм. В рекомендациях МАГАТЭ уровень загрязнения кожи в 1 мкЗв/ч рассматривается как значимая операционная величина по критерию поступления РВ через рот с загрязненной поверхности кистей рук. Однако, по нашему мнению, эта оценка является излишне консервативной и не включена в рекомендуемые значения операционных величин. В случае загрязнения кожи растворами γ - β -излучающих радионуклидов с поверхностной плотностью загрязнения более 10^6 Бк/см² (МАЭД ≥ 1000 мкЗв/ч) требуется проведение, даже в приспособленных условиях, экстренной (в течение ближайших минут после установления факта загрязнения) санитарной обработки (СО) вне очереди. Обязательными показаниями для обследования пострадавших на спектрометре излучений человека (СИЧ) после тщательной СО и проведения биофизических исследований биопроб являются следующие значения операционных величин: МАЭД γ -излучения от кожи > 10 мкЗв/ч; поверхностная плотность загрязнения неповрежденной кожи β -активными нуклидами $> 20\,000$ Бк-час/(см²·мин); поверхностная плотность загрязнения неповрежденной кожи α -активными нуклидами > 200 Бк-час/(см²·мин).

Заключение: Рекомендуемые значения операционных величин позволяют предварительно и оперативно оценить угрозу для здоровья не только при внешнем (контактном) облучении кожи и подлежащих тканей, но и вследствие поступления растворимых форм РВ в организм через неповрежденную и поврежденную (травмированную) кожу. Учитывая большую степень неопределенности полученных оценок, значения операционных величин следует рассматривать как сугубо консервативные и использовать их только для оценки срочности выполнения СО пострадавших при оказании медицинской помощи в догоспитальный и ранний госпитальный периоды с обязательным проведением дальнейшего дозиметрического обследования для окончательной оценки поглощенной дозы.

Ключевые слова: радиационная авария, радиологический терроризм, загрязнение кожи радиоактивными веществами, операционные величины, санитарная обработка, медицинская помощь

Для цитирования: Грачев М.И., Саленко Ю.А., Абрамов Ю.В., Фролов Г.П., Клочков В.Н., Кухта Б.А., Теснов И.К. Операционные величины радиоактивного загрязнения кожи в случае радиационной аварии. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):20–6.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-20-26

Введение

Загрязнение радиоактивными веществами (РВ) кожных покровов персонала и лиц из населения является значимым фактором радиационного воздействия в случае аварийных ситуаций на производстве, инцидентах, связанных с хищением и нарушением целостности мощных закрытых радионуклидных источников (ЗРНИ). В современных условиях нельзя недооценивать наличие угроз радиологического терроризма, в частности, широко обсуждаемого сценария применения «грязной бомбы» [1].

Важным уроком, свидетельствующим о масштабных радиологических последствиях в результате попадания в селитебную зону бесхозного ЗРНИ, является крупнейший радиационный инцидент с хищением и последующей разгерметизацией источника цезия-137, произошедший в сентябре 1987 г. в бразильском городе Гояния и приведший к высоким уровням загрязнения кожных покровов лиц из населения [2].

Уже в самый начальный период после загрязнения РВ кожи (часы, а при высоких уровнях загрязнения – минуты) важно оценить вероятность не только проявления детерминированных эффектов облучения кожи, но и резорбцию растворимых форм радионуклидов через интактную или поврежденную, в результате механической травмы или ожога, кожу. Высокая плотность загрязнения кожи РВ в случае аварийного выброса является показанием к исследованию содержания радионуклидов внутри организма в результате ингаляционного поступления. При этом вероятность поступления РВ внутрь организма в значимых количествах также косвенно может быть первоначально оценена по загрязнению кожи и слизистых. И, наконец, загрязненная кожа (пальцы рук) может служить источником поступления радионуклидов через рот, особенно у детей.

Дополнительным методом, оценивающим возможное ингаляционное поступление РВ, является радиометрическое исследование мазков из носа.

С практической точки зрения этот метод не имеет каких-либо значимых преимуществ перед экспрессной оценкой результатов измерения загрязненности кожи с помощью приборов или перед использованием расчетных моделей для того или иного сценария аварийного выброса. Необходимо только отметить, что наличие в мазках из носа трансураниевых нуклидов (плутоний, америций) выше 10 Бк должно являться основанием для проведения тщательной обработки ротоглотки, дополнительных биофизических исследований, а также использования неинвазивных методов по предотвращению инкорпорации радионуклидов и ускорению их выведения из организма.

Материал и методы

На основании описанных в литературе экспериментальных данных и моделей по кинетике транспорта РВ в организме лабораторных животных и человека, принятых дозовых критериев детерминированных и стохастических эффектов были оценены значения операционных величин загрязнения кожи РВ. Рекомендуются операционные величины позволяют осуществлять первоначальную (экспрессную) оценку возможных последствий для здоровья лиц, вовлеченных в РА и оперативно принять решение об их СО и дозиметрическом обследовании. В диапазоне оцениваемых значений операционные величины могут быть использованы для основных дозообразующих γ - и β -излучающих нуклидов и их смесей, содержащихся в аварийном выбросе, или в мощных ЗРНИ при их разгерметизации. Кроме того, они обеспечивают достаточный запас (по величине дозы) для принятия решений о срочности (очередности) и дополнительном объеме проведения СО пострадавших, а также о необходимости их дальнейшего дозиметрического обследования.

К основным операционным величинам относятся:

- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) γ -излучения (мкЗв/ч) на расстоянии 10 см от загрязненного участка кожи;
- плотность потока β -частиц (част/(см²·мин)) на расстоянии 1–2 см от кожи;
- плотность потока α -частиц (част/(см²·мин)) вплотную к коже;
- суммарное содержание изотопов плутония и америция (Бк) в местах повреждения кожных покровов на момент поступления радионуклида в рану.

Измерение МАЭД γ -излучения позволяет первоначально оценить поглощенную дозу в базальном слое эпидермиса или дерме кожи. Данный вид измерений следует применять преимущественно для оценки высоких уровней загрязнения кожи РВ, которые могут обусловить возникновение детерминированных эффектов и развитие местных лучевых поражений (МЛП) различной степени тяжести.

Измерения должны быть проведены в максимально короткие сроки после загрязнения кожи РВ (здравпункт предприятия, сортировочная площадка, специализированное приемное отделение лечебного учреждения) сразу после эвакуации пострадавших и населения из опасной зоны.

Рекомендуемые значения операционных величин были оценены для следующих основных путей облучения:

- облучение эпидермиса (базальный слой на глубине 70 мкм) и дермы (на глубине 300–500 мкм) в результате однократного контактного загрязнения кожи РВ;
- поступление растворимых форм радионуклидов в организм через неповрежденную и поврежденную кожу;
- поступление в организм смеси плутония и америция через колотые раны;
- загрязнение кожи радиоактивными аэрозолями как косвенный показатель, свидетельствующий о возможной ингаляции РВ в случае их оседания из облака выброса или при нахождении в помещении, где произошло диспергирование радиоактивного материала;
- загрязнение кожи РВ как показатель возможного поступления радионуклидов в организм через рот с загрязненной поверхности кожи.

Прогнозируемый уровень облучения кожи, равный 3 Гр за 2 сут, при котором необходимо срочное вмешательство (НРБ-99/2009), был установлен для эритемы, не являющейся опасным детерминированным эффектом. Для оценки облучения базального слоя эпидермиса кожи на глубине 70 мкм в диапазоне поглощенной дозы до 20 Гр и ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы в дерме кожи на глубине ~ 500 мкм в диапазоне 20–30 Гр с учетом вклада от фотонов, конверсионных электронов и β -частиц радионуклида использованы дозовые коэффициенты на единицу активности радионуклида на поверхности кожи [3].

Оценка загрязнения кожи растворимыми формами РВ при поступлении нуклидов через неповрежденную кожу была проведена на основе экспериментальных исследований по метаболизму продуктов ядерного деления в организме лабораторных животных [4, 5]. Для кожи, поврежденной в результате механической травмы, термического и химического ожога принималось, что все РВ, находящиеся в ране, поступят в кровь и в места депонирования.

Загрязнение кожи α -излучающими радионуклидами имеет значение в случае нарушения целостности кожи. В последние годы в статистике инцидентов (аварий) на радиационно опасных предприятиях значимое место занимают случаи нестандартного (раневого) поступления смеси изотопов плутония-239 и америция-241 в организм работников. В этом случае происходит быстрое (в течение 1–5 сут) поступление радионуклидов в лимфатическую систему и кровь с последующим отложением их в печени и скелете, в результате чего основная дозовая нагрузка приходится на печень, а также на клетки эндоста и, как следствие, – на красный костный мозг.

По результатам исследований ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России в качестве операционных величин загрязнения кожи суммой изотопов плутония и америция принимаются значения активности нуклидов в области раны, которые могут при поступлении в организм сформировать годовую ожидаемую эффективную дозу (ОЭД) в диапазоне от 5 до 200 мЗв [6, 7].

В случае оседания радиоактивных аэрозолей из облака выброса плотность поверхностного загрязнения открытых участков кожи может быть использована для оценки вероятности поступления радиоактивных аэрозолей в организм через органы дыхания. Для

оценки операционных величин загрязнения кожи РВ были приняты исходные данные, приводящие к наибольшим дозовым нагрузкам.

Эффективная доза 5 мЗв за первый год для ограничения потребления загрязненных пищевых продуктов в случае РА была использована в качестве критерия для оценки перорального поступления РВ в организм (НРБ-99/2009). Консервативно предполагается, что около 1 % радионуклидов, находящихся на коже, поступит через рот с загрязненных кистей рук. В качестве дозовых коэффициентов (Зв/Бк) использованы значения при поступлении РВ с пищей [8].

В табл. 1 представлены дозовые критерии и принятые допущения для оценки операционной величины загрязнения кожи РВ с учетом возможности формирования легких и тяжелых форм детерминированных эффектов облучения кожи и подлежащих мягких тканей.

Сравнительно новым подходом является использование результатов измерения загрязнения кожи РВ как показателя для предварительной оценки поступления радионуклидов в организм. В последнем случае в качестве дозовых критериев были использованы соответствующие значения эквивалентных доз

Таблица 1

Дозовые критерии и допущения для оценки облучения кожи и уровней ее радиоактивного загрязнения
Dose criteria and assumptions for assessing skin exposure and levels of radiation contamination

Доза/время облучения	Критерии	Методы расчета и допущения
3 Гр за 2-е сут (базальный слой эпидермиса)	Преходящая эритема	Для оценки контактного облучения кожи использованы дозовые коэффициенты (Гр/(Бк·с/см ²)) для базального слоя кожи на глубине 70 мкм (7 мг/см ²) [3]. Для оценки МАЭД γ -излучения площадь участка загрязнения кожи принята равной 100 см ² . Загрязнение носит однократный характер. Консервативно принимается, что оно сохраняется в течение 5 ч
8–12 Гр за 5 ч (базальный слой эпидермиса)	Первичная эритема. Основная (вторая волна) эритема. Сухая десквамация	
15–20 Гр за 5 ч (базальный слой эпидермиса)	Основная (вторая волна) эритема. Отек кожи и подкожно-жировой клетчатки, пузыри. Влажная десквамация	
25–30 Гр (дерма) за 5 ч	Отек, болевой синдром. Первичные радиационные язвы. Глубокие язвы не заживают без оперативного лечения	Для оценки облучения дермы использованы дозовые коэффициенты мощности ОБЭ-взвешенной дозы в дерме на единицу поверхностной активности радионуклида [3]. Значения использованных коэффициентов рассчитаны с учетом вклада от дискретных фотонов и их выходом на единицу ядерного распада, выхода конверсионных электронов и β -частиц с максимальной энергией. Оценка проведена из условия облучения 100 см ² кожи на глубине 400 мкм (40 мг/см ²)
≥30 Гр (дерма) за 5 ч	Отек, болевой синдром, местные кровоизлияния, первичный лучевой некроз	
50 мЗв/год (все тело, гонады, красный костный мозг); 150 мЗв/год (щитовидная железа, печень, почки, селезенка); 300 мЗв/год (костная ткань)	Эквивалентная доза в органе в результате резорбции растворимых форм радионуклидов через неповрежденную кожу и раневые поверхности с повреждением дермы, для оценки которой необходимо проведение дополнительных дозиметрических исследований	При попадании на кожу высокоактивных растворов радионуклидов уровни загрязнения поверхности кожи с учетом возможности резорбции в организм были оценены исходя из следующих допущений. Интактная кожа: площадь загрязнения 100 см ² , характер загрязнения – однократное в течение 1 ч, коэффициенты резорбции (отношение активности на поверхности кожи к активности на глубине дермы 1000 мкм консервативно оценены по экспериментальным данным на животных [4]. Принимается, что все радионуклиды, находящиеся в толще дермы, поступят с кровью и лимфой в органы депонирования Поврежденная кожа: открытая механическая травма (ссадина) или термический ожог, площадь загрязнения (участок раны) 100 см ² , все радионуклиды, находящаяся в ране, однократно поступят в кровь в течение 1 ч. Оценки дозы проведены консервативно без учета выведения, что дополнительно может давать запас в величину оцениваемой дозы
5–50 мЗв/год	ОЭД в результате поступления изотопов плутония и америция через поврежденную кожу (наколы), используемая в качестве критерия оценки суммарной активности α -излучателей в области раны, при которой принимается решение об использовании метода комплексотерапии (пентацин) [6] для ограничения облучения работника	
20–200 мЗв/год	ОЭД в результате поступления изотопов плутония и америция через поврежденную кожу (наколы), используемая в качестве критерия оценки суммарной активности α -излучателей в области раны, при которой принимается решение об использовании метода хирургического иссечения тканей [6] для ограничения облучения работника	
100 мЗв (~ за 10 сут)	Эффективная доза в результате ингаляции радиоактивных аэрозолей, оцениваемая по плотности загрязнения открытых участков тела (кожа шеи и лица), для оценки которой необходимо проведение дополнительных дозиметрических исследований	В случае попадания пострадавших под облако выброса, загрязнение РВ открытых участков кожи (шея, лицо) и одежды может быть использовано для приблизительных оценок значимости поступления радиоактивных аэрозолей в организм через органы дыхания. Значение эффективной дозы 100 мЗв было принято в качестве критерия, рекомендуемого международными нормами [9] для принятия решений о защитных мерах для населения, главным образом, для данного типа сценария радиологической ситуации. Консервативно были приняты исходные данные, приводящие к наибольшим дозовым нагрузкам. Расчеты проведены с использованием сертифицированной компьютерной программы RECASS NT (разработчик НПО «Тайфун»)
5 мЗв в первый год	Эффективная доза в результате попадания радионуклидов с поверхности загрязненных пальцев рук через рот. Данное значение является критерием для ограничения потребления продуктов питания в случае РА	Значение эффективной дозы 5 мЗв было принято в качестве критерия при пероральном поступлении радионуклидов. Консервативно предполагается, что около 1 % радионуклидов, находящихся на коже, поступит через рот с загрязненных пальцев рук. В качестве дозовых коэффициентов (Зв/Бк) использованы значения при поступлении с пищей для критических групп населения [9]

Таблица 2

Плотность поверхностного загрязнения кожи и соответствующие значения МАЭД γ -излучения на расстоянии 10 см от поверхности кожи, при которых в течение 5 ч поглощенная доза в базальном слое эпидермиса составит 1 Гр*

The density of surface contamination of the skin and the corresponding AEDR** values of gamma radiation at a distance of 10 cm from the skin surface, at which the absorbed dose in the basal layer of the epidermis will be 1 Gy for 5 hours*

Нуклид	Плотность загрязнения, создающая дозу в базальном слое эпидермиса 1 Гр за 5 ч, Бк/см ²	МАЭД от пятна 100 см ² на 10 см, мкЗв/ч
Cr-51	1,99E+08	1,18E+04
Co-60	1,92E+05	5,67E+02
Sr-90	6,32E+04	–
Zr-95	1,68E+05	1,60E+02
Ru-103	3,09E+05	2,12E+02
Ru-106	1,13E+05	3,01E+01
Cs-134	1,85E+05	3,72E+02
Cs-137	1,26E+05	9,42E+01
Ce-141	1,16E+05	1,15E+01
Ir-192	1,24E+05	1,31E+02
Ba-133	2,06E+06	1,39E+03
Cd-109	3,97E+05	1,63E+02
Hg-203	2,22E+05	6,61E+01
I-131	1,39E+05	6,89E+01
Te-132	8,42E+04	2,82E+02
Zn-65	8,30E+06	5,83E+03

Примечание: * В табл. 2 и 3 использованы дозовые коэффициенты из публикации МАГАТЭ [3]

** AEDR – ambient equivalent dose rate

или ОЭД, являющиеся пределом дозы для персонала или используемые в качестве уровней вмешательства для населения в случае РА.

Для проведения соответствующих оценок в табл. 2 и табл. 3 приведены значения плотности поверхностного загрязнения кожи γ -, β -излучающими нуклидами и МАЭД γ -излучения, создающие за 5 ч дозу 1 Гр (поглощенную в эпидермисе и ОБЭ-взвешенную поглощенную в дерме).

Результаты и обсуждение

В табл. 4 содержатся рекомендуемые значения операционных величин для предварительной оценки возможных последствий для здоровья в результате загрязнения РВ кожных покровов.

Для оценки дозы облучения кожи консервативно принималось, что РВ находятся на коже в течение 5 ч до начала проведения СО. Высокие и сверхвысокие (≥ 1000 мкЗв/ч) уровни радиационного воздействия, обусловленного загрязнением РВ кожи, могут иметь место у персонала и участников аварийно-спасательных и других неотложных работ (АСДНР). Необходимо учитывать возможные последствия внешнего и внутреннего облучения и другие, опасные для здоровья и жизни факторы РА (травмы, ожоги, отравление продуктами горения и др.). Так, имеющийся опыт лечения больных, пострадавших при аварии на ЧАЭС, свидетельствует, что местные лучевые поражения (МЛП) на-

Таблица 3

Плотность поверхностного загрязнения кожи и соответствующие значения МАЭД γ -излучения на расстоянии 10 см от поверхности кожи, при которых в течение 5 ч поглощенная доза в дерме кожи составит 1 Гр

The density of surface contamination of the skin and the corresponding AEDR values of gamma radiation at a distance of 10 cm from the skin surface, at which the absorbed dose in the dermis of the skin will be 1 Gy for 5 hours

Нуклид	Плотность загрязнения, создающая дозу в дерме 1 Гр за 5 ч, Бк/см ²	МАЭД от пятна 100 см ² на 10 см, мкЗв/ч
Na-24	1,54E+05	6,44E+02
Cr-51	1,43E+07	8,46E+02
Mn-54	4,28E+06	4,54E+03
Co-60	1,64E+06	4,83E+03
Sr-90	1,11E+05	0,00E+00
Zr-95	1,18E+06	1,13E+03
Ru-103	5,56E+06	3,81E+03
Ru-106	1,24E+05	3,27E+01
Cs-134	5,05E+05	1,01E+03
Cs-137	3,97E+05	2,96E+02
Ce-141	9,93E+05	9,89E+01
Ir-192	4,28E+05	4,53E+02
Ba-133	3,71E+06	2,50E+03
Cd-109	1,54E+07	6,92E+03
Ce-139	1,09E+07	2,95E+03
Co-58	2,93E+06	4,53E+03
Fe-59	1,24E+06	1,76E+03
Hg-203	3,09E+06	9,18E+02
I-131	5,05E+05	2,51E+02
Na-22	6,18E+05	1,68E+03
Sb-126	2,53E+05	8,66E+02
Te-132	1,85E+05	6,20E+02
Zn-65	5,56E+06	3,91E+03

блюдались в сочетании с радиационным поражением костного мозга [11] и в ряде случаев – в комбинации с термическими ожогами.

В ситуациях неконтролируемого загрязнения территории в случае разгерметизации мощного ЗРНИ или при использовании источников ионизирующего излучения с террористическими или криминальными целями также нельзя исключать опасные для здоровья и даже жизни высокие уровни загрязнения кожи РВ у лиц из населения.

Обязательными показаниями для проведения дозиметрического обследования пострадавших на СИЧ и проведения биофизических исследований биопроб являются:

- МАЭД γ -излучения от кожи > 10 мкЗв/ч;
- плотность поверхностного загрязнения¹ неповрежденной кожи β -излучающими нуклидами $> 20\,000$ β -част/(см²·мин) [10];
- плотность поверхностного загрязнения > 200 α -част/(см²·мин) для неповрежденной кожи [10].

В случае загрязнения кожи растворами γ - β -излучающих радионуклидов $\sim 10^6$ Бк/см² (МАЭД свыше 1000 мкЗв/ч) требуется проведение экстренной (в течение ближайших минут) СО по жизненным показателям.

¹Представительным значением является 200 000 β -част/(см²·мин), однако с учетом верхнего предела измерений большинства приборов, ограниченного, как правило 40–60 тыс. β -част/(см²·мин) предлагается использовать значение 20 000 β -част/(см²·мин).

Таблица 4

Операционные величины и уровни загрязнения кожи, в случае превышения которых возможны значимые последствия для здоровья

Operational values and levels of skin contamination, if exceeded, may have significant health consequences

Операционная величина и ее значение	Последствия для здоровья
МАЭД* на расстоянии 10 см от поверхности кожи равна 1000 мкЗв/ч	Необходимо учитывать возможное внешнее облучение, а также поступление РВ в организм персонала и лиц, вовлеченных в РА. При наличии на коже РВ в течение нескольких часов имеется высокая вероятность серьезных детерминированных эффектов облучения кожи с развитием МЛП средней и тяжелой степени тяжести (МЛП II – МЛП III). Крайне тяжелые поражения (глубокие некрозы с повреждением подкожной клетчатки, мышц, костей, а также внутренних органов) ожидаются при непосредственном, прямом и длительном контакте локальных участков тела с ЗРНИ. При значительной площади загрязнения РВ (свыше 1/3 поверхности тела) может развиваться ожоговая болезнь с ее типичными проявлениями и осложнениями. При вдыхании радиоактивных аэрозолей возможно облучение отдельных органов и тканей в дозах, превышающих пороги детерминированных эффектов. При резорбции растворимых форм нуклидов через локальный участок поврежденной кожи (~100 см ²) доза облучения органов и тканей может достигать значений порогов детерминированных эффектов; в случае неповрежденной кожи – ОЭД не превысит 50 мЗв/год. При наличии в выбросе радиоактивного йода поглощенная доза в щитовидной железе (ЩЖ) в результате ингаляции может достигнуть 10 Гр. У населения при поступлении РВ в организм с загрязненной кожи рук через рот возможно формирование ОЭД на уровне десятков мЗв/год
МАЭД на расстоянии 10 см от поверхности кожи равна 100 мкЗв/ч	Необходимо учитывать возможное внешнее облучение, а также поступление РВ в организм и внутреннее облучение персонала и лиц, вовлеченных в РА. При наличии на коже РВ в течение нескольких часов возможно развитие МЛП I – II степени тяжести. При вдыхании радиоактивных аэрозолей возможно облучение отдельных органов и тканей в дозах на уровне порогов детерминированных эффектов. При резорбции растворимых форм нуклидов через поврежденную кожу в зависимости от характера и площади повреждения ОЭД может превысить 100 мЗв/год. При наличии в выбросе радиоактивного йода поглощенная доза в ЩЖ в результате ингаляции может достигнуть 1 Гр. У населения (особенно у детей) необходимо учитывать возможность поступления РВ в организм с загрязненной кожи через рот. Консервативно оцениваемая ОЭД может превысить 5 мЗв/год
МАЭД на расстоянии 10 см от поверхности кожи равна 10 мкЗв/ч	Наличие РВ на коже в течение нескольких дней может обусловить возникновение легкой эритемы на наиболее загрязненных и/или чувствительных участках кожи. ОЭД в результате ингаляции может до двух раз превысить 100 мЗв. В случае нахождения в выбросе радиоактивного йода, поглощенная доза в ЩЖ может достигнуть или незначительно превысить 100 мГр. При резорбции растворимых форм нуклидов через поврежденную кожу ОЭД не превысит 20–50 мЗв/год. Необходимо учитывать возможность поступления РВ в организм с загрязненной кожи через рот
Уровень загрязнения кожи равен 20 000 β-част/(см ² ·мин) (~1мкЗв/ч)	Наличие РВ на коже в течение нескольких дней может привести к формированию дозы на базальный слой эпидермиса на уровне пределов доз для персонала. При наличии радиоактивного йода в составе газо-аэрозольного выброса, осевшего на открытые участки кожи, нельзя исключить формирование дозы на ЩЖ выше 50 мЗв. Сохраняется потенциальная опасность формирования дозы внутреннего облучения при попадании на поврежденную кожу растворимых форм РВ. Данный уровень загрязнения является показанием для неотложной (в течение 45 минут от момента загрязнения), специальной медицинской обработки раны [10]. Необходимо учитывать возможность поступления РВ в организм с загрязненной кожи через рот. Показано назначение соответствующих комплексобразователей, антагонистов и слабительных
Суммарная активность изотопов плутония и америция в ране составляет 10–100 Бк	В случае попадания РВ в организм через рану и наколы оцененные значения ОЭД находятся в диапазоне 5–50 мЗв/год [6]
Суммарная активность изотопов плутония и америция в ране составляет 40–400 Бк	В случае попадания РВ в организм через рану и наколы оцененные значения ОЭД находятся в диапазоне 20–200 мЗв/год [6]

Примечание: * — значение МАЭД 10 000 мкЗв/ч рассматривается как уровень загрязнения кожи РВ, представляющий угрозу для жизни

ниям сразу после установления факта загрязнения². В случае невозможности проведения полной СО, в том числе в связи с тяжелым состоянием пострадавшего – выполняется частичная СО открытых участков тела и снятие (срезание) загрязненной одежды одновременно с оказанием неотложной медицинской помощи. Полная СО выполняется на следующем этапе оказания медицинской помощи как можно скорее. Отсрочка (более 15 мин) в проведении частичной СО

в связи с необходимостью транспортирования пострадавшего в санпропускник не оправдана.

В случае раневого поступления α-излучающих радионуклидов превышение 10 Бк по суммарной активности плутония и америция в ране является основанием (показанием) для проведения специальных медицинских мероприятий по обработке раны и предотвращению поступления радионуклидов в кровь. Суммарная (оцененная) активность радионуклидов в ране свыше 40 Бк является показаниями к инвазивным методам декорпорации, включая иссечение

² 1 Бк/см² ~ 25 част/(см²·мин)

Таблица 5

Уровни радиоактивного загрязнения открытых участков кожных покровов для ограничения разнеса радиоактивных веществ

Levels of radioactive contamination of exposed areas of the skin to limit the spread of radioactive substances

Уровни радиоактивного загрязнения кожных покровов, β -част/(см ² ·мин)	Основные медико-санитарные мероприятия
До 20 000 и выше	Лицам из населения, имеющим данный уровень радиоактивного загрязнения кожи и одежды, должно быть обеспечено первоочередное прохождение СО и полное переодевание в здравпункте, в пункте специальной обработки (ПУСО) или в специально оборудованных помещениях и площадках. Стандартом следует считать проведение полной или частичной (с переодеванием) СО не позднее 1–2 ч после загрязнения (выявления загрязнения) РВ, возникшего в результате газо-аэрозольного выброса или диспергирования РВ. При загрязнении кожи растворами РВ полная СО проводится как можно быстрее (не позднее 15 мин после загрязнения, вне очереди). При наличии травм и обширных повреждений кожи СО проводится при участии и под контролем медицинского персонала после или одновременно с оказанием неотложной медицинской помощи. На догоспитальных этапах откладывать оказание неотложной медицинской помощи пострадавшим до момента окончания процедур первоначального радиационного контроля и СО является недопустимым. Окончательная оценка загрязнения РВ ран проводится в медицинском учреждении с последующей специальной обработкой ран и проведением в случае необходимости дальнейших мероприятий по декорпорации РВ. Целесообразно проведение клинко-дозиметрического обследования в специализированном медицинском учреждении (с учетом условий, при которых произошло загрязнение РВ кожи). При наличии в составе газо-аэрозольного выброса радиоактивного йода необходимо провести йодную профилактику*. Снять и поместить в пластиковый контейнер одежду, отправить ее на дополнительное исследование
До 2000	Лица из населения, имеющие данный уровень радиоактивного загрязнения кожи и одежды, в обязательном порядке проходят СО и замену загрязненной одежды и обуви в здравпункте, в пункте специальной обработки (ПУСО) или в специально оборудованных помещениях и площадках. СО персонала, включая персонал, участвующий в проведении АСДНР, проводится в конце рабочей смены. При загрязнении кожи и/или спецодежды растворами РВ, персонал прекращает работу и направляется на СО не позднее 1 ч после загрязнения. СО тяжело пострадавших может проводиться непосредственно в медицинском учреждении. Оценка загрязнения РВ ран проводится в медицинском учреждении с последующей специальной обработкой ран (при необходимости)
До 200	В случае большого количества людей, подвергшихся загрязнению РВ, и невозможности проведения СО в централизованном порядке часть лиц из населения может выйти за пределы установленной зоны и пройти СО дома. При этом им должны быть даны рекомендации о сроках и способе ее проведения

Примечание: * – Йодная профилактика имеет приемлемую эффективность спустя 2–4 ч и может сохраняться до 24 ч после ингаляции радиоактивного йода. Наибольшая эффективность наблюдается в случае приема внутрь йодистого калия (таблетка 0,125 г для взрослых) за 1–2 ч до начала ингаляции

загрязнённых тканей, а при неэффективности иссечения – к ампутации (в случае травмирования дистальных фаланг кистей рук).

В табл. 5 даны уровни загрязнения кожи РВ, при которых следует проводить мероприятия по ограничению распространения (разнеса) радиоактивного загрязнения и принимать решения о необходимости дополнительного дозиметрического обследования пострадавших.

Регламентируемые допустимые уровни (НРБ-99/2009) радиоактивного загрязнения неповрежденных кожных покровов персонала (200 β -част/(см²·мин) для β -активных нуклидов³ и 2 α -част/(см²·мин) для α -активных нуклидов) следует рассматривать в качестве значений загрязнения РВ для аварийных условий, не требующих проведения СО после переодевания.

Заключение

Рекомендуемые значения операционных величин позволяют предварительно и оперативно оценить угрозу для здоровья не только при внешнем (контактном) облучении кожи и подлежащих тканей, но и вследствие поступления РВ растворимых форм в организм через неповрежденную и поврежденную кожу. Учитывая большую степень неопределенности полученных оценок, значения операционных величин следует рассматривать как сугубо консервативные и использовать их только для оценки срочности выпол-

нения СО пострадавших при оказании медицинской помощи в догоспитальный и ранний госпитальный периоды с обязательным проведением дальнейшего дозиметрического обследования для окончательной оценки формируемой дозы.

На основании результатов измерений и сравнения их с рекомендуемыми значениями операционных величин медицинский персонал должен:

- выполнить назначение соответствующих медицинских процедур;
- определить индивидуальные рекомендации по мерам профилактики радиационных поражений и порядок эвакуации на следующий этап оказания медицинской помощи;
- определить порядок санитарно-пропускного режима в палатах (отделениях), где находятся пострадавшие;
- выработать дальнейшую тактику обследования пострадавших с учетом консультаций со специалистами по радиационной безопасности;
- сформулировать предварительный диагноз и подготовить экстренное извещение, особенно в случае вероятности облучения в результате поступления РВ в организм.

Все вышеперечисленные срочные (неотложные) и первоочередные санитарно-гигиенические и медицинские мероприятия должны быть выполнены на соответствующих этапах оказания первичной медико-санитарной помощи пострадавшим в полном объеме и в оптимальные сроки.

³ Для ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y 40 част/(см²·мин)

Operational Values of Radioactive Skin Contamination in the Case of Radiological Accident

M.I. Grachev, Yu.A. Salenko, Yu.V. Abramov, G.P. Frolov, V.N. Klochkov, B.A. Kukhta, I.K. Tesnov

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: Development of recommendations on the use in medical practice of institutions under FMBA of Russia of operational values of radioactive skin contamination in the event of radiological accidents.

Material and methods: The easily measured radiation parameters were used as operational values: ambient dose equivalent rate (ADER) of γ -radiation, density of skin contamination with γ -, β - and α -emitting radionuclides. Operational values of skin contamination were estimated on the basis of experimental data described in the literature and models on the kinetics of radioactive substances transport in the body, accepted values of dose criteria for deterministic and stochastic effects. The estimation of radioactive material resorption through the skin was based on the results of experimental studies in laboratory animals (mainly piglets) for a limited set of chemical compounds of radionuclides.

Results: The values of γ -ADER of the main dose-forming radionuclides measured at a distance of 10 cm from the skin surface in the range of 10–1000 $\mu\text{Sv/h}$ and the possible health effects due to the skin exposure and the intake of radioactive substances into the body were presented. In the IAEA recommendations, the level of skin contamination at 1 $\mu\text{Sv/h}$ is considered as a significant operational value according to the criterion of radioactive substances intake through the mouth from the contaminated surface of the hands. However, in our opinion, this estimate is excessively conservative; therefore it is not included in the recommended operational values. If the skin is contaminated with γ - β -emitting radionuclide solutions at a surface contamination higher than 10^6 Bq/cm^2 ($\text{ADER} \geq 1000 \mu\text{Sv/h}$), the out of turn emergency decontamination should be carried out. Obligatory indications for the whole body counter examination after thorough decontamination and conducting biophysical analysis of bioassay are the following operational values: γ -ADER from the skin $> 10 \mu\text{Sv/h}$; surface contamination of intact skin with β -active radionuclides $> 20\,000 \beta\text{-part./cm}^2\cdot\text{min}$; surface contamination of intact skin with α -active radionuclides $> 200 \alpha\text{-part./cm}^2\cdot\text{min}$.

Conclusion: The recommended operational values allow preliminarily and promptly to assess the health risk not only in the case of external (contact) exposure of the skin and underlying tissues, but also due to the intake of soluble radioactive substances into the body through intact and damaged (injured) skin. Taking into account the high degree of uncertainty of the estimates obtained, the operational values should be considered as strictly conservative. They should be used only to determinate of urgency of decontamination carrying out for the provision of medical care during the prehospital and early hospital periods with the obligatory follow-up dosimetry examination for the final assessment of absorbed dose.

Key words: radiological accident, radiological terrorism, radioactive skin contamination, operational values, decontamination, medical assistance

For citation: Grachev MI, Salenko YuA, Abramov YuV, Frolov GP, Klochkov VN, Kukhta BA, Tesnov IK. Operational Values of Radioactive Skin Contamination in the Case of Radiological Accident. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):20–6. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-20-26

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грачев М.И. и др. Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму. Под ред. Л.А. Ильина. М. 2018. 392 с. [Grachev MI, et al. Medical Aspects of Countering Radiological and Nuclear Terrorism. Moscow. 2018. 392 p. (In Russ.).]
2. The Radiological Accident in Goiania. Vienna: IAEA. 1988. 149 p.
3. Dangerous Quantities of Radioactive Material (D-values). Vienna: IAEA. 2006. 145 p.
4. Ильин Л.А. и др. Радиоактивные вещества и кожа (метаболизм и дезактивация). М.: Атомиздат. 1972. 304 с. [Ilyin LA, et al. Radioactive substances and skin (metabolism and decontamination). Moscow. 1972. 304 p. (In Russ.).]
5. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. Под ред. В.С. Калистратовой. М. 2012. 464 с. [Kalistratova VS, ed. Radiobiology of incorporated radionuclides. Moscow. 2012. 464 p. (In Russ.).]
6. МУ 2.6.5.029–2016. Индивидуальный дозиметрический контроль при раневом поступлении плутония и америция. Общие требования. Методические указания. [MU 2.6.5.029–2016. Individual dosimetric control in the event plutonium and americium enter the wound. General requirements. Guidelines. (In Russ.).]
7. МУ 2.6.1.034–2014. Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241. Методические указания. [MU 2.6.1.034–2014. The procedure for interaction between the enterprises of Rosatom State Corporation and the bodies and organizations of the FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and emergency inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes. Guidelines. (In Russ.).]
8. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Requirements No. GSR Part 7. Vienna: IAEA. 2015. 102 p.
9. General procedures for assessment and response during a radiological emergency. IAEA-TECDOC-1162. Emended version, 2013. Vienna: IAEA. 2000. 183 p.
10. Операционные радиационные и медицинские критерии для введения неотложных мер защиты в случае радиационной аварии на ФГУП «СевРАО». Методические рекомендации. 2008. [Operational radiation and medical criteria for urgent protective measures in the event of a radiation accident at FSUE SevRAO. Guidelines. 2008. (In Russ.).]
11. Петушков В.Н. и др. Хирургические проблемы лечения больных, пострадавших в аварии на ЧАЭС. Ближайшие и отдаленные последствия радиационной аварии на Чернобыльской АЭС. Сб. м-в Всесоюз. симпозиума, 25–26.06.1987. М. 1987. 521–5. [Petushkov VN, et al Surgical problems of treating patients affected by the Chernobyl accident. In: Immediate and long-term consequences of a radiation accident at the Chernobyl NPP: Proceed. of the All-Union Symposium, June 25–26; 1987. М. 1987. 521–5. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 17.09.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.
Article received: 17.09.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

Б.Е. Серебряков**О НЕОБХОДИМОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ НРБ-99/2009 И ОСПОРБ-99/2010**

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

Серебряков Борис Ефимович, bserebr@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Основные санитарные правила (ОСПОРБ-99/2010) и Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) содержат требования по обращению с загрязненными радионуклидами материалами и отходами, но не являющимися радиоактивными веществами (РВ) и радиоактивными отходами (РАО). Целью работы является разработка рекомендаций по коррективке ОСПОРБ-99/2010 и НРБ-99/2009 для обеспечения радиационной безопасности нынешнего и будущих поколений людей при обращении с этими материалами и отходами.

Результаты: Выявлены и обоснованы недостатки НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010, регламентирующие обращение с материалами и отходами, загрязненными радионуклидами, но не являющимися РВ и РАО. Эти положения могут приводить к избыточному облучению нынешнего и будущих поколений людей. Разработаны и обоснованы предложения по коррективке НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010.

Выводы: Сделаны следующие предложения по коррективке НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010:

- в НРБ-99/2009 предложено удалить из пункта 5.3.4 положения, регламентирующие использование материалов для дорожного строительства;
- в ОСПОРБ-99/2010 предложен возврат к ОСПОРБ-99 по установлению нижней границы по суммарной альфа- и бета-активности для отходов и материалов ограниченного использования.

Ключевые слова: радиоактивные загрязнения, отходы, материалы, удельная активность, облучение населения

Для цитирования: Серебряков Б.Е. О необходимости коррективки НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):27–30.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-27-30

Введение

В Основных санитарных правилах (ОСПОРБ-99/2010) [1] выделяются загрязненные радионуклидами твердые материалы и отходы, которые не являются ни радиоактивными веществами (РВ), ни радиоактивными отходами (РАО), но не могут бесконтрольно использоваться или захораниваться. В санитарных правилах [2] в соответствии с мировой практикой для таких отходов использован термин «очень низкоактивные отходы» (ОНАО).

Можно отметить две причины целесообразности выделения материалов ограниченного использования и ОНАО в отдельную группу. Первая причина связана с дорогостоящей системой учета и контроля РВ и РАО. Учет и контроль материалов ограниченного использования и ОНАО можно проводить значительно дешевле и проще, чем РВ и РАО. Второй причиной является тот факт, что на ОНАО не распространяется закон о радиоактивных отходах [3], поэтому предприятия могут сами проводить захоронение ОНАО.

Материалы ограниченного использования (МОИ) и ОНАО имеют верхние и нижние пределы активности, величины которых рассматриваются в данной статье, причем основное внимание уделяется отходам. Нижняя граница активности еще называется уровнем активности для снятия отходов и материалов с радиационного контроля.

Показано, что определяемые в ОСПОРБ-99/2010 уровни активности для снятия материалов и отходов с контроля характеризуются значительной некорректностью, что может приводить к недопустимому облучению населения. Даны предложения по коррективке ОСПОРБ-99/2010 и НРБ-99/2009 для обеспечения радиационной безопасности населения.

Анализ регламентации активности в ОСПОРБ-99/2010

Принятая в ОСПОРБ-99/2010 верхняя граница активности МОИ и ОНАО совпадает с нижней границей активности твердых радиоактивных отходов (ТРО), которая установлена постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 [4].

Согласно этому постановлению, при известном радионуклидном составе к ТРО относятся отходы, в которых активность радионуклида больше минимально значимой удельной активности (МЗУА). Если радионуклидов несколько, то отходы относятся к ТРО, если сумма отношений удельных активностей радионуклидов в отходах к их значениям МЗУА превышает 1. В постановлении [4] величина МЗУА взята из Норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [5].

При неизвестном составе отходы относятся к ТРО, если суммарная альфа-активность больше 1 Бк/г, или суммарная бета активность больше 100 Бк/г.

Кроме того, в постановлении [4] введены «твердые отходы, образующиеся при осуществлении не связанных с использованием атомной энергии видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов». Эти отходы относятся к ТРО, если определенная в НРБ-99/2009 эффективная удельная активность природных радионуклидов в них превышает 10 Бк/г.

Принятая в ОСПОРБ-99/2010 нижняя граница активности искусственных радионуклидов в МОИ и в ОНАО

Нижняя граница активности МОИ и ОНАО имеет большее значение, чем верхняя, т.к. нижняя граница определяет активность, с которой допускается бесконтрольное использование МОИ и бесконтроль-

ное захоронение ОНАО. Согласно ОСПОРБ-99/2010, МОИ могут быть сняты с радиационного контроля, если возможная эффективная доза облучения при их использовании не превысит 10 мкЗв/год. Но использовать каждый раз расчеты дозы практически невозможно, поэтому используются предельные активности радионуклидов.

Для МОИ и ОНАО с искусственными радионуклидами в ОСПОРБ-99/2010 в качестве нижней границы приведены значения активности более чем для 200 радионуклидов в материалах и отходах, соответствующие дозе 10 мкЗв/год. Для смеси радионуклидов полагается, что сумма отношений активностей к пределам не должна превышать 1. Указанные значения заимствованы из руководства по безопасности МАГАТЭ [6] в соответствии с расчетами, выполненными в МАГАТЭ в 2005 г. [7].

Расчеты в [7] выполнены для большого количества вещества (свыше 1 т), исходя из условия непревышения дозы 10 мкЗв/год, и основаны на оценке набора типичных сценариев облучения от всех материалов, включая внешнее облучение, ингаляционное поступление пыли и пероральное поступление (прямое и косвенное).

Но и расчеты верхней границы активности для ОНАО, т.е. упоминавшейся выше величины МЗУА, также выполнены, исходя из условия непревышения дозы 10 мкЗв/год, расчеты проведены в Евратоме в 1993 году, они представлены в [8]. Эти расчеты значительно сложнее, чем в [7]: учитывалось 24 пути облучения персонала и населения. Рассматривались жидкие, твердые и газообразные вещества, разброс массы источника превышал 13 порядков: от $6,15 \cdot 10^{-4}$ г для ампулы с радиоактивным инертным газом, до $1,5 \cdot 10^4$ т для очень низкоактивных отходов.

Получается, что верхняя и нижняя границы МОИ и ОНАО рассчитаны, исходя из одного и того же условия, поэтому имеется парадокс: для 117 радионуклидов нижняя граница равна верхней, что составляет около 42 % общего количества радионуклидов, для которых установлена МЗУА. Примером этого являются: ^{18}F (10 Бк/г), ^{32}P (1000 Бк/г), ^{51}Mn (10 Бк/г), ^{64}Cu (100 Бк/г) и т.д. Естественно, такая классификация не является корректной.

В 2000 г. Евратом повторил расчеты для материалов и отходов в большом количестве [9]. В расчетах Евратома [8, 9] нет различий между искусственными и природными радионуклидами, это отличает их от расчетов МАГАТЭ [7].

Евратом примерно через 10 лет после выполнения своих расчетов [9] и через 5 лет после расчетов МАГАТЭ [7] сравнил свои расчеты с расчетами МАГАТЭ, результаты сравнения приведены в [10]. В результате сравнения было получено, что в целом значения активности в расчетах Евратома, как правило, меньше, чем в расчетах МАГАТЭ. Отношение активности радионуклидов, рассчитанной МАГАТЭ, к активности, рассчитанной Евратомом, изменяется от 0,1 до 100.

Основной причиной расхождения результатов является использование разных сценариев облучения населения.

Можно сделать вывод, что использовать подходы как МАГАТЭ, так и Евратома для установления нижней границы активности ОНАО нецелесообразно из-за очень большой неоднозначности полученных результатов. Существенным недостатком такого использования также является необходимость измерения активности большого числа радионуклидов, что значительно увеличивает стоимость и усложняет разделение материалов и отходов по радиационному признаку.

Таким образом, можно сделать вывод, что требования ОСПОРБ-99/2010 по снятию с контроля материалов и отходов, загрязненных искусственными радионуклидами, не годятся для практического использования и должны быть переработаны.

Нижняя граница активности природных радионуклидов в материалах ограниченного использования

Для природных радионуклидов в ОСПОРБ-99/2010 при снятии с контроля МОИ и ОНАО установлены разные требования. Согласно п. 5.1.16: «Использование в коммунальных условиях и быту материалов и изделий, для которых в НРБ-99/2009 и настоящих Правилах не установлены прямые нормативы на содержание природных радионуклидов, допускается, если при использовании их по назначению эффективная доза облучения населения не превысит 0,1 мЗв/год».

Устанавливать предел дозы, а не активности нецелесообразно вследствие того, что для каждой партии или объема МОИ нужно отдельно рассчитывать возможную дозу облучения. Это требование ОСПОРБ-99/2010 должно быть переработано, и должна быть установлена конкретная величина активности МОИ для снятия их с радиационного контроля.

Нижняя граница активности природных радионуклидов в очень низкоактивных отходах

Для снятия с радиационного контроля отходов и некоторых материалов в ОСПОРБ-99/2010 используется т.н. эффективная удельная активность природных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$), которая согласно НРБ-99/2009 [5] определяется следующим образом:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Th}} + 0,09A_{\text{K}},$$

где A_{Ra} и A_{Th} – удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, A_{K} – удельная активность ^{40}K (Бк/кг).

Отнесение отходов к ОНАО в ОСПОРБ-99/2010 производится в соответствии с п. 5.2.9:

«Производственные отходы с эффективной удельной активностью природных радионуклидов до 1500 Бк/кг могут направляться для захоронения в места захоронения промышленных отходов без ограничений по радиационному фактору».

Нижний предел эффективной удельной активности 1500 Бк/кг принят в соответствии с НРБ-99/2009. В НРБ-99/2009 имеется пункт 5.3.4, записанный следующим образом:

«Эффективная удельная активность ($A_{\text{эфф}}$) природных радионуклидов в строительных материалах (щебень, гравий, песок, бутовый и пиленный камень, цементное и кирпичное сырье и пр.), добываемых на их месторождениях или являющихся побочным продуктом промышленности, а также отходы промышленного производства, используемые для изготовления строительных материалов (золы, шлаки и пр.), и готовой продукции не должна превышать: <...>

– для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс) 1500 Бк/кг».

Эффективная удельная активность позволяет контролировать только внешнее облучение человека от природных радионуклидов в материалах, используемых для строительства дорог. Эти материалы останутся на месте, когда дороги уже не будет, а территория будет использоваться по другому назначению, в т.ч. для проживания. Максимальный вклад в фоновое облучение при проживании на месте бывшей дороги тогда будет обусловлен поступлением радона в жилище.

Согласно сайту НИИРГ им. П.В. Рамзаева [11], средняя доза облучения населения за счет радона в жилище в России составляет около 2,4 мЗв/год при диапазоне значений от 0,4 до 30 мЗв/год. Содержание радона в жилище прямо пропорционально активности ^{226}Ra в грунтах в почвах при одинаковых конструкциях домов. Согласно [7], содержание ^{226}Ra в грунтах России изменяется от 1 до 76 Бк/кг, а средняя эффективная удельная активность составляет 27 Бк/кг. Получается, что коэффициент пересчета активности ^{226}Ra в материалах и отходах в годовую дозу облучения от радона в среднем равен примерно 0,089 (мЗв/год)/(Бк/кг), эту величину можно округлить до 0,1 (мЗв/год)/(Бк/кг).

В отходах уранодобывающей промышленности основной вклад в эффективную удельную активность вносит ^{226}Ra . Активность ^{232}Th и ^{40}K в этих отходах примерно соответствует средним значениям, и согласно [7] эти радионуклиды дают вклад в эффективную активность не более 100 Бк/кг. Поэтому при эффективной удельной активности дорожного материала 1500 Бк/кг активность ^{226}Ra составит примерно 1400 Бк/кг.

Используя полученный выше коэффициент пересчета активности ^{226}Ra в дозу облучения, получаем, что облучение населения от радона может составить до 140 мЗв/год. Полученное значение характеризует максимально возможную дозу. Тем не менее, можно сделать вывод, что при бесконтрольном распространении отходов, содержащих радиоизотопы радия, облучение населения может значительно превысить предел дозы 1 мЗв/год.

На основании полученных результатов следует признать недопустимым установление предела 1500 Бк/кг для эффективной удельной активности при захоронении промышленных отходов без ограничений по радиационному фактору.

Можно сделать вывод, что в первую очередь следует выполнить корректировку Норм радиационной безопасности НРБ-99/2009: удалить из пункта 5.3.4 положения, регламентирующие использование материалов для дорожного строительства.

Рекомендации по корректировке Основных санитарных правил ОСПОРБ-99/2010

Выше было показано, что требования ОСПОРБ-99/2010 по снятию с контроля материалов и отходов, загрязненных как искусственными, так и природными радионуклидами, не годятся для практического использования и должны быть переработаны.

Материалы и отходы, загрязненные радионуклидами, но не являющимися РВ и РАО, впервые были введены в Основных санитарных правилах ОСПОРБ-99 [12]. В этих Правилах для нижней границы снятия с радиационного контроля материалов и отходов были использованы величины суммарной альфа- и бета-активности. Для суммарной альфа-активности и для суммарной бета-активности были установлены одинаковые пределы 300 Бк/кг.

Примерно такие же суммарные альфа- и бета-активности являются фоновыми значениями активности в почвах и в донных отложениях для природных радионуклидов вместе с искусственными ^{90}Sr и ^{137}Cs , которые связаны с глобальными выпадениями. Эти же фоновые пределы активности для ОНАО установлены в действующих санитарных правилах [2], т.к. во время утверждения этих правил действовали ОСПОРБ-99. Подобный подход существует в США, где у низкоактивных ТРО нет нижней границы активности, отходы считаются РАО, если активность радионуклидов превышает фоновые значения, или такое превышение предполагается.

Следует признать, что существовавшие в России в 1999–2010 гг. нижние пределы активности для снятия с контроля МОИ и ОНАО надежно обеспечивали радиационную безопасность населения, кроме того, измерение суммарной альфа и бета-активности не вызвало особых проблем. Поэтому можно рекомендовать для нижнего предела ОНАО и МОИ суммарную альфа-активность и суммарную бета-активность по 300 Бк/кг.

Пределы суммарной бета-активности, равные 300 Бк/кг, в некоторых случаях оказывались излишне консервативными, поэтому в ОСПОРБ-99 допускалось в этих случаях увеличение суммарной бета-активности по согласованию с федеральным органом Госсанэпиднадзора. Эту возможность следует оставить при корректировке ОСПОРБ-99/2010.

Выводы

1. Использование в ОСПОРБ-99/2010 расчетов МАГАТЭ и/или Евратома для установления нижней границы активности искусственных радионуклидов при снятии с контроля ОНАО и материалов ограниченного использования нецелесообразно из-за очень большой неоднозначности этих расчетов, связанной со сценариями, используемыми для расчетов. Для большого количества радионуклидов ограничивается практическое использование подобных расчетов.

2. Для снятия с контроля ОНАО, загрязненных природными радионуклидами, в ОСПОРБ-99/2010 используется предел эффективной удельной активности 1500 Бк/кг, взятый из НРБ-99/2009, где этот предел установлен для ограничения активности ма-

териалов дорожного строительства вне населенных пунктов. Показано, что использование этого предела может приводить к недопустимому облучению населения, главным образом, из-за поступления радона в жилища.

3. Обоснована рекомендация о корректировке Норм радиационной безопасности НРБ-99/2009: предложено удалить из пункта 5.3.4 положения, регламентирующие использование материалов для дорожного строительства.

4. Оптимальным и разумным предложением является возврат к регламентации в ОСПОРБ-99, где для ОНАО и МОИ были установлены нижние пределы активности суммарной альфа-активности и суммарной бета-активности по 300 Бк/кг. В ОСПОРБ-99 допускалось в некоторых случаях увеличение суммарной бета-активности при согласовании с федеральным органом Госсанэпиднадзора, эту возможность следует оставить при корректировке ОСПОРБ-99/2000.

About of the Necessary of Corrections of the NRB-99/2009 and OSPORB-99/2010

B.E. Serebryakov

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: The Basic Sanitary Rules (OSPORB-99/2010) and the Standards of Radiation Safety (NRB-99/2009) contain requirements on the treatment of radionuclide contaminated materials and waste, but non-radioactive substances and radioactive waste. The aim of this work is to develop recommendations for adjustment of OSPORB-99/2010 and NRB-99/2009 for radiation safety of current and future generations of people.

Results: Identified and justified by the shortcomings of NRB-99/2009 and OSPORB-99/2010 governing the treatment of materials and waste contaminated by radionuclides, but non-radioactive substances and radioactive waste, which can lead to overexposure of present and future generations of people. Developed and justified proposals for adjustments to NRB-99/2009 and OSPORB-99/2010.

Conclusions: It was proposed adjustment of NRB-99/2009 and OSPORB-99-2010:

- in NRB-99/2009 it was proposed to delete from paragraph 5.3.4 the provisions regulating the use of materials for road construction;
- in OSPORB-99/2010 the return to OSPORB-99 on establishment of the lower border of wastes and materials of limited use on total alpha and beta-activity is offered.

Key words: radionuclide contamination, materials, wastes, specific activity, public exposure

For citation: Serebryakov BE. About of the Necessary of Corrections of the NRB-99/2009 and OSPORB-99/2010. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):27–30. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-27-30

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [SP 2.6.1.2612-10 Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010). (In Russ.).]
2. СП 2.6.6.2572-2010. «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащими техногенные радионуклиды». [SP 2.6.6.2572-2010. Radiation Safety in Management of Industrial Wastes of Nuclear Stations, Containing Man-made Radionuclides]. (In Russ.).]
3. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». [Federal Law of July 11, 2011 No. 190-FZ «On Management of Radioactive Wastes and Amending of Particular Legislative Acts of the Russian Federation» (In Russ.).]
4. Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». [Order of the Government of the Russian Federation of 19.10.2012 № 1069 “About Criteria of Reference of Solid, Liquid and Gaseous Wastes to Radioactive Waste, Criteria of Reference of Radioactive Waste to Special Radioactive Waste and to the Removed Radioactive Waste and Criteria of Classification of the Removed Radioactive Waste”. (In Russ.).]
5. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. [SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). (In Russ.).]
6. Серия норм по безопасности, № RS-G-1.7. Применение концепции исключения, изъятия и освобождение от контроля. МАГАТЭ, Вена, 2006. [Safety series, no. RS-G-1.7. Application of the concept of exclusion, exemption and exemption from control. IAEA, Vienna, 2006. (In Russ.).]
7. Derivation of activity concentration values for exclusion, exemption and clearance. IAEA, Vienna, 2005.
8. Radiation Protection 65. Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption values) Below which Reporting is not Required in the European Directives. Commission of the European Communities, 1993.
9. Radiation Protection 122. Practical Use of the Concepts for Clearance and Exemption – Part I. Guidance on General Clearance Levels for Practices. European Commission, 2000.
10. Radiation Protection 157. Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels Directorate-General for Energy. European Commission, 2010.
11. Federal Budget Scientific Institution “P.V.Ramzaev St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene”. Natural radiation. <http://www.niirg.ru/NatExp.htm>
12. СП 2.6.1.799-99. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). [SP 2.6.1.799-99. Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99). (In Russ.).]

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.

Поступила: 05.02.2018. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 05.02.2018. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

А.М. Лягинская, Н.К. Шандала, С.М. Киселев, А.П. Ермалицкий, Д.В. Исаев, В.В. Купцов

СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ НАСЕЛЕНИЯ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СУДОРЕМОНТНОГО ЗАВОДА «НЕРПА», ОСУЩЕСТВЛЯЮЩЕГО РАБОТЫ ПО УТИЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТА ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ – ПЛАВУЧЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ БАЗЫ «ЛЕПСЕ»

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Исаев Дмитрий Викторович, strategik@bk.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Оценка состояния здоровья населения Снежногорска, расположенного вблизи судоремонтного завода (СРЗ «Нерпа»), осуществляющего утилизацию плавучей технической базы «Лепсе» (ПТБ «Лепсе»).

Материал и методы: В качестве показателей здоровья населения оценивали заболеваемость взрослого и детского населения, детскую инвалидность, репродуктивное здоровье по показателям состояния беременных женщин и новорожденных детей, смертность. Оценивали среднегодовые значения внешнего радиационного фона, содержание в почве и воде техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr и естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{223}Th , ^{40}K и ^{235}U .

Результаты: Уровень здоровья населения Снежногорска, оцениваемый по показателям заболеваемости и состоянию репродуктивного здоровья ниже аналогичных показателей по стране в целом: выше заболеваемость взрослого ($667,7 \pm 4,2$ и $454,2 \pm 19,8$ на 1 тыс. жителей соответственно) и детского ($3336,2$ и $2052,3 \pm 194,4$ на 1 тыс. чел. соответственно) населения; выше частота неблагоприятных исходов беременности (мертворождения, ранняя неонатальная гибель плода, самопроизвольные аборты) – $86,2 \pm 18,4$ и $46,6$ на 1000 соответственно.

Выводы: Основными причинами негативного влияния на здоровье населения Снежногорска являются климато-географические условия Кольского Заполярья и наличие средне-лёгкой степени йодного дефицита (зобной эндемии).

Ключевые слова: население, Снежногорск, СЗЦ «СевРАО», дозы облучения, заболеваемость, репродуктивное здоровье, смертность

Для цитирования: Лягинская А.М., Шандала Н.К., Киселев С.М., Ермалицкий А.П., Исаев Д.В., Купцов В.В. Состояние здоровья населения в районе расположения судоремонтного завода «Нерпа», осуществляющего работы по утилизации объекта ядерного наследия – плавучей технической базы «Лепсе». Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):31-9.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-31-39

Введение

Защита населения, проживающего в районе расположения радиационноопасных объектов, определяется Федеральным законом РФ «О радиационной защите населения» 1996 г. № 3-ФЗ [1] и Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [2].

Город Снежногорск с численностью населения 12 638 человек (по данным на 2019 г.), в том числе детей 0–14 лет – 3072 человека, расположен в регионе Кольского Заполярья в 80 км от г. Мурманска и в 2 км от СРЗ «Нерпа». СРЗ «Нерпа» – филиал АО «Центр судоремонта “Звездочка”» относится к организациям, эксплуатирующим особо радиационно-опасные и ядерно-опасные производства и объекты. В соответствии с проектными данными, для СРЗ «Нерпа» установлена I категория потенциальной радиационной опасности в соответствии с требованиями ОСПОРБ-99/2010.

В настоящее время на предприятии реализуется масштабный проект по утилизации ПТБ «Лепсе», использовавшейся в советское время для временного хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ), извлекаемого из реакторов атомных ледоколов. Настоящая деятельность сопряжена с проведением радиационно-опасных работ, включающих обращение с ОЯТ и радиоактивными отходами (РАО). Категория радиационной опасности ПТБ «Лепсе» установлена как объект II категории потенциальной радиационной опасности. Основными источниками ионизирующего излучения (ИИИ) на ПТБ «Лепсе» являются ОЯТ и РАО. Радионуклидный состав ИИИ представлен в основном ^{137}Cs , ^{90}Sr .

Особенности утилизации объектов ядерного наследия не исключают потенциальную возможность облучения населения и загрязнения окружающей среды при проведении технологических операций по резке, выемке и транспортировке радиоактивных отходов. Экологические проблемы в регионе связаны не только с «наследием» деятельности Северного военного морского флота, но и с неблагоприятными климато-географическими условиями Кольского заполярья, а также йодным дефицитом – зобной эндемией.

Целью настоящей работы явилась оценка состояния здоровья населения Снежногорска, расположенного в зоне влияния СРЗ «Нерпа», осуществляющего утилизацию ПТБ «Лепсе».

Материал и методы

На объектах и территориях, обслуживаемых учреждениями здравоохранения ФМБА России, контроль состояния окружающей среды и здоровья населения определяется специально разработанными документами – МУ «Мониторинг состояния окружающей среды на этапах жизненного цикла АЭС» и МУ «Экспертные и прогнозные оценки состояния здоровья населения в районах размещения атомных станций» [3, 4]. Основными показателями популяционного здоровья населения являются заболеваемость, смертность и репродуктивное здоровье.

Для получения необходимых оценок показателей здоровья населения использованы данные отчётной медицинской статистики – отчётные формы:

Ф.№ 12 – сведения о числе заболеваний, зарегистрированных у пациентов, проживающих в районе

обслуживания медицинской организации взрослого населения (18 и более лет), детей 0–14 лет, детей первого года жизни, хроническая заболеваемость детей 0–14 лет;

Ф.№ 19 – сведения о детях-инвалидах;

Ф.№ 30 – сведения о медицинской организации. Сведения об умерших;

Ф.№ 32 – сведения о медицинской помощи беременным, роженицам и родильницам.

В разработку вошли данные медицинских отчетных форм и демографические сведения за 2014–2016 гг. из МСЧ № 120 по отделению г. Снежногорска.

Для оценки состояния окружающей среды в исследуемом районе и её влияния на население специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России совместно с территориальными органами ФМБА России были проведены радиационно-гигиенические исследования. В ходе исследований применялись методы дозиметрического контроля на местности с использованием портативных спектрометрических установки МКС-01А «Мультирад-М» и МКС-АТ6101С (производства НТЦ «Амплитуда», Россия и УП «Атомтех», Белоруссия соответственно). Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения МКС-01А «Мультирад-М» с блоком детектирования БДКС-63-01А варьируется от 0,04 до 3 МэВ, диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения составляет от 0,03 до 60 мкЗв/ч. Предел допустимой основной относительной погрешности измерений МАЭД находится в диапазоне от 0,03 до 0,05 мкЗв/ч, составляя 25 %, а в диапазоне от 0,5 до 60 мкЗв/ч определяется по формуле $\pm (25 \% - 0,167N^{*}(10))$, где $N^{*}(10)$ – измеренное значение МАЭД в мкЗв/ч. Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения спектрометра МКС-АТ6101С с блоком детектирования БДКГ-11М составляет от 0,02 до 3 МэВ, диапазон измерений мощности амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения варьируется от 0,03 до 150 мкЗв/ч. Предел допустимой основной относительной погрешности измерений в диапазоне от 0,01 до 150 мкЗв/ч составляет 20 %. Для оценки содержания техногенных радионуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr) в объектах окружающей среды применяли радиохимические методы анализа.

Статистическая обработка сведений проводилась с помощью стандартных методов, принятых при анализе медико-биологических данных. Для всех показателей рассчитывалась средняя величина в год, неопределенность среднего показателя и достоверность различий по группам с применением критерия t Стьюдента, при уровне значимости $p < 0,05$ [5].

Результаты

Характеристика радиационно-гигиенического состояния окружающей среды

Среднегодовые значения радиационного фона в г. Снежногорске не превышают 0,12 мкЗв/ч. В табл. 1 представлен диапазон значений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД ГИ) в сравнении с фоновыми и региональными значениями.

Таблица 1

Характеристики распределения величин МАЭД ГИ, полученных в 2017 г.

Characteristics of the distribution of γ -AEDR values obtained in 2017

Территория	Кол-во измерений	Значения МАЭД ГИ мкЗв/ч	
		максимум	медиана
Окрестности СЗР «Нерпа»	18730	0,23	0,06
Жилая часть Снежногорска	8500	0,22	0,08
Значения по региону	–	0,23	0,11

Основными дозообразующими радионуклидами являются ^{137}Cs и ^{90}Sr . Содержание техногенных радионуклидов в почве варьирует от 0,1 до 14 Бк/кг по ^{137}Cs , и от 0,2 до 1,7 Бк/кг по ^{90}Sr . Содержание ^{90}Sr в ягодах не превышает 4 Бк/кг (от 0,5 до 1 Бк/кг), ^{137}Cs – от 2 до 40 Бк/кг.

Значения удельной активности радионуклидов соответствуют фоновым значениям для региона, обусловленными глобальными выпадениями. Содержание естественных радионуклидов также соответствует фоновым показателям для данного региона: ^{226}Ra – 8,0 Бк/кг, ^{232}Th – 13 Бк/кг, ^{40}K – 350 Бк/кг, ^{235}U – 2,0 Бк/кг.

Таким образом, радиационная обстановка в г. Снежногорске и его окрестностях сформирована за счёт естественного фона и глобальных выпадений.

Дозы облучения критической группы населения от техногенных радионуклидов не превышают 3,6 мкЗв/год. Около 60 % дозы внутреннего облучения обусловлено потреблением дикорастущих ягод, грибов и любительского лова рыбы в пресных озёрах региона [6].

Заболеваемость взрослого населения

Заболеваемость взрослого населения (взрослые 18 лет и более) Снежногорска не имела выраженных колебаний по годам и составляла в среднем $667,7 \pm 4,2$ случаев на 1 тыс. чел. населения города. Данные приведены в табл. 2

В структуре заболеваемости первое место занимали болезни органов дыхания с частотой $159,6 \pm 3,3$ на 1000, составляя 23,9 % всей заболеваемости. Второе место (13,9 %) – болезни мочеполовой системы с частотой $93,0 \pm 2,6$ на 1000. Третье место (10,9 %) – травмы и отравления с частотой $73,0 \pm 2,34$ на 1000. Четвертое место – (8,3 %) болезни костно-мышечной системы с частотой $55,7 \pm 2,1$ на 1000. Пятое место – (5,1 %) – болезни кожи и подкожной клетчатки с частотой $33,9 \pm 1,6$ на 1000. Таким образом, пять ведущих классов болезней составляли 62,1 % всей заболеваемости взрослого населения (рис. 1), что соответствует структуре заболеваемости взрослого населения страны [7].

Заболеваемость злокачественными новообразованиями составляла $3,2 \pm 0,7$ на 1000 чел., что не превышает популяционные оценки по стране (4,0 на 1000 чел.) [7].

В целом, заболеваемость взрослого населения Снежногорска ($667,7 \pm 4,2$ на 1000 чел.) достоверно пре-

Таблица 2

Заболеваемость взрослого населения Снежногорска в 2014–2016 гг.
The morbidity of the adult population of Snezhnogorsk in 2014–2016

Заболевания по классам, МКБ-10	Годы			Среднее	
	2014	2015	2016	М	± m
Всего человек	12319	12319	12311	12316,0	2,7
Зарегистрировано заболеваний – всего	8286	7949	8431	8222,0	142,7
Заболеваний на 1000 чел. – всего, в том числе	672,6	645,6	684,8	667,7	4,2
некоторые инфекционные и паразитарные болезни	13,8	15,2	11,1	13,3	1,0
новообразования, в том числе	15,7	15,8	17,6	16,3	1,1
злокачественные	3,9	2,9	2,8	3,2	0,7
болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм	25,3	20,5	10,4	18,7	1,2
болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ	25,5	20,1	21,7	22,4	1,3
психические расстройства и расстройства поведения	11,6	3,4	3,7	6,3	0,7
болезни нервной системы	18,1	23,9	22,0	21,3	1,3
болезни глаза и его придаточного аппарата	26,5	25,4	10,3	20,7	1,3
болезни уха и сосцевидного отростка	29,8	35,1	33,1	32,7	1,6
болезни системы кровообращения	36,6	22,5	31,0	30,0	1,5
болезни органов дыхания	140,3	150,7	187,9	159,6	3,3
болезни органов пищеварения	24,4	16,6	29,8	23,6	1,4
болезни кожи и подкожной клетчатки	34,1	31,5	36,2	33,9	1,6
болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани	60,5	54,3	52,4	55,7	2,1
болезни мочеполовой системы	94,1	90,7	94,3	93,0	2,6
симптомы, признаки и отклонения от нормы, выявленные при клинических и лабораторных исследованиях, не классифицированные в других рубриках	10,1	9,6	9,1	9,6	0,9
травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин	66,9	70,9	81,2	73,0	2,3

вышает среднестатистические показатели заболеваемости по стране в целом (563,1 на 1000 чел.) [7].

В структуре заболеваемости обращает внимание несколько превышающие популяционные оценки заболеваемости эндокринной системы, органов дыхания, органов пищеварения, мочеполовой системы и костно-мышечной системы, но без тенденции их роста [7].

Заболеваемость детей в возрасте 0–14 лет

Заболеваемость детей (0–14 лет включительно) в г. Снежногорске в 2014–2016 гг. составляла в среднем 3336,2 на 1000 чел. и не имела выраженных колебаний по годам (табл. 3).

В структуре заболеваний ведущее место занимали болезни органов дыхания – 2087,5 на 1000 детей, составляя 62,6 % всей заболеваемости. Болезни костно-мышечной системы с частотой $153,6 \pm 6,6$ на 1000 детей составляли 4,6 % и болезни органов пищеварения с частотой $136,5 \pm 6,3$ на 1000 детей составляли 4,1 %. Эти три ведущие класса болезней составляли 71,3 % всей заболеваемости.

Заболеваемость злокачественными новообразованиями составила $5,2 \pm 3,9$ на 1000 детей, врожденные патологии регистрировались с частотой $11,0 \pm 1,9$ на 1000 детей.

В целом, заболеваемости детей в г. Снежногорске в 2012–2016 гг. была выше среднестатистических данных за аналогичный период по стране (3336,3 и 3061,0

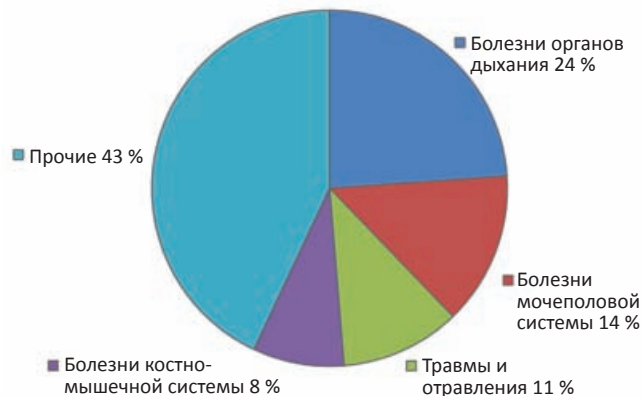


Рис. 1. Структура заболеваемости взрослого населения Снежногорска в 2014–2016 гг.

Fig. 1. Structure of morbidity of adult population of Snezhnogorsk in 2014–2016

на 1000 детей соответственно). Более высокая частота заболеваемости, в основном, обусловлена заболеваемостью нервной системы ($115,9 \pm 5,8$ и $43,8 \pm 13,1$ на 1000), эндокринной системы ($41,6 \pm 3,6$ и $21,0 \pm 3,2$ на 1000), болезнями глаз ($91,9 \pm 5,3$ и $31,1 \pm 2,2$ на 1000), болезнями уха ($111,0 \pm 5,7$ и $37,5 \pm 12,9$ на 1000), органов дыхания (2087,5 и 1318,9 на 1000), костно-мышечной системы ($153,6 \pm 6,8$ и $21,9 \pm 8,1$ на 1000) и мочеполовой системы ($80,0 \pm 4,9$ и $46,1 \pm 2,7$ на 1000) [7]. Особое внимание заслуживает относительно высокая, хотя и статистически недостоверная, частота злокачественных

Таблица 3

Заболеваемость детей в возрасте 0–14 лет в Снежногорске в 2014–2016 гг.**Morbidity of children aged 0–14 years in Snezhnogorsk in 2014–2016**

Заболевания по классам	Годы			Среднее	
	2014	2015	2016	М	± m
Всего детей	2930	3028	3072	3010,0	42,0
Всего заболеваний	10145	10564	9417	10042,0	335,1
Заболеваний на 1000 детей – всего, в том числе	3462,5	3488,8	3065,4	3338,9	137,0
некоторые инфекционные и паразитарные болезни	68,9	77,6	80,4	75,7	4,8
новообразования	7,2	5,6	2,9	5,2	1,3
болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм	17,4	33,4	9,1	19,9	2,6
болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ	4,4	110,0	9,8	41,6	3,6
психические расстройства и расстройства поведения	13,7	0,3	7,2	7,0	1,5
болезни нервной системы	170,7	145,3	34,8	115,9	5,8
болезни глаза и его придаточного аппарата	147,1	102,7	28,7	91,9	5,3
болезни уха и сосцевидного отростка	121,8	88,5	122,7	111,0	5,7
болезни системы кровообращения	6,5	11,6	3,3	7,1	1,5
болезни органов дыхания	2055,3	1991,4	2213,0	2086,5	65,9
болезни органов пищеварения	146,1	155,2	109,1	136,5	6,3
болезни кожи и подкожной клетчатки	120,1	130,1	98,0	115,9	5,8
болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани	248,1	119,9	96,7	153,6	6,8
болезни мочеполовой системы	85,0	115,3	40,4	80,0	4,9
отдельные состояния, возникающие в перинатальном периоде	55,3	54,8	33,2	47,6	3,9
врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения	4,1	18,2	10,4	11,0	1,9
симптомы, признаки и отклонения от нормы, выявленные при клинических и лабораторных исследованиях, не классифицированные в других рубриках	64,2	194,8	46,9	102,1	5,5
травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин	126,6	134,1	119,1	126,6	6,1

новообразований у детей $5,2 \pm 3,9$ на 1000, по РФ – 0,4 на 1000 детей [8].

Заболеваемость детей первого года жизни

Заболеваемость детей первого года жизни в г. Снежногорске в 2014–2016 гг. составляла 4323,5 на 1000 и не имела выраженных изменений в период трёхлетнего наблюдения (табл. 4).

В структуре заболеваемости первое место занимали болезни органов дыхания с частотой $1393,3 \pm 73,3$ на 1000 детей, составляющие 33,5 % от всех болезней. Второе место с частотой $989,7 \pm 6,3$ на 1000 занимали болезни нервной системы, составляющие 23,8 % всей заболеваемости, и третье место с частотой $641,4 \pm 29,8$ на 1000 занимали отдельные состояния, возникающие в перинатальном периоде, составляющие 15,4 % всей заболеваемости детей. Три первых класса заболеваний составляли 72,8 % всей заболеваемости.

Врождённые пороки развития (ВПР) регистрировались с частотой $91,3 \pm 17,9$ на 1000, что значительно превышает средние показатели в стране в целом – 34,5 на 1000 [7].

По данным, приводимым Росстатом, уровень врождённых аномалий (пороков развития), деформаций и хромосомных нарушений, составил: 76,6; 73,9 и

86,3 на 1000 детей соответственно в 2014, 2015 и 2016 гг. [8], в среднем 78,9 на 1000 детей.

Обращает на себя внимание относительно высокая частота заболеваемости нервной системы (989,7 на 1000 детей) и крови и кроветворных органов ($109,3 \pm 19,4$ на 1000 детей), что также превышает популяционные оценки по стране [7].

По данным Росстата, уровень заболеваемости детей первого года жизни болезнями нервной системы составил 221,1; 223,0 и 248,9 на 1000 детей соответственно в 2014, 2015 и 2016 гг. [8].

Также можно отметить относительно высокую частоту отдельных состояний, возникающих в перинатальном периоде ($641,4 \pm 29,8$ на 1000 детей), в стране в целом соответствующие показатели составили 313,5; 293,1 и 290,0 на 1000 детей соответственно в 2014, 2015 и 2016 гг. [8].

Таким образом, младенческая заболеваемость в г. Снежногорске в 2014–2016 гг. имеет относительно высокий уровень ($4156,8 \pm 308,2$ на 1000), значительно превышающий показатели по стране (2537,4; 2492,8 и 2728,9 на 1000 детей соответственно в 2014, 2015 и 2016 гг. [8]).

В структуре заболеваний обращает на себя внимание высокая частота заболеваний нервной системы,

Таблица 4

Заболеваемость детей первого года жизни в г.Снежногорске в 2014–2016 гг.**Morbidity of children of the first year of life in Snezhnogorsk in 2014–2016**

Заболевания по классам	Годы			Среднее	
	2014	2015	2016	М	± m
Всего детей	261	262	255	259,0	2,2
Всего заболеваний	1233	1066	935	1078,0	196,5
Заболеваний на 1000 детей – всего, в том числе	4724,1	4068,7	3666,7	4156,8	308,2
некоторые инфекционные и паразитарные болезни	26,8	72,5	51,0	50,1	13,6
новообразования	46,0	26,7	11,8	28,3	10,3
болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм	103,4	179,4	43,1	109,3	19,4
болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ	57,5	110,7	23,5	64,3	15,2
болезни нервной системы	1540,2	702,3	721,6	989,7	6,3
болезни глаза и его придаточного аппарата	103,4	49,6	62,7	72,0	16,0
болезни уха и сосцевидного отростка	34,5	42,0	54,9	43,7	12,7
болезни органов дыхания, в том числе	1482,8	1259,5	1439,2	1393,3	73,3
острые респираторные инфекции верхних дыхательных путей	1459,8	1213,7	1439,2	1368,9	72,7
болезни органов пищеварения	241,4	419,9	274,5	312,3	28,8
болезни кожи и подкожной клетчатки	160,9	225,2	121,6	169,7	23,3
болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани	15,3	22,9	3,9	14,1	7,3
болезни мочеполовой системы	111,1	171,8	54,9	113,1	19,7
отдельные состояния, возникающие в перинатальном периоде	620,7	633,6	670,6	641,4	29,8
врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения	99,6	72,5	102,0	91,3	17,9
симптомы, признаки и отклонения от нормы, выявленные при клинических и лабораторных исследованиях, не классифицированные в других рубриках	49,8	80,2	15,7	48,8	13,4
травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин	30,7	–	15,7	15,4	7,7

крови и органов кроветворения, эндокринной системы и ВПР.

Хроническая заболеваемость детей (0–14 лет включительно)

В 2014–2016 гг. хроническая заболеваемость детей с впервые установленным диагнозом в возрасте 0–14 лет включительно составила $29,0 \pm 8,4$ на 1000 или была выявлена у 2,9 % детей. В структуре хронической заболеваемости ведущее место занимали болезни крови – 18,5 % с частотой $5,4 \pm 4,2$ на 1000, болезни мочеполовой системы – 17,5 % с частотой $5,1 \pm 4,1$ на 1000, болезни органов дыхания – 14,0 % с частотой $4,1 \pm 3,7$ на 1000 и болезни эндокринной системы – 13,4 % с частотой $3,9 \pm 3,6$ на 1000. Четыре ведущих класса болезней составляли 63,4 % всей хронической заболеваемости. (рис. 2).

Детская инвалидность

В г. Снежногорске в 2014–2016 гг. детская инвалидность составляла $11,0 \pm 1,8$ на 1000. Распределение детей-инвалидов по возрасту выявляет следующее: наибольшее число детей-инвалидов находится в возрасте 10–14 лет (41,3 %), на втором месте – дети 5–9 лет (21,8 %) и на третьем–четвертом месте – дети 0–4 лет и 15–17 лет с одинаковой частотой (18,4 %).

По данным национального НИИ общественного здоровья, основными причинами детской инвалидности являются хронические заболевания, обусловли-



Рис. 2. Структура хронической заболеваемости детей в г. Снежногорске в 2014–2016 гг.

Fig. 2. Structure of chronic morbidity of children in Snezhnogorsk in 2014–2016

вающие 80–90 % всех случаев, ВПР – 10–17 % случаев, травмы и отравления – 1,5–3,0 % всех случаев детской инвалидности [9].

В г. Снежногорске распределение причин детской инвалидности было следующим: хронические заболевания с частотой $7,3 \pm 0,9$ на 1000 детей занимали 67,6 % всей инвалидности, второе место занимали ВПР с частотой $3,4 \pm 1,4$ на 1000 детей, составляя 30,8 %, травмы и отравления занимали третье место с частотой 0,3 на 1000 детей, составляя 2,6 %. Такое распределение инвалидности по причинам в г. Снежногорске несколько

отличается от популяционной оценки детской инвалидности, а именно – выше была доля инвалидности от ВПР (30,8 % и 10–17 % соответственно) и ниже была инвалидность от хронических заболеваний (67,6 % и 80–90 % соответственно) [9].

В структуре заболеваний, приведших к инвалидности детей г. Снежногорска, ведущее место занимали болезни эндокринной системы (36,2 %), второе и третье места занимали болезни нервной системы (29,3 %) и психические расстройства (27,6 %), новообразования занимали четвертое место (6,9 %).

Заболеваемость злокачественными новообразованиями

Заболеваемость злокачественными новообразованиями (ЗНО) в г. Снежногорске в 2014–2016 гг. составляла $2,6 \pm 2,7$ на 1000 чел., что выше, чем в среднем по РФ – 0,13 на 1000 чел.

Репродуктивное здоровье населения

В качестве основных показателей репродуктивного здоровья населения оценивали рождаемость, состояние здоровья беременных, исходы беременностей и состояние здоровья новорожденных.

Рождаемость в Снежногорске в 2014–2016 гг. составила 21,2 на 1000, 16,5 и 11,9 на 1000 соответственно, со средним значением в год 15,3 на 1000 чел. населения, т.е. имела выраженную тенденцию снижения с 21,2 на 1000 населения в 2014 г. до 11,9 на 1000 населения в 2016 г.

Состояние здоровья беременных женщин оценивали по данным отчетной медико-статистической формы № 32 (Сведения о медицинской помощи беременным, роженицам и роженицам). Всего в разработку вошли 697 беременных, зарегистрированных в Снежногорске в период 2014–2016 гг.

Заболевания и осложнения в период беременности, а также возраст беременной (моложе 18 лет и старше 35 лет) являются факторами риска для развития плода и здоровья новорожденного ребенка.

Возрастные группы беременных представлены следующим образом: до 20 лет – ранняя беременность,

20–30 лет – оптимально детородный возраст, старше 31 года – поздняя беременность.

Беременные в возрасте 20–30 лет составляют 67,1 %, старше 30 лет – 32,6 %, в том числе старше 35 лет – 9,5 %, число беременных в возрасте до 20 лет – 0,6 %. Эти данные свидетельствуют об увеличении числа поздних беременностей по сравнению с популяционными оценками [10]. Эта тенденция сохранялась на протяжении всего трехлетнего периода наблюдения.

Из общего числа обследованных женщин беременность с патологией протекала у 87,1 % женщин. Общая частота патологий составляла 406 патологий на 232 беременных или $1750 \pm 32,2$ на 1000 беременных.

В структуре патологических состояний первые места занимают угрозы прерывания беременности – 31,1 %, болезни мочеполовой системы – 16,5 % и анемия – 14,4 % (табл. 5).

Общая частота неблагоприятных исходов беременностей (НИБ) составила 8,6 % или $86,2 \pm 18,4$ на 1000 беременностей (табл. 6). В общей частоте НИБ ведущее место занимали невынашивание (самопроизвольные аборт), составляющие 16,3 % всех беременностей, мертворождения и ранняя неонатальная смертность составляли 7,0 % и 8,6 % соответственно.

Общая характеристика состояния беременных, течения и исходов беременности у женщин г. Снежногорска, представлена следующими показателями: число позднегозрелых беременных – 32,6 %, число женщин с патологией беременности – 87,1 %, общая частота патологий – $1750,0 \pm 32,2$ на 1000 женщин, частота неблагоприятных исходов беременности – $86,2 \pm 18,4$ на 1000, общая частота невынашивания – 7,0 % или $70,2 \pm 16,8$ на 1000 беременных, соответствует популяционным оценкам.

Состояние здоровья новорожденных, оцениваемое по показателям массы тела, в целом соответствовало популяционному распределению [11] новорожденных по весовым показателям: 73,0 % находились в категории нормального веса 3000–4000 г, 18,7 % в категории гипотрофиков – менее 3000 г и 8,4 % в категории выше 4000 г.

Таблица 5

Заболевания и осложнения в период беременности у женщин Снежногорска в 2014–2016 гг.

Diseases and complications during pregnancy in Snezhnogorsk women in 2014–2016

Показатель	Годы наблюдения						Среднее	
	2014		2015		2016			
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Всего беременных	246	100	222	100	229	100	232	100
в т.ч. с патологией	202	82,1	206	92,8	203	88,6	204	87,1
Всего патологий, в т.ч.	463	100	345	100	411	100	406,3	100
гипертензия	22	4,6	16	4,6	26	12,8	22,3	5,4
преэклампсия, эклампсия	1	0,2	3	0,9	1	0,2	1,7	0,4
венозные осложнения	4	0,9	2	0,6	7	1,7	4,3	1,1
болезни мочеполовой системы	70	15,6	59	17,1	72	17,5	67	16,5
угроза прерывания беременности	228	48,8	140	40,6	131	31,9	126,3	31,1
фетоплацентарная недостаточность	33	7,0	22	6,4	49	11,9	34,7	8,5
сахарный диабет	1	0,2	0	0	3	0,7	1,3	0,3
анемия	52	11,1	57	16,5	66	16,1	58,3	14,4
болезни системы кровообращения	39	8,4	30	8,7	32	7,9	33,7	8,3

Таблица 6

Распределение неблагоприятных исходов беременности у женщин Снежногорска в 2014–2016 гг.

Distribution of adverse pregnancy outcomes in Snezhnogorsk women in 2014–2016

Показатель	Годы наблюдения						Среднее	
	2014		2015		2016			
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Всего беременных	246	100	222	100	229	100	232	100
Мертворождения	2	0,8	3	1,4	2	0,9	2,3	0,8
Самопроизвольные аборт	16	6,5	13	5,8	20	8,7	16,3	7,0
Ранняя неонатальная смертность	1	4,1	0	0	3	1,3	1,3	0,7
Всего НИБ	19	7,7	16	7,2	25	10,9	20	8,6
		19,7		14,4		21,8		17,1
НИБ на 1000 беременных	77,2 ± 17,0		72,0 ± 17,3		109,0 ± 20,6		86,2 ± 18,4	

Таблица 7

Структура патологических состояний у новорожденных в Снежногорске в 2014–2016 гг.

The structure of pathological conditions in newborns in Snezhnogorsk in 2014–2016

Показатель	Годы наблюдения						Среднее	
	2014		2015		2016			
	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Всего новорожденных	333	100	494	100	427	100	418	100
Всего с патологией	108	32,3	157	31,8	126	29,5	130	31,1
Всего патологий, в т.ч.	122	100	243	100	183	100	184	100
инфекции	–	–	3	1,8	–	–	1	0,6
перинатальные состояния	105	93,7	141	58,0	117	63,9	121	65,6
асфиксия, гипоксия	1	0,8	20	8,2	13	6,9	11	5,9
пневмония	–	–	–	–	1	0,5	0,3	0,2
гемолитическая болезнь	1	0,8	–	–	–	–	0,3	0,2
физиологическая желтуха	2	1,6	49	20,5	16	8,7	22	11,9
другие нарушения церебрального статуса	–	–	4	1,6	4	2,2	2,7	1,5
прочие патологии	1	0,8	16	4,3	9	13,7	9	4,5
врожденные аномалии	2	1,6	4	1,6	7	3,8	4,3	2,3
ЗВУР (гипотрофия)	10	8,2	9	3,6	16	8,7	12	6,5

Из общего числа живых новорожденных (418 детей) 69,0 % родились здоровыми, а 31,1 % с патологией. В структуре патологии ведущее место занимали перинатальные состояния, составляя 65,6 % всей патологии, второе место занимала задержка внутриутробного развития (ЗВУР), составляя 6,5 %, и третье место занимала гипоксия и асфиксия, составляя 5,9 % всей патологии (табл. 7).

ВПР в структуре общей заболеваемости составляли 2,3 %. Основное число аномалий были представлены анкилоглоссией (короткая уздечка языка).

Физиологическая желтуха, относящаяся к перинатальным состояниям (перинатальная желтуха), выделена в отдельную патологию, поскольку частота её у детей Снежногорска относительно высокая – 11,9 %, что превышает популяционные оценки этой патологии у новорождённых по РФ (3–5 %) [11].

В динамике трёхлетнего наблюдения частота рождения детей с патологией не имела негативной тенденции и оставалась на уровне 30 % от общего числа новорождённых.

В целом, общая характеристика новорождённых соответствует популяционным оценкам по РФ [11]: ча-

Таблица 8

Смертность населения Снежногорска в 2014–2016 гг.

Population mortality in Snezhnogorsk in 2014–2016

Показатель	Годы			Среднее
	2014	2015	2016	
Всего население	15696	15813	15838	15782
Всего умерло	95	70	87	84
Смертность на 1000 чел.	6,0	4,4	5,5	5,3 ± 0,6
Всего детей первого года жизни	195	201	205	200
Младенческая смертность, на 1000 детей	4,7	–	5,3	3,3 ± 4,0

стота рождения ребёнка здоровым составляет 60,9 %, общая частота патологических состояний составляет 1,4 патологии в среднем на ребёнка. Частота ВПР составляет 2,3 % в общей структуре патологий или 31,0 на 1000 новорожденных, что ниже допустимого уровня 60 на 1000, принятому НКДАР ООН для оценки радиационного риска [12].

Смертность населения

Данные о смертности населения приводятся согласно демографическим данным из справки о контингентах, обслуживаемых ЦМСЧ № 120 (табл. 8).

Общая смертность населения составляла $5,3 \pm 0,6$ на 1000 чел., младенческая – $3,3 \pm 4,0$ на 1000 детей первого года жизни. Показатели смертности общей и младенческой в г. Снежногорске в 2014–2016 гг. были ниже, чем по стране в целом. Согласно данным [7], общая смертность населения в стране составляет 13 на 1000 чел., а младенческая – 6,0 на 1000 детей первого года жизни.

Обсуждение

Заболеваемость взрослого населения Снежногорска в целом выше, чем общероссийские показатели – $667,7 \pm 4,2$ и $454, \pm 19,8$ на 1000 соответственно [7]. Динамика заболеваемости в течение трёх лет сохранялась без изменений на уровне $672,6$ – $684,8$ со средним значением $667,7 \pm 4,2$.

Заболеваемость детей в возрасте 0–14 лет также превышает заболеваемость детей по РФ в целом – $3336,2$ и $2052,3$ на 1000 соответственно. Более высокая частота заболеваемости как взрослых, так и детей обусловлена высокой заболеваемостью органов дыхания, костно-мышечной системы, соединительной ткани и эндокринной системы. В динамике трёхлетнего наблюдения не выявлено изменений заболеваемости детей, уровень которой сохранялся в диапазоне $3462,5$ – $3065,4$ со средним значением $3336,2$ на 1000 детей.

В возрастной структуре более высокая заболеваемость характерна для детей первого года жизни – $4156,8$ на 1000 детей.

Детская инвалидность составляла $11,0 \pm 1,8$ на 1000 детей и подростков, что не превышало популяционные оценки по РФ в целом.

Заболеваемость злокачественными новообразованиями взрослого населения Снежногорска в 2014–2016 гг. составляла $3,2 \pm 0,7$ на 1000 населения, что не превышало частоту онкозаболеваемости по Мурманской области – $3,03$ на 1000 населения и соответствует средней величине по РФ в целом $4,0$ на 1000 [7].

В состоянии репродуктивного здоровья населения можно отметить превышение, по сравнению с популяционными оценками РФ, числа поздно рождающихся женщин (старше 35 лет – $9,5$ %), и частоты неблагоприятных исходов беременности (мертворождения и ранняя неонатальная смертность, невынашивание), составляющей $86,2 \pm 18,4$ на 1000, что превышает популяционную оценку $46,6$ на 1000 [10].

Совокупность приведённых данных о состоянии здоровья населения Снежногорска в 2014–2016 гг. показывает, что уровень здоровья населения по по-

казателям заболеваемости и репродуктивного здоровья несколько ниже показателей здоровья населения Российской Федерации в целом.

Одной из возможных причин более низких показателей здоровья населения Снежногорска могут быть климато-географические особенности Кольского Заполярья. Подтверждением возможного негативного влияния этого фактора на здоровье населения могут быть сравнительные данные о состоянии здоровья населения, проживающего в г. Фокино вблизи «наследия» деятельности Тихоокеанского флота страны, в 20 км от действующего предприятия по обращению с радиоактивными и ядерными отходами ДВЦ «ДальРАО» в географически благополучном Приморском крае Дальнего востока, не отличающиеся от показателей центрального региона РФ [13].

Другим важным фактором негативного влияния на здоровье населения является наличие в регионе средне-легкой степени тяжести зубной эндемии – йодного дефицита [14]. По данным обследования в 2006 г. детского населения г. Заозерска (20 км на СЗ), выявлена лёгкая степень йодной эндемии ($92,2$ мкг/л) и высокая степень неонатальной гипертиреотропонемии ($ТТГ > 5$ мЕд/л). Частота неонатального гипотиреоза у детей составляла $17,2$ %, зоба – $16,9$ % при норме $5,8$ %. Тиреоидные гормоны играют важнейшую роль в обеспечении нормального функционирования организма человека (физическое, половое и интеллектуальное развитие), но особенно велика их роль в развитии плода и ребенка в раннем постнатальном развитии [13, 15].

Выводы

1. Уровень здоровья населения Снежногорска по показателям заболеваемости и репродуктивного здоровья ниже средних показателей по стране в целом.

2. Заболеваемость взрослого и детского населения выше среднестатистических оценок по стране в целом: $667,7 \pm 4,2$ и $454,2 \pm 19,8$ на 1000, $3336,2$ и $2052,3$ на 1000 соответственно.

3. В Снежногорске выше популяционная оценка частоты неблагоприятных исходов беременности (мертворождения, ранняя неонатальная смертность и частота самопроизвольных аборт) – $86,2 \pm 18,4$ и $46,6$ на 1000 соответственно.

4. Одной из основных причин негативного влияния на заболеваемость населения являются климато-географические условия Кольского Заполярья и наличие в регионе средне-легкой степени йодного дефицита – зубной эндемии. Необходимыми мерами по оздоровлению населения Снежногорска на данном этапе являются адекватная йодная профилактика зубной эндемии и оздоровительно-реабилитационные мероприятия детям и беременным женщинам.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 25.04.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 25.04.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

Examination of the Health Status of the Population in the Vicinity of the Nerpa Shipyard Involved in the Decommission and Dismantlement of the Nuclear Legacy Facility – FTB Lepse

A.M. Lyaginskaya, N.K. Shandala, S.M. Kiselev, A.P. Ermalitsky, D.V. Isaev, V.V. Kuptsov

A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: Purpose of this report is to assess the health status of the residents of the town of Snezhnogorsk, located in the impact area of the shipyard (SRZ Nerpa) involved in the decommission and dismantlement of the floating technical base Lepse (PTB Lepse).

Material and method: The following parameters were assessed as public health indicators: total primary and chronic primary morbidity of adult and children population, child disability, reproductive health in terms of the status of pregnant women and newborns, general and child mortality. Annual external radiation background values were evaluated along with contents in soil and water of manmade radionuclides, such as ^{137}Cs and ^{90}Sr , and natural ones, such as ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{235}U .

Results: The health of the population of the town of Snezhnogorsk, being measured by incidence indicators and reproductive health, is lower than that in the country as a whole: the adult morbidity (667.7 ± 4.2 and 454.2 ± 19.8 per 1000 residents respectively) and child morbidity (3336.2 and 2052.3 ± 194.4 per 1000 residents respectively) is higher; the frequency of adverse pregnancy outcomes (stillbirth, early neonatal fetal death, spontaneous abortions) is also higher – 86.2 ± 18.4 and 46.6 per 1000 residents respectively.

Conclusion: The main causes of the negative impact on the health of the population of the town of Snezhnogorsk are climatic and geographical conditions of the Kola Arctic and the presence of medium-light iodine deficiency (goiter endemia).

Key words: population, Snezhnogorsk, NWC SevRAO, public and occupational doses, morbidity, reproductive health, mortality

For citation: Lyaginskaya AM, Shandala NK, Kiselev SM, Ermalitsky AP, Isaev DV, Kuptsov VV. Examination of the Health Status of the Population in the Vicinity of the Nerpa Shipyard Involved in the Decommission and Dismantlement of the Nuclear Legacy Facility – FTB Lepse. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):31-9. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-31-39

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Российская Федерация. Федеральный закон. О радиационной безопасности населения (с изменениями на 19.07.2011) [Russian Federation. The Federal Law. Radiation safety of the population (with changes on 19.07.2011). (In Russ.)]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/9015351>.
2. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 Radiation Safety Standards NRB-99/2009 (In Russ.)]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>.
3. МУ 2.6.5.076-2015. Мониторинг состояния окружающей среды на этапах жизненного цикла АЭС. 36 с. [МУ 2.6.5.076-2015. Environmental monitoring at the stages of the NPP life cycle. 36 p. (In Russ.)].
4. МУ 2.6.5.032-2014. Экспертные и прогнозные оценки состояния здоровья населения в районах размещения атомных станций. 30 с. [МУ 2.6.5.032-2014. Expert and forecast estimates of the health status of the population in the areas where nuclear power plants are located. 30 p. (In Russ.)].
5. Мерков А.М., Поляков Л.Е. Санитарная статистика (пособие для врачей). – Л.: Медицина. 1974. 384 с. [Merkov AM, Polyakov LE. Sanitary statistics (manual for doctors). Medicine. 1974. 384 p. (In Russ.)].
6. Промежуточный отчет о выполнении практических медико-гигиенических мероприятий «Оценка радиационно-гигиенического состояния территории и морской акватории в районе расположения СРЗ «Нерпа». ФГБУ ГНЦ ФМБЦ А.И. Бурназяна ФМБА России. – М., 2018. [Progress report on practical medical and health physics activities «Radiation and Health Physics Survey of the Territory and Off-shore Marine Water Area in the Vicinity of Nerpa Shipyard». SRC-FMBC – M., 2018. 33 p. (In Russ.)].
7. Улумбекова Г.Э. Здравоохранение России. Итоги 2012–2016 гг. Неотложные меры в 2017–2018 гг. Приоритеты развития до 2025 г. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2017. 48 с. [Ulumbekova GE. Health care of Russia. The results of 2012–2016. Urgent measures in 2017–2018. Priorities of development until 2025. Moscow. 2017. 48 p. (In Russ.)].
8. Здравоохранение в России. 2017: Стат. сб. Росстат. – М., 2017. 170 с. [Health Care in Russia. 2017: Stat. compilation. Rosstat. 2017. 170 p. (In Russ.)].
9. Щепин О.П., Коротких Р.В., Щепин В.О., Медик В.А. Здоровье населения – основа развития здравоохранения. Под ред. О.П. Щепина. – М.: Национальный НИИ общественного здоровья РАМН, 2009. 376 с. [Schepin OP, Korotkikh RV, Schepin VO, Medic VA. Public health is the basis for health development. Ed. O.P. Shchepina. 2009. 376 p. (In Russ.)].
10. Бодяжина В.И., Жмакин К.Н., Кирющенков А.П. Акушерство. – Курск: ГУИПП «Курск», 1998. 496 с. [Bodyajina VI, Zhmakin KN, Kyrushchenkov AP. Obstetrics. 1998. 496 p. (In Russ.)].
11. Справочник неонатолога. Под ред. В.А. Таболина, Н.П. Шабалова. – Л.: Медицина. 1984. 317 с. [Handbook of Neonatologist. Ed. Tabolin VA, Shabalov NP. Medicine. 1984. 317 p. (In Russ.)].
12. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Пер. с англ. Под ред. М. Ф. Киселёва и Н. К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
13. Столярова С.А. Состояние щитовидной железы у детей и подростков, проживающих в регионе расположения радиационно-опасных объектов: дисс. канд. мед. наук. – М., 2006. 175 с. [Stolyarova SA. The state of the thyroid gland in children and adolescents living in the region of radiation-hazardous objects: Dis. PhD Med. 2006. 175 p. (In Russ.)].
14. Лягинская А.М., Петоян И.М., Осипов В.А. и соавт. Состояние здоровья населения, проживающего в районе расположения предприятия по обращению с радиоактивными отходами ДВЦ «ДальРАО». Мед. радиология и радиационная безопасность. 2016;61(2):30-8. [Lyaginskaya AM, Petoan IM, Osipov VA, et al. The state of health of the population living in the area of location of the enterprise for radioactive waste management at the DalRAO. Medical Radiology and Radiation Safety. 2016;61(2):30-8. (In Russ.)].
15. Щитовидная железа. Физиология и клиника. Под ред. С. Вернера (перевод с английского). – Л.: Из-во мед. литературы, 1968. 451 с. [Thyroid. Physiology and clinic. Ed. S. Werner. 1968. 451 p. (In Russ.)].

А.В. Гурьев, А.Р. Туков, А.Ю. Бушманов, М.Ю. Калинина, А.В. Зубов

ЗДОРОВЬЕ РАБОТНИКОВ С ПОСТУПЛЕНИЕМ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ТРАВМАХ КОЖНЫХ ПОКРОВОВ

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва

Контактное лицо: Туков Александр Романович, atukov40@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ распространённости болезней непрофессионального генеза у лиц с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы.

Материал и методы: База данных «Отраслевого регистра лиц, имеющих профессиональные заболевания» (ОРПРОФИ) включает показатели здоровья у лиц при поступлении радионуклидов через повреждённые кожные покровы с численностью 185 пациентов в возрасте $68,9 \pm 1,0$ года на 2014 г. (166 мужчин в возрасте $68,3 \pm 1,0$ года и 19 женщин в возрасте $74,0 \pm 3,4$ года). Кодирование заболеваний непрофессионального генеза проводилось согласно Международной классификации болезней 10-го пересмотра (МКБ-10). Для оценки различия показателей между мужчинами и женщинами использован критерий Стьюдента ($p < 0,05$). Для оценки здоровья лиц, учтённых в регистре, использован показатель распространённости болезней непрофессионального генеза, рассчитанный на 1000 работников, имеющих поступление радионуклидов при травмах кожных покровов.

Результаты: Распространённость болезней непрофессионального генеза составляет $1637,8 \pm 94,1$ (у мужчин $1614,5 \pm 98,6$, у женщин $1842,1 \pm 311,4$; $p > 0,05$). Первое ранговое место занимают заболевания костно-мышечной системы $340,5 \pm 34,8$; 20,8 % (у мужчин $313,3 \pm 36,0$; 19,4 %, у женщин $578,9 \pm 174,6$; 31,4 %; $p > 0,05$). Из них дорсопатии составили $286,5 \pm 33,1$; 84,1 % (у мужчин $265,1 \pm 34,3$; 84,6 %, у женщин $473,7 \pm 114,6$; 81,8 %; $p > 0,05$). На втором ранговом месте находятся заболевания органов пищеварения $270,3 \pm 32,7$; 16,5 %. Наибольшие показатели у лиц с болезнями пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки $205,4 \pm 29,7$; 76,0 % (у мужчин $210,8 \pm 31,7$; 76,1 %, у женщин $157,9 \pm 83,7$; 75,0 %; $p > 0,05$). Третье ранговое место делят болезни глаза и его придаточного аппарата $200,0 \pm 29,4$; 12,2 % (у мужчин $192,8 \pm 30,6$; 11,9 %, у женщин $263,2 \pm 101,0$; 14,3 %; $p > 0,05$) и болезни системы кровообращения $200,0 \pm 29,4$; 12,2 % (у мужчин $174,7 \pm 29,5$; 10,8 %, у женщин $421,1 \pm 113,3$; 22,9 %; $p > 0,05$). В структуре заболеваний непрофессионального генеза заболевания первых четырёх ранговых мест, включая болезни органов дыхания, составляют 73,6 % (у мужчин 72,4 %, у женщин 82,9 %).

Заключение: Среди заболеваний у лиц с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы наиболее распространены заболевания костно-мышечной системы, болезни органов пищеварения, болезни глаза, его придаточного аппарата и системы кровообращения. По частоте им уступают заболевания органов дыхания. Предлагается введение кода S61.2 с диагнозом «Открытые раны запястья и кисти с поступлением радионуклидов».

Ключевые слова: повреждение кожных покровов, поступления радионуклидов, заболевания непрофессионального генеза

Для цитирования: Гурьев А.В., Туков А.Р., Бушманов А.Ю., Калинина М.Ю., Зубов А.В. Здоровье работников с поступлением радионуклидов при травмах кожных покровов. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):40–4.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-40-44

Актуальность

В структуре инцидентов на радиационно-опасных предприятиях и в организациях Госкорпорации «Росатом» наблюдаются случаи «раневого» поступления радионуклидов в организм работников вследствие локальных множественных повреждений кожных покровов [1, 2]. Большая часть случаев повреждений приходится на колотые и резаные раны кистей рук (около 90 %) [1]. Наиболее часто контакт с радионуклидами происходит при технологических операциях, выполняемых вручную в перчаточных камерах и боксах, а также в ремонтных зонах при обслуживании загрязнённого оборудования, используемого в плутониевом производстве [1, 3].

В 2010 г. скрытые микротравмы, загрязнённые радионуклидом, были диагностированы у 8 человек, работавших на химико-металлургическом заводе АО «Сибирский химический комбинат» (ХМЗ АО «СХК»). Незначительное количество случаев, связанных с диагностикой микротравм, объясняется процессом обновления рабочего персонала [1].

Наибольшее количество повреждений кожных покровов зафиксировано у работников литейно-механического цеха ХМЗ АО «СХК». В их структуре на лиц с профессией литейщика-прессовщика приходится

35 %, с профессией аппаратчика – 25 %, токаря – 14 % и слесаря-ремонтника – 7 % [2].

С 2010 по 2016 гг. из числа работников ХМЗ АО «СХК» выявлено 18 человек с незарегистрированным ранее поступлением изотопов плутония и америция через повреждённые кожные покровы, с высоким содержанием плутония и америция в организме. Высказывается предположение о большом количестве незарегистрированных случаев «раневых» поступлений радионуклидов [4].

Содержание радионуклидов в организме у лиц, имеющих микротравмы в области кистей рук, оказалось в 6,2 раза выше, чем у лиц, их не имеющих. При содержании в организме плутония свыше 740 Бк травматические повреждения кожи диагностированы у 40 % работников [5].

Поступление радионуклидов и последующее внутреннее облучение органов и тканей представляет потенциальную опасность для здоровья работников [3].

В настоящее время отмечается проблема отсутствия экспериментальных моделей для оценки поступления радионуклидов через повреждённую кожу человека. Отсутствуют также кодировка данной патологии на базе рекомендаций МКБ-10, а также оценки распространённости заболеваний непрофессионального генеза у этого контингента больных.

Материал и методы

В исследовании использовались данные информационной базы «Отраслевого регистра лиц, имеющих профессиональные заболевания» (ОРПРОФИ), разработанного и функционирующего на базе ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России с 1951 до 2014 гг. База данных регистра включает показатели здоровья лиц с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы и численностью 185 пациентов в возрасте $68,9 \pm 1,0$ года (166 мужчин в возрасте $68,3 \pm 1,0$ года и 19 женщин в возрасте $74,0 \pm 3,4$ года) (табл. 1).

На каждого работника с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы в области кистей рук была заполнена «Регистрационная карта лица, имеющего профессиональные заболевания, “наколы”, либо являющегося носителем радионуклидов в результате работы в условиях профессиональной вредности» и «Кодировочный талон лица, имеющего профессиональные заболевания, а также с “наколами”, или являющегося носителем радионуклидов в результате работы в условиях профессиональной вредности».

Кодирование заболеваний непрофессионального генеза проводилось согласно Международной классификации болезней 10-го пересмотра (МКБ-10). Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием Microsoft Excel 2013. Для оценки различия показателей между мужчинами и женщинами использован критерий Стьюдента ($p < 0,05$). Для оценки здоровья лиц, учтённых в регистре, использован показатель распространённости болезней непрофессионального генеза, рассчитанный на 1000 работников с поступлением радионуклидов при травмах кожных покровов.

Для отображения статистических материалов в форме таблиц были задействованы программы Microsoft Office Word 2013.

Результаты и обсуждение

Распространённость болезней непрофессионального генеза у лиц с поступлением радионуклидов в месте повреждения кожных покровов составляет $1637,8 \pm 94,1$ (у мужчин $1614,5 \pm 98,6$, у женщин $1842,1 \pm 311,4$; $p > 0,05$).

Среди болезней непрофессионального генеза первое ранговое место занимают болезни костно-

мышечной системы (КМС), второе – болезни органов пищеварения, третье место делят болезни глаза и его придаточного аппарата и болезни системы кровообращения. Для патологий системы кровообращения и органов дыхания аналогичный показатель находится в диапазоне от 200 до 100 случаев на 1000 больных; все прочие заболевания имеют распространённость меньше 100 случаев на 1000 больных (табл. 2).

Распространённость заболеваний КМС непрофессионального генеза составляет $340,5 \pm 34,8$; 20,8 % (у мужчин $313,3 \pm 36,0$; 19,4 %, у женщин $578,9 \pm 174,6$; 31,4 %; $p > 0,05$) (табл. 3). Это в 2,7 раза больше распространённости болезней КМС у лиц, занятых на предприятиях и в организациях, обслуживаемых ФМБА России (125,9 на 1000 больных). Первое ранговое место в структуре КМС составляют дорсопатии – $286,5 \pm 33,1$; 84,1 % (у мужчин $265,1 \pm 34,3$; 84,6 %, у женщин $473,7 \pm 114,6$; 81,8 %; $p > 0,05$) (табл. 3). На втором ранговом месте находятся артропатии $43,2 \pm 14,9$; 12,7 % (у мужчин $36,1 \pm 14,5$; 11,5 %, у женщин $105,3 \pm 70,4$; 18,2 %). Остеопатии и хондропатии занимают третье ранговое место $10,8 \pm 7,6$; 3,2 % (у мужчин $12,1 \pm 8,5$; 3,8 %).

Распространённость заболеваний органов пищеварения непрофессионального генеза составляет $270,3 \pm 32,7$; 16,5 % (у мужчин $277,1 \pm 34,7$; 17,2 %, у женщин $210,5 \pm 93,5$; 11,4 %; $p > 0,05$) (табл. 4). Это в 2,4 раза больше распространённости болезней пищеварения у лиц, работавших на предприятиях и в организациях, по данным ФМБА России (114,9 на 1000 больных). На первом и втором ранговых местах находятся болезни пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки $205,4 \pm 29,7$; 76,0 % (у мужчин $210,8 \pm 31,7$; 76,1 %, у женщин $157,9 \pm 83,7$; 75,0 %; $p > 0,05$) и болезни желчного пузыря, желчевыводящих путей и поджелудочной железы $59,5 \pm 17,4$; 22,0 % (мужчины $60,2 \pm 18,5$; 21,7 %, женщины $52,6 \pm 51,2$; 25,0 %; $p > 0,05$).

Распространённость болезни глаза и его придаточного аппарата составляет $200,0 \pm 29,4$; 12,2 % (у мужчин $192,8 \pm 30,6$; 11,9 %, у женщин $263,2 \pm 101,0$; 14,3 %; $p > 0,05$). Таким образом, их распространённость у женщин больше, чем у мужчин, в 1,4 раза и в 1,4 раза больше показателей, регистрируемых ФМБА России (147,2 на 1000 больных). Первое ранговое место занимает диагноз «тяжелое нарушение бикулярного зрения» H54.1 – $59,5 \pm 17,4$; 29,7 % (у мужчин

Таблица 1

Распределение лиц с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы по полу и возрастным группам

The distribution of individuals from intake of radionuclides through the damaged skin by sex and age group

Возрастные группы	Распределение лиц по полу и его структура, %					
	Мужчины	Доля, %	Женщины	Доля, %	Оба пола	Доля, %
до 49 лет	2	1,2	0	0,0	2	1,1
50–59	20	12,0	1	5,3	21	11,4
60–69	46	27,7	3	15,8	49	26,5
70–79	93	56,0	10	52,6	103	55,7
80 и более	5	3,0	5	26,3	10	5,4
Всего	166	100,0	19	100,0	185	100,0

Таблица 2

Распространённость болезней непрофессионального генеза у лиц с поступлением радионуклидов при повреждении кожных покровов и её структура
The prevalence diseases of non-professional Genesis among persons with intake of radionuclides in the damage to the skin and its structure

Ранг места	Наименование болезней (МКБ-10)	Структура и распространённость по полу ($\pm m$) на 1000 больных профессиональными заболеваниями					
		Мужчины	Доля, %	Женщины	Доля, %	Оба пола	Доля, %
	Всего, в том числе:	1614,5 $\pm$ 98,6	100,0	1842,1 $\pm$ 311,4	100,0	1637,8 $\pm$ 94,1	100,0
1	Болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани (M00–M99)	313,3 $\pm$ 36,0	19,4	578,9 $\pm$ 174,6	31,4	340,5 $\pm$ 34,8	20,8
2	Болезни органов пищеварения (K00–K93)	277,1 $\pm$ 34,7	17,2	210,5 $\pm$ 93,5	11,4	270,3 $\pm$ 32,7	16,5
3	Болезни глаза и его придаточного аппарата (H00–H59)	192,8 $\pm$ 30,6	11,9	263,2 $\pm$ 101,0	14,3	200,0 $\pm$ 29,4	12,2
4	Болезни системы кровообращения (I00–I99)	174,7 $\pm$ 29,5	10,8	421,1 $\pm$ 113,3	22,9	200,0 $\pm$ 29,4	12,2
5	Болезни органов дыхания (J00–J99)	210,8 $\pm$ 31,7	13,1	52,6 $\pm$ 51,2	2,9	194,6 $\pm$ 29,1	11,9
6	Болезни кожи и подкожной клетчатки (L00–L99)	96,4 $\pm$ 22,9	6,0	52,6 $\pm$ 51,2	2,9	91,9 $\pm$ 21,2	5,6
8	Некоторые инфекционные и паразитарные болезни (A00–B99)	72,3 $\pm$ 20,1	4,5	–	0,0	64,9 $\pm$ 18,1	4,0
9	Болезни уха и сосцевидного отростка (H60–H95)	60,2 $\pm$ 18,5	3,7	–	0,0	54,1 $\pm$ 16,6	3,3
10	Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ (E00–E90)	42,2 $\pm$ 15,6	2,6	105,3 $\pm$ 70,4	5,7	48,7 $\pm$ 15,8	3,0
	Прочие	174,7 $\pm$ 29,5	10,8	157,9 $\pm$ 83,7	8,6	172,9 $\pm$ 27,8	9,7

Таблица 3

Распространённость заболеваний костно-мышечной системы непрофессионального генеза у лиц с поступлением радионуклидов при повреждении кожных покровов и её структура
The prevalence of diseases of the musculoskeletal system of non-professional origin in persons with radionuclide intake during skin damage and its structure

Ранг места	Наименование болезней (МКБ-10)	Структура и распространённость по полу ($\pm m$), на 1000 больных профессиональными заболеваниями					
		Мужчины	Доля, %	Женщины	Доля, %	Оба пола	Доля, %
	Всего, в том числе	313,3 $\pm$ 36,0	100,0	578,9 $\pm$ 174,6	100,0	340,5 $\pm$ 34,8	100,0
1	Дорсопатии (M40–M54)	265,1 $\pm$ 34,3	84,6	473,7 $\pm$ 114,6	81,8	286,5 $\pm$ 33,1	84,1
2	Артропатии (M00–M25)	36,1 $\pm$ 14,5	11,5	105,3 $\pm$ 70,4	18,2	43,2 $\pm$ 14,9	12,7
3	Остеопатии и хондропатии (M80–M94)	12,1 $\pm$ 8,5	3,8	–	0,0	10,8 $\pm$ 7,6	3,2

Таблица 4

Распространённость заболеваний органов пищеварения непрофессионального генеза у лиц с поступлением радионуклидов при повреждении кожных покровов и её структура
The prevalence of diseases of the digestive organs of unprofessional origin in persons with radionuclide intake during skin damage and its structure

Ранг места	Наименование болезней (МКБ-10)	Структура и распространённость по полу ($\pm m$), на 1000 больных профессиональными заболеваниями					
		Мужчины	Доля, %	Женщины	Доля, %	Оба пола	Доля, %
	Всего, в том числе	277,1 $\pm$ 34,7	100,0	210,5 $\pm$ 93,5	100,0	270,3 $\pm$ 32,7	100,0
1	Болезни пищевода, желудка и двенадцатиперстной кишки (K20–K31)	210,8 $\pm$ 31,7	76,1	157,9 $\pm$ 83,7	75,0	205,4 $\pm$ 29,7	76,0
2	Болезни желчного пузыря, желчевыводящих путей и поджелудочной железы (K80–K87)	60,2 $\pm$ 18,5	21,7	52,6 $\pm$ 51,2	25,0	59,5 $\pm$ 17,4	22,0
3	Другие болезни кишечника (K55–K64)	6,0 $\pm$ 6,0	2,2	–	0,0	5,4 $\pm$ 5,4	2,0

60,2 $\pm$ 18,5; 31,3 %, у женщин 52,6 $\pm$ 51,2; 20,0 %; $p > 0,05$). На втором и третьем ранговых местах находятся умеренное нарушение бинокулярного зрения H54.2 – 54,1 $\pm$ 16,6; 27,0 % (у мужчин 54,2 $\pm$ 17,6; 28,1 %, у женщин 52,6 $\pm$ 51,2; 20,0 %; $p > 0,05$) и гиперметропия H52.0 –

43,2 $\pm$ 14,9; 21,6 % (у мужчин 36,1 $\pm$ 14,5; 18,8 %, у женщин 105,3 $\pm$ 70,4; 40,0 %; $p > 0,05$) соответственно. Большая распространённость болезней глаза и его придаточного аппарата может быть связана с обязательным участием офтальмолога при профилактических осмотрах.

Таблица 5

Распространённость заболеваний системы кровообращения непрофессионального генеза у лиц с поступлением радионуклидов при повреждении кожных покровов и её структура**The prevalence of diseases of the circulatory system of unprofessional origin in people with radionuclide intake during skin damage and its structure**

Ранг места	Наименование болезней (МКБ-10)	Структура и распространённость по полу ($\pm m$), на 1000 больных профессиональными заболеваниями					
		Мужчины	Доля, %	Женщины	Доля, %	Оба пола	Доля, %
	Всего, в том числе	174,7 $\pm$ 29,5	100,0	421,1 $\pm$ 113,3	100,0	200,0 $\pm$ 29,4	100,0
1	Болезни, характеризующиеся повышенным кровяным давлением (I10–I15)	72,3 $\pm$ 20,1	41,4	210,5 $\pm$ 93,5	50,0	86,5 $\pm$ 20,7	43,2
2	Цереброваскулярные болезни (I60–I69)	30,1 $\pm$ 13,3	17,2	52,6 $\pm$ 51,2	12,5	32,4 $\pm$ 13,0	16,2
3	Болезни вен, лимфатических сосудов и лимфатических узлов, не классифицированные в других рубриках (I80–I89)	24,1 $\pm$ 11,9	13,8	105,3 $\pm$ 70,4	25,0	32,4 $\pm$ 13,0	16,2
4	Ишемическая болезнь сердца (I20–I25)	18,1 $\pm$ 10,3	10,3	52,6 $\pm$ 51,2	12,5	21,6 $\pm$ 10,7	10,8
5	Другие болезни сердца (I30–I52)	24,1 $\pm$ 11,9	13,8	–	0,0	21,6 $\pm$ 10,7	10,8
6	Хронические ревматические болезни сердца (I05–I09)	6,0 $\pm$ 6,0	3,4	–	0,0	5,4 $\pm$ 5,4	2,7

Распространённость заболеваний системы кровообращения непрофессионального генеза составляет 200,0 $\pm$ 29,4; 12,2 % (у мужчин 174,7 $\pm$ 29,5; 10,8 %, у женщин 421,1 $\pm$ 113,3; 22,9 %; $p > 0,05$) (табл. 2). Таким образом, частота проявления болезней системы кровообращения у женщин больше, чем у мужчин, в 2,4 раза и в 1,1 раза меньше по сравнению со всеми лицами, занятыми на предприятиях и в организациях, обслуживаемых ФМБА России (210,0 на 1000 больных). На первом ранговом месте находятся болезни, характеризующиеся повышенным кровяным давлением, 86,5 $\pm$ 20,7; 43,2 % (у мужчин 72,3 $\pm$ 20,1; 41,4 %, у женщин 210,5 $\pm$ 93,5; 50,0 %; $p > 0,05$). На втором ранговом месте находятся две группы болезней. Это цереброваскулярные болезни – 32,4 $\pm$ 13,0; 16,2 % (у мужчин 30,1 $\pm$ 13,3; 17,2 %, у женщин 52,6 $\pm$ 51,2; 12,5 %; $p > 0,05$) (табл. 5). Распространённость болезней вен, лимфатических сосудов и лимфатических узлов, не классифицированных в других рубриках МКБ-10, составляет 32,4 $\pm$ 13,0; 16,2 % (у мужчин 24,1 $\pm$ 11,9; 13,8 %, у женщин – 105,3 $\pm$ 70,4; 25,0 %; $p > 0,05$).

Распространённость болезней органов дыхания непрофессионального генеза 194,6 $\pm$ 29,1; 11,9 % (у мужчин 210,8 $\pm$ 31,7; 13,1 %, у женщин 52,6 $\pm$ 51,2; 2,9 %; $p > 0,05$) (табл. 2). В основном, они диагностируются у мужчин; на долю женщин приходятся единичные случаи. Распространённость заболеваний органов дыхания у мужчин в 3,9 раз больше, чем у женщин и в 1,2 раза меньше по сравнению со всеми лицами, занятыми на предприятиях и в организациях, обслуживаемых ФМБА России (223,8 на 1000 больных).

В структуре заболеваний непрофессионального генеза заболевания первых четырёх ранговых мест составляют 73,6 % (у мужчин 72,4 %, у женщин 82,9 %). Заболевания системы кровообращения диагностируются реже, чем заболевания КМС и органов пищеварения в 1,7 раза и в 1,4 раза соответственно.

Частота других заболеваний непрофессионального генеза находится в диапазоне от 91,9 $\pm$ 21,1; 5,6 % («Болезни кожи и подкожной клетчатки» L00–L99) до

единичных случаев доброкачественных новообразований D14.0.

Достоверных различий распространённости заболеваний мужчин и женщин во всех случаях не отмечено ($p > 0,05$).

Отмечается невозможность учёта случаев поступления радионуклидов через повреждённые кожные покровы из-за отсутствия в МКБ-10 кода для шифрования этой патологии. Исходя из этого, нам представляется необходимым определить её как «Открытые раны запястья и кисти с поступлением радионуклидов» с кодом S61.2 и поместив в раздел МКБ-10 «Травмы, отравления и некоторые другие последствия воздействия внешних причин» (S00–T98).

Заключение

Среди заболеваний у лиц в связи с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы наиболее распространены заболевания костно-мышечной системы, болезни органов пищеварения, болезни глаза и его придаточного аппарата. По частоте им уступают заболевания системы кровообращения и органов дыхания. Распространённость заболеваний костно-мышечной системы, болезней органов пищеварения, болезней глаза и его придаточного аппарата непрофессионального генеза выше у лиц с поступлением радионуклидов через повреждённые кожные покровы по сравнению с общим контингентом лиц, работавших в организациях и на предприятиях, обслуживаемых медицинскими учреждениями ФМБА России. При анализе распространённости заболеваний у мужчин и женщин статистической достоверности между показателями не выявлено.

Как один из вариантов решения проблемы учёта у лиц с признаками загрязнения радионуклидами повреждённых кожных покровов в рамках МКБ-10 предлагается введение кода S61.2 с диагнозом «Открытые раны запястья и кисти с поступлением радионуклидов».

The Health of Workers with the Intake of Radionuclides in Case of Skin Damage

A.V. Guryev, A.R. Tukov, A.Yu. Bushmanov, M.Yu. Kalinina, A.V. Zubov

A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: Analysis of the prevalence of diseases of non-professional genesis in individuals with intake of radionuclides through damaged skin and served by health care institutions of the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

Material and methods: The database of the “Industry register of persons with occupational diseases” includes the health indicators of individuals with intake of radionuclides through damaged skin and a population of 185 patients aged 68.9 ± 1.0 years for 2014 (166 men aged 68.3 ± 1.0 years and 19 women aged 74.0 ± 3.4 years). The coding of diseases of non-professional genesis was carried out according to the International Statistical Classification of Diseases and Problems Related to Health (ICD-10). Student’s criterion was used as a criterion of statistical validity ($p < 0.05$). To assess the health of persons counted in the register, the prevalence rate of diseases of non-professional genesis, calculated for 1000 patients with occupational diseases, was used. An intensive indicator error was calculated ($\pm m 95\%$).

Results: The prevalence of non-occupational diseases is 1637.8 ± 94.1 (men 1614.5 ± 98.6 , women 1842.1 ± 311.4 ; $p > 0.05$). Disorders of the musculoskeletal system occupy the first place – 340.5 ± 34.8 ; 20.8 % (men 313.3 ± 36.0 ; 19.4 %, women 578.9 ± 174.6 ; 31.4 %; $p > 0.05$). Of these, dorsopathies accounted for 286.5 ± 33.1 ; 84.1 % (men 265.1 ± 34.3 ; 84.6 %, women 473.7 ± 114.6 ; 81.8 %; $p > 0.05$). Diseases of the digestive organs are 270.3 ± 32.7 ; 16.5 %. The highest rates in persons with diseases of the esophagus, stomach and duodenum 205.4 ± 29.7 ; 76.0 % (men 210.8 ± 31.7 ; 76.1 %, women 157.9 ± 83.7 ; 75.0 %; $p > 0.05$). The third ranking place is divided by diseases of the eye and its adnexa 200.0 ± 29.4 ; 12.2 % (men 192.8 ± 30.6 ; 11.9 %, women 263.2 ± 101.0 ; 14.3 %; $p > 0.05$) and circulatory system diseases 200.0 ± 29.4 ; 12.2 % (men 174.7 ± 29.5 ; 10.8 %, women 421.1 ± 113.3 ; 22.9 %; $p > 0.05$). In the structure of diseases of non-professional genesis, the diseases of the first four ranking places, including respiratory diseases, make up 73.6 % (men 72.4 %, women 82.9 %).

Conclusion: Among the diseases in persons with the intake of radionuclides through damaged skin are the most common disorders of the musculoskeletal system, diseases of the digestive system, diseases of the eye and its appendage apparatus. In terms of frequency, they are inferior to diseases of the circulatory system and respiratory organs. As one of the solutions to the problem of registration in persons with signs of contamination of radionuclides of damaged skin in the framework of ICD-10, it is proposed to introduce code S61.2 as “Open wounds of wrist and hand with intake of radionuclides”.

Key words: skin damage, radionuclide intake, diseases of non-professional genesis

For citation: Guryev AV, Tukov AR, Bushmanov AY, Kalinina MY, Zubov AV. The Health of Workers with the Intake of Radionuclides in Case of Skin Damage. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):40-4. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-40-44

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богданов И.М., Зайцев Е.П., Овчинников А.В. и соавт. Организация системы контроля и вопросы медико-санитарного сопровождения персонала в условиях поступления радионуклидов плутония и америция через поврежденные кожные покровы. Медицина экстремальных ситуаций. 2018;20(1):86-93. [Bogdanov IM, Zaitsev EP, Ovchinnikov AV, et al. The organization of the control system and the issues of medical and sanitary support of personnel in the conditions of plutonium and americium radionuclide intake through damaged skin integuments. Medicine of Extreme Situations. 2018; 20(1):86-93. (In Russ.).]
2. Беляев И.К., Жорова Е.С., Калистратова В.С. и соавт. Радиоактивные вещества и колотые раны. Медицина экстремальных ситуаций. 2011;13(1):41-52. [Belyaev IK, Zhorova ES, Kalistratova VC, et al. Radioactive substances and stab wounds. Medicine of Extreme Situations. 2011;13(1):41-52. (In Russ.).]
3. МУ 2.6.1.034-2014. Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241.

Методические указания. – М. 2014. 24 с. [МУ 2.6.1.034-2014. “The order of interaction between the enterprises of Rosatom State Corporation and the bodies and organizations of the FMBA of Russia with non-standard (wound) and emergency inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes”. Methodical instructions. Moscow. 2014. 24 p. (In Russ.).]

4. Маслюк А.И., Богданов И.М., Симоненко П.Д. Особенности формирования доз внутреннего облучения персонала плутониевого производства Сибирского химического комбината. Бюллетень Сибирской Медицины. 2005;2(4):124-7. [Maslyuk AI, Bogdanov IM, Simonenko PD. Features of the formation of internal doses of radiation personnel plutonium production of the Siberian Chemical Plant. Bulletin of Siberian Medicine. 2005;2(4):124-7. (In Russ.).]
5. Окладникова Н.Д., Хохряков В.В., Шевкунов В.А. и др. Плутоний-239: Клинико-цитогенетическое наблюдение описания случая высокой инкорпорации радионуклида (24 года наблюдения). Радиационная биология. Радиоэкология. 2004;44(4):415-9. [Okladnikova ND, Khokhryakov VV, Shevkunov VA, et al. Plutonium-239: Clinical and cytogenetic observation of the description of a case of high incorporation of a radionuclide (24 years of observation). Radiation Biology. Radioecology. 2004;44(4):415-9. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 26.11.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 26.11.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

А.Н. Меняйло, В.В. Кашеев, Е.А. Пряхин, С.Ю. Чекин, М.А. Максюттов, К.А. Туманов, В.К. Иванов

ПРОГНОЗ РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ НАСЕЛЕНИЯ НА ЗАГРЯЗНЁННЫХ ^{137}Cs ТЕРРИТОРИЯХ РОССИИ В СООТВЕТСТВИИ С СОВРЕМЕННЫМИ РЕКОМЕНДАЦИЯМИ МКРЗ

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

Контактное лицо: А.Н. Меняйло, nrer@obninsk.com.

РЕФЕРАТ

Цель: Проведение расчетов радиационного вреда для населения, проживающего в настоящее время (в 2020 г.) на территориях России, загрязнённых ^{137}Cs после Чернобыльской аварии 1986 г.

Материал и методы: Радиационный вред рассчитывался двумя способами: по исходной методике МКРЗ и приближённо, как произведение номинального коэффициента риска НРБ-99/2009 на эффективную дозу (номинальный радиационный вред). Для расчетов по методике МКРЗ оценка эквивалентных доз проводилась с использованием дозовых коэффициентов Американского агентства по защите окружающей среды (ЕРА). Численность исследуемого населения загрязнённых территорий на начало 2020 г. составила 142676 человек (65205 мужчин и 77471 женщин). В основном, это население Брянской и Тульской областей, 85,5 % и 10 % от общей численности соответственно. Средняя накопленная эффективная доза населения составила 30,6 мЗв, а максимальная индивидуальная накопленная доза – 707 мЗв.

Результаты: В 2020 г. для мужчин в возрасте 44 года и для женщин в возрасте 55 лет номинальный радиационный вред приблизительно равен значению радиационного вреда, рассчитанного по методике МКРЗ. При этом номинальный вред существенно (до 2,3 раза) занижен для младших и завышен для старших возрастов. В 2020 г. критическими группами населения, имеющими максимальные накопленные дозы и максимальный радиационный вред, являются мужчины в возрасте 34 года женщины в возрасте 35 лет. Для этих групп населения средние накопленные эффективные дозы составили 35,3и 39,2 мЗв, а средний радиационный вред – $2,6 \times 10^{-3}$ и $4,2 \times 10^{-3}$ для мужчин и женщин соответственно. Для 11,8 % населения (8,3 % мужчин и 14,8 % женщин) индивидуальный радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ, превышает значение $3,5 \times 10^{-3}$, соответствующее предельному приросту индивидуального риска для населения за 70 лет облучения, устанавливаемому НРБ-99/2009 для нормальных условий облучения. Максимальный радиационный вред $3,9 \times 10^{-2}$ найден для женщины Красногорского района Брянской области в возрасте 37 лет при накопленной эффективной дозе 392 мЗв.

Выводы: Результаты данной работы могут быть использованы при подготовке рекомендаций органам здравоохранения по улучшению медицинского наблюдения за гражданами, проживающими на загрязнённых радионуклидами территориях, а также при разработке нормативных документов по оказанию адресной медицинской помощи лицам из групп повышенного радиационного риска с использованием методов персонализированной медицины.

Ключевые слова: пожизненный радиационный риск, НРБ-99/2009, чернобыльская авария, ^{137}Cs , население загрязнённых территорий, модели радиационного риска, номинальный коэффициент риска

Для цитирования: Меняйло А.Н., Кашеев В.В., Пряхин Е.А., Чекин С.Ю., Максюттов М.А., Туманов К.А., Иванов В.К. Прогноз радиационных рисков населения, проживающего на загрязнённых ^{137}Cs территориях России, в соответствии с современными рекомендациями МКРЗ. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):45–52

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-45-52

Введение

После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. особую опасность для населения загрязнённых радионуклидами территорий России представлял сравнительно долгоживущий радиоизотоп ^{137}Cs . На основе данных о плотностях выпадений в населённых пунктах с плотностью выпадения ^{137}Cs свыше 37 кБк/м² были реконструированы значения эффективных доз проживавшего там населения. Годовая динамика накопления доз внешнего и внутреннего облучения всего тела была реконструирована у населения 386 населённых пунктов Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областей России.

Согласно современным рекомендациям МКРЗ [1], «(156) При ретроспективной оценке доз у отдельных индивидуумов, дозы у которых могли существенно превысить пределы дозы, эффективная доза может дать первую приблизительную оценку суммарного вреда». Например, умножение номинального коэффициента риска МКРЗ [1] для населения на эффективную дозу могло бы дать такую приблизительную оценку номинального радиационного вреда.

Однако эффективные дозы всё же не рекомендуются использовать для оценок индивидуального риска или вреда: «(157) ... Дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облученных индивидуумов» [1].

Динамика эквивалентных доз в органах и тканях человека, проживающего на загрязнённых ^{137}Cs территориях, может быть рассчитана исходя из реконструированной динамики годовых эффективных доз населения от ^{137}Cs в каждом из населённых пунктов. В этом случае можно получить оценку радиационных рисков и вреда, непосредственно следуя приведённым выше рекомендациям МКРЗ [1] и соответствующим алгоритмам расчёта.

Основной целью работы является расчёт в соответствии с современными рекомендациями МКРЗ [1], пожизненных радиационных рисков и радиационного вреда для населения, проживающего в настоящее время (в 2020 г.) на загрязнённых ^{137}Cs территориях России. Сравнение с величинами номинального радиационного вреда позволит оценить консервативность этих номинальных величин, применяемых в качестве

защитных, по сравнению с современными оценками, полученными для разных половозрастных групп населения. Для российского населения такой анализ проводится впервые.

Результаты работы имеют большое значение при планировании и оптимизации оказания адресной медицинской помощи населению загрязнённых радионуклидами территорий.

Материал и методы

В 2007 г. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) в своей Публикации 103 [1] предложила математические модели для оценки радиационных рисков, основанные в основном на наблюдениях за когортой выживших после атомной бомбардировки в 1945 г. городов Хиросима и Нагасаки (когорты LSS). Особенностью этих моделей является принятие концепции линейной беспороговой модели, т.е. модели оценки зависимости доза-эффект, предполагающей, что в диапазоне малых доз риск развития рака, вызванный облучением, прямо пропорционален дозе этого облучения.

Чтобы оценить радиационный риск для здоровья человека в конкретной популяции, в Публикации 103 МКРЗ [1] рекомендуется рассчитывать значение пожизненного атрибутивного риска (LAR) с использованием моделей риска, основанных на заболеваемости, для следующих локализаций солидных раков: все солидные, пищевод, желудок, толстая кишка, печень, лёгкое, молочная железа, яичник, мочевой пузырь, щитовидная железа, остальные солидные, а также модели риска для лейкозов [2]. Также для внутреннего облучения в данной работе проводился учёт рисков развития рака кости, модели для которой нет в [1]. Для этой локализации в данной работе используются модели, предложенные НКДАР ООН [3].

В данной работе оцениваемой метрикой риска является так называемый радиационный вред. В основе этой величины лежит метрика радиационного риска – пожизненный атрибутивный риск (LAR – от англ. Lifetime Attributable Risk). Подробное описание методики расчёта LAR на основе моделей радиационных рисков МКРЗ уже было опубликовано ранее [4]. Кратко напомним основные понятия.

Пусть λ_0 – показатель фоновой заболеваемости злокачественными новообразованиями (ЗНО) или смертности от них (отношение числа случаев за один год к полному числу лиц, находящихся под наблюдением за этот год). Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на некоторую дополнительную величину $\Delta\lambda$. Согласно МКРЗ [1] радиогенный риск $\Delta\lambda$ математически может быть представлен в виде двух форм: аддитивной и мультипликативной. В аддитивной форме EAR не зависит от фоновой заболеваемости, т.е. $\Delta\lambda = EAR$, где EAR – это избыточный абсолютный риск (от англ. Excess Absolute Risk). В мультипликативной модели $\Delta\lambda = \lambda_0 \cdot ERR$, где безразмерная величина ERR есть избыточный относительный риск (от англ. Excess Relative Risk).

Два этих подхода в определении величины $\Delta\lambda$ дают разный численный результат для популяций,

отличных от тех, на которых строились модели радиационного риска. В этом случае МКРЗ рекомендует вычислять $\Delta\lambda$ как взвешенную сумму аддитивного и мультипликативного подходов [1].

Величина $\Delta\lambda$ зависит от пола, локализации новообразования, возраста при облучении, дозы облучения, возраста, на который ведётся расчёт (возраст дожития). В работе [4] подробно даны формулы, по которым следует проводить расчёт $\Delta\lambda$ согласно МКРЗ. Но там не приводится модель расчёта EAR и ERR для рака костной ткани, приведём её ниже.

Для рака костной ткани использовалась модель НКДАР 2006 [3], которая была приведена в соответствующем отчёте этой организации в табл. 52. Там даны как мультипликативная, так и аддитивная модели радиационно-обусловленной заболеваемости раком кости. Формула (1) описывает мультипликативную модель, а (2) – аддитивную.

$$ERR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(a, d) = d^2 \cdot 6,90379 \cdot 10^7 \cdot a^{-4,472}, \quad (1)$$

$$EAR_{\text{однокр.}}^{\text{НКДАР}}(d) = d^2 \cdot 9,32940 \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

Здесь d – доза облучения в Гр; a – возраст, на который рассчитывается риск.

НКДАР 2006 [3] не даёт указаний, как усреднять мультипликативную и аддитивную модель, но в данной работе мы примем вес каждой модели, равный 0,5.

Пожизненный атрибутивный риск (LAR) характеризует количество избыточных над фоновым числом раковых заболеваний или смертей, которые могут произойти в течение всей последующей жизни после облучения группы лиц, у которых одинаковы модифицирующие риск факторы (пол, возраст при облучении и др.). На индивидуальном уровне величина LAR для малых доз облучения приблизительно равна вероятности радиационно обусловленного возникновения ЗНО или смерти от него.

LAR возникновения ЗНО вычисляется путём суммирования $\Delta\lambda$ по возрастам дожития с весом вероятности здорового (без возникновения ЗНО заданной локализации) дожития до этого возраста. LAR смерти от ЗНО вычисляется путём суммирования $\Delta\lambda$ по возрастам дожития с весом вероятности дожития до этого возраста и доли летальности (определяется из отношения фоновых показателей онкосмертности к онкозаболеваемости) от заданной локализации опухоли в этом возрасте.

Также МКРЗ [1] указывает, что следует разделять полученные значения пожизненных атрибутивных рисков на величину $DDREF$. $DDREF$ – это «экспертно оцененный параметр, который объясняет обычно сниженную биологическую эффективность (на единицу дозы) радиационного воздействия малых доз и малых мощностей доз, если сравнивать ее с эффективностью высоких доз и высоких мощностей доз». МКРЗ принимает величину $DDREF$, равной 2.

Радиационный вред для каждой локализации ЗНО МКРЗ [1] определяется на основе LAR с поправками на потерянные годы жизни и качество жизни не смертельных ЗНО. Значения радиационного вреда исполь-

зуются затем для расчёта взвешивающих коэффициентов тканей и определения эффективной дозы.

В данной работе проведён расчёт радиационного вреда для населения территорий России, загрязнённых ^{137}Cs в результате Чернобыльской аварии.

Согласно рекомендациям МКРЗ [1] радиационный вред для ткани c определяется следующим образом:

$$D_T = R_{T;c} \cdot [k_c + q_c \cdot (1 - k_c)] \cdot l_c. \quad (3)$$

Здесь $R_{T;c}$ – номинальный риск заболеваемости раком локализации c ; q_c – весовой множитель (от 0 до 1), отражающий снижение качества жизни из-за серьёзного заболевания; k_c – средняя потеря времени жизни из-за заболевания в сравнении с нормальной продолжительностью жизни, выражаемая как отношение к среднему для всех раков; k_c – доля летальности.

В свою очередь коэффициент q_c определяется следующим образом:

$$q_c = q_{\min} + k_c \cdot (1 - q_{\min}). \quad (4)$$

Здесь $q_{\min}$ – минимальный весовой множитель для несмертельных раков. МКРЗ в Публикации 103 установила, что для всех локализаций опухолей, кроме рака щитовидной железы и кожи данный коэффициент принимается равным 0,1.

В [1] оценивались номинальные риски, поэтому, все приведённые коэффициенты брались усреднёнными по полу, возрасту и исследуемым популяциям. Однако для вычисления индивидуализированных рисков населения следует брать неусреднённые коэффициенты. Поэтому в данной статье вместо номинального риска заболеваемости используется LAR заболеваемости ЗНО.

Величина λ в данной работе вычисляется как отношение потерянных лет жизни вследствие радиационно-индуцированного рака заданной локализации (в терминологии НКДАР ООН [3] обозначается $YLLRIC$ – от англ. years of life lost per radiation-induced cancer) к значению $YLLRIC$, полученному по всем локализациям опухолей в целом.

Величину $YLLRIC$ можно приблизительно определить как отношение числа потерянных лет жизни в следствии возникновения ЗНО к LAR смерти от него. Более точно вместо LAR нужно брать $REID$ (от англ. risk of exposure induced death). Отличие между LAR и $REID$ несущественное для малых доз и заключается в разном способе вычисления вероятности дожития.

В итоге с учётом (3) и (4) получим следующую формулу для вычисления радиационного вреда:

$$\begin{aligned} Detriment(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) = \\ = \frac{l(s, c, e, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n)}{DDREF} \\ \cdot \sum_{a=e}^{a_{\max}} \left[S'(s, c, e, a) \cdot \delta \lambda(s, c, a, g_1, \dots, g_n, d_1, \dots, d_n) \cdot \right. \\ \cdot \left. [q_{\min} + k(s, a, c) \cdot (2 - k(s, a, c)) \cdot (1 - q_{\min})] \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

Здесь s – пол; c – локализация опухоли; n – количество облучений; $g_1, \dots, g_n$ – возраста на момент облучения; $d_1, \dots, d_n$ – соответствующие дозы облучения, полученные органом или тканью c ; $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы; e – текущий возраст человека, в котором он жив; a – возраст дожития; S' – вероятность здорового дожития от возраста e до возраста a ; $a_{\max}$ – максимальный возраст дожития. МКРЗ [1] в качестве $a_{\max}$ принимает 100 лет; k – доля летальности.

В данной работе проводилось вычисление суммарного радиационного вреда от внутреннего и внешнего облучений.

Внутреннее облучение человека характеризуется длительным облучением организма. После попадания определённого радионуклида или радионуклидной смеси в организм в возрасте e_0 , динамика ежегодных эквивалентных доз $H_T(e - e_0)$ в конкретном органе или ткани T с течением времени $t = e - e_0$ может быть получена из базы данных дозовых коэффициентов. При ежегодном поступлении радионуклидов в организм эти облучения накладываются друг на друга. Подробно описание методики вычисления LAR от внутреннего облучения при однократном поступлении в организм человека заданного радионуклида уже было ранее опубликовано [3]. Методика основана на вычислении эквивалентных доз облучения по заданному значению ожидаемой эффективной дозы с использованием базы данных дозовых коэффициентов (Зв/Бк) для заданного радионуклида и типа поступления. В работе [4] применялась база данных дозовых коэффициентов, разработанная МКРЗ [5], но в этой статье для построения базы данных дозовых коэффициентов использовался набор утилит под общим названием Dose and Risk Calculation Software (DCAL) [6]. Данный программный комплекс был разработан Американским агентством по защите окружающей среды, англ.: United States Environmental Protection Agency (EPA).

При многократном поступлении радионуклидов в организм итоговый риск вычисляется как сумма рисков от отдельных ежегодных поступлений.

В данной работе вычисления для внутреннего облучения проводились только для поступления с пищей изотопов ^{137}Cs . Программный комплекс DCAL [6] даёт значения дозовых коэффициентов для этого радионуклида на 27 лет после облучения. Ожидаемые эффективные дозы на органы и ткани внутреннего облучения преобразовывались в набор эквивалентных доз на органы и ткани. Распределение эквивалентных доз при внутреннем облучении ^{137}Cs по органам и тканям при заданной единичной ожидаемой эффективной дозе представлено на рис. 1. Из этого рисунка видно, что при поступлении в организм изотопа ^{137}Cs доза облучения распределяется по организму человека практически равномерно.

Итоговый риск для внутреннего облучения вычислялся как сумма рисков по всем органам и тканям, для которых есть модели МКРЗ (кроме «все солидные раки»), лейкозов, и модели риска для локализации кости, полученной от НКДАР ООН [3].

Уровень внешнего облучения вычислялся как сумма рисков, полученных для всех солидных раков и

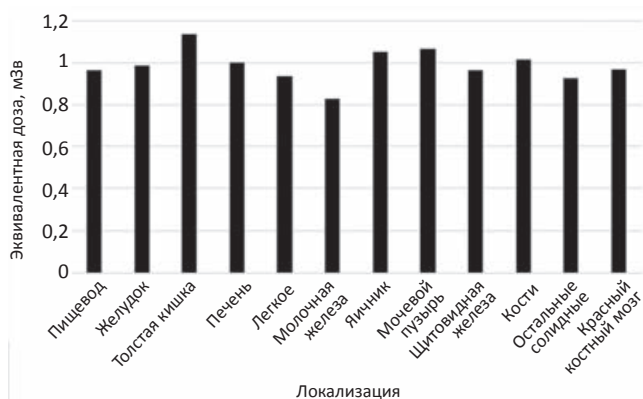


Рис. 1. Распределение эквивалентных доз при поступлении в организм взрослого человека с пищей изотопов ^{137}Cs при ожидаемой эффективной дозе, равной 1 мЗв
Fig.1. Distribution of equivalent doses when ^{137}Cs enters the body of an adult with food at an expected effective dose of 1 mSv

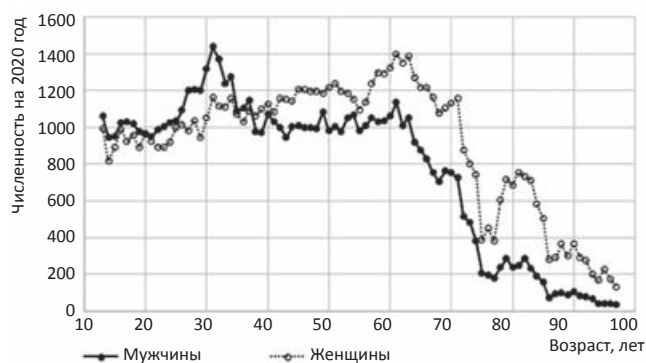


Рис. 2. Распределение численности исследуемого населения по возрасту
Fig. 2. Population distribution by age



Рис. 3. Среднее значение и верхняя граница 95 % суммарной (внешней и внутренней) эффективной дозы в зависимости от возраста исследуемого населения на начало 2020 г.
Fig. 3. Average value and upper limit 95 % of the total (external and internal) effective dose, depending on the age of the studied population at the beginning of 2020

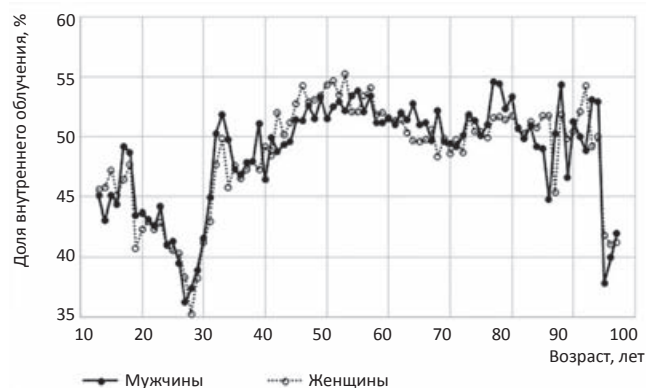


Рис. 4. Доля внутреннего облучения (% по эффективной дозе) в общем облучении исследуемого населения
Fig. 4. Share of internal exposure (% by effective dose) in the exposure of the population under study

лейкозов по эффективной дозе, с использованием соответствующих моделей риска МКРЗ.

В данной работе потенциальный (реализующийся в будущем) радиационный вред рассчитывается для облученного населения, проживающего на начало 2020 г. на загрязненных в результате Чернобыльской аварии территориях России и зарегистрированного в Национальном радиационно-эпидемиологическом регистре (НРЭР) [7]. Радиационный вред для этого населения в основном определяется внешним и внутренним облучением от радионуклида ^{137}Cs .

Численность населения загрязненных территорий на начало 2020 г. по данным НРЭР [7] составила 142676 человек (65205 мужчин и 77471 женщин). В основном, это население Брянской и Тульской областей, 85,5 % и 10 % от общей численности соответственно. Половозрастное распределение населения представлено на рис. 2.

Для реконструкции динамики эквивалентных доз в органах и тканях человека использовались годовые

дозы внешнего облучения и годовые ожидаемые эффективные дозы (ОЭД) внутреннего облучения населения от ^{137}Cs из базы данных НРЭР [7].

На рис. 3 представлена зависимость суммарной (внешней и внутренней) накопленной эффективной дозы по возрастам исследуемого населения. Максимальная индивидуальная доза составляет 707,15 мЗв.

Рис. 4 показывает, что вклад ОЭД внутреннего облучения от ^{137}Cs в суммарную эффективную дозу облучения населения является существенным, зависит от возраста и составляет, в основном, 45–55 %.

Динамика суммарной (внешней и внутренней) годовой эффективной дозы населения по календарным годам представлена на рис. 5. После 1992 г. годовые эффективные дозы снижаются до уровня менее 1 мЗв/год, который соответствует пределу доз облучения населения при нормальных условиях эксплуатации источников ионизирующего излучения [9] или остаточ-

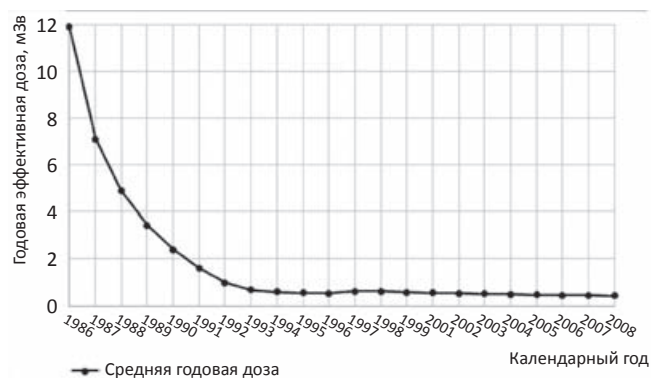


Рис. 5. Распределение по возрастам исследуемого населения среднего значения и верхней границы 95 % суммарной эффективной дозы (внешнего и внутреннего облучения)
Fig. 5. Distribution by age of the studied population of the average value and the upper limit 95 % of the total effective dose (external and internal exposure)

ной радиоактивности в среде обитания человека, при которой вмешательство малообоснованно [1].

Необходимые для расчёта фоновые (в отсутствие облучения) показатели заболеваемости и смертности облучённого населения предполагались равными соответствующим показателям населения России в 2017 г. [8].

Результаты

Расчёт радиационного вреда по методике МКРЗ [1] в данной работе проводился для всех лиц из населения загрязнённых территорий (зарегистрированных в НРЭР) с учётом их пола, возраста и динамики накопления доз с начала облучения и до 2020 г. Значения номинального радиационного вреда для каждого человека были также вычислены путём умножения но-

минального коэффициента риска НРБ [9] ($5,5 \times 10^{-2}/3\text{в}$) на величину накопленной к 2020 г. суммарной (внешней и внутренней) эффективной дозы.

На рис. 6 и 7 представлены величины радиационного вреда МКРЗ и номинального вреда НРБ-99/2009 (для мужского и женского населения соответственно), усреднённые по населению различных возрастных групп. Верхняя граница 95 % для каждой возрастной группы означает, что для 95 % населения данной возрастной группы вред не превышает этого граничного значения.

В 2020 г. максимальная доза облучения накоплена лицами возраста 34 года, всю жизнь проживавшими на загрязнённых в 1986 г. территориях. Максимальные значения радиационного вреда также достигаются в этом возрасте.

Для 95 % населения загрязнённых территорий радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ [1], не превосходит величины $7,1 \times 10^{-3}$ для мужчин и 11×10^{-3} для женщин. Верхняя граница 95 % номинального вреда для лиц старше 34 лет равна $5,5 \times 10^{-3}$ (независимо от пола). В сравнении с радиационным вредом по МКРЗ, номинальный вред по НРБ-99/2009 существенно (до 2,3 раза) занижен в возрастах младше 50 лет и завышен в старших возрастах.

Для 16868 человек (11,8 % от всего населения) (5391 (8,3 %) мужчин и 11477 (14,8 %) женщин) индивидуальный радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ [1], превышает предельное значение $3,5 \times 10^{-3}$, соответствующее предельному приросту за 70 лет облучения индивидуального пожизненного риска для населения ($5,0 \times 10^{-5}$ от облучения в течение года [9]).

Максимальное значение радиационного вреда, рассчитанного по методике МКРЗ [1], равно $5,87 \times 10^{-2}$, найдено для женщины в возрасте 37 лет, проживавшей всю жизнь в Красногорском районе Брянской области. Накопленная доза при этом составила 392,3 мЗв,

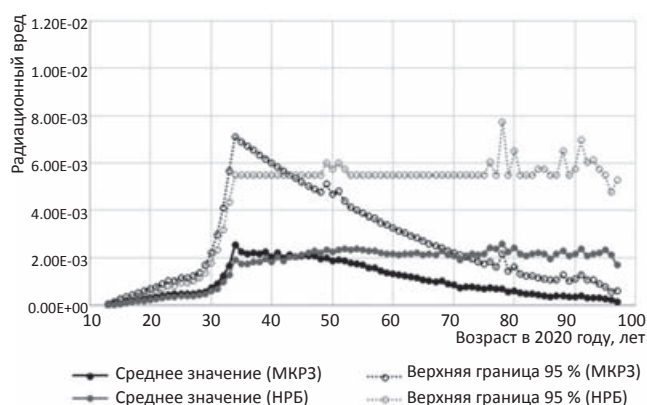


Рис. 6. Средние значения и верхние границы 95 % радиационного вреда, рассчитанные по методике МКРЗ [1], а также соответствующие значения номинального вреда НРБ-99/2009 [3] для различных возрастных групп мужского населения загрязнённых территорий
Fig. 6. Average values and upper limits 95 % of radiation harm calculated by the ICRP method [1], as well as corresponding values of nominal harm according to RSS-99/2009 [3] for different age groups of the male population of contaminated territories

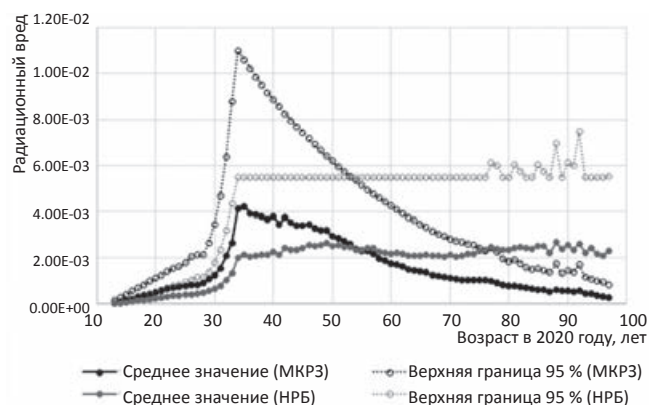


Рис. 7. Средние значения и верхние границы 95 % радиационного вреда, рассчитанные по методике МКРЗ [1], а также соответствующие значения номинального вреда НРБ-99/2009 [3] для различных возрастных групп женского населения загрязнённых территорий
Fig. 7. Average values and upper limits 95 % of radiation harm calculated by the ICRP method [1], as well as corresponding values of nominal harm according to RSS-99/2009 [3] for different age groups of the female population of contaminated territories

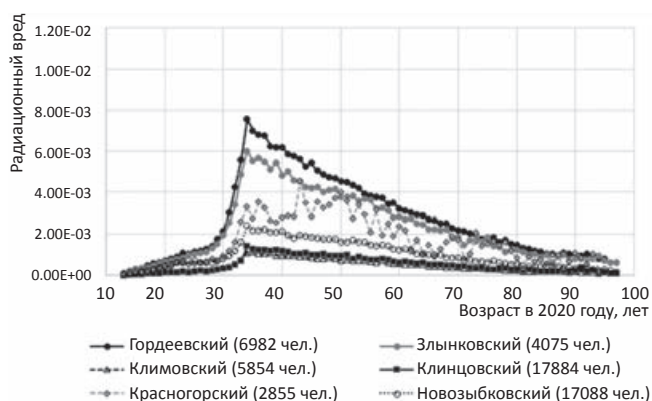


Рис. 8. Радиационный вред (согласно методике МКРЗ) для мужского населения, проживающего в шести загрязнённых районах Брянской области

Fig. 8. Radiation harm (according to the ICRP methodology) for the male population living in six districts of the Bryansk region



Рис. 9. Радиационный вред (согласно методике МКРЗ) для женского населения, проживающего в шести загрязнённых районах Брянской области

Fig. 9. Radiation harm (according to the ICRP methodology) for the female population living in six districts of the Bryansk region

что существенно меньше максимальной накопленной дозы 707,15 мЗв для исследуемого населения.

Поскольку номинальный вред по НРБ-99/2009 не зависит от пола и возраста, его максимальное значение соответствует максимальной накопленной дозе (для двух женщин в возрасте 56 и 74 года из того же Красногорского района): $5,5 \times 10^{-3} \text{ Зв}^{-1} \times 0,70715 \text{ Зв} = 3,89 \times 10^{-2}$.

Наибольшую дозу облучения имеет население, проживающее в шести загрязнённых районах Брянской области: Гордеевский, Злынковский, Климовский, Клиновский, Красногорский и Новозыбковский. Население этих районов составляет 82,1 % от всего исследуемого населения. На рис. 8 и 9 приведены средние значения радиационного вреда МКРЗ [1] для мужского и женского населения этих районов соответственно. Из этих рисунков видно, что наибольший потенциальный радиационный вред имеют жители Гордеевского района. Этот вред приближается, а в некоторых случаях даже выше верхней границы 95 % вреда для всего исследуемого населения.

Обсуждение

Неопределённость оценки потенциального радиационного вреда для облучённого населения связана, в основном, с неопределённостью оценки эквивалентных доз облучения в органах и тканях [6], с возможностью выбора различных моделей радиационных рисков, со статистической неопределённостью их параметров, неопределённостью фоновых показателей заболеваемости и смертности исследуемого населения [2, 11].

Общей особенностью международных моделей радиационного риска является то, что они в основном идентифицировались по данным японской когорты лиц, облучённых в 1945 г. (когорты LSS). Для прогноза радиационных рисков населения России от внутреннего (не равномерного по тканям и органам) облучения требуется идентификация моделей радиационных рисков по отдельным локализациям ЗНО на россий-

ских когортах облучённых лиц. Соответствующие радиационно-эпидемиологические исследования проводятся в НРЭР [12, 13], но набор идентифицированных моделей пока не достаточен для прогноза рисков от внутреннего облучения с той степенью подробности, как это возможно при использовании набора моделей МКРЗ [1] или НКДАР ООН [3].

В представленной работе рассмотрен метод расчёта радиационного вреда на основе моделей радиационных рисков, рекомендованных МКРЗ [1]. В отчётах НКДАР ООН [3] и ВОЗ [10] изложены другие модели и методы расчёта радиационных рисков, которые отличаются от моделей МКРЗ [1] как расчётными формулами, так и принятым перечнем локализаций ЗНО.

Набор моделей ВОЗ [10] по локализациям ограничен щитовидной железой, молочной железой и моделью для лейкозов, поэтому он не пригоден для расчёта радиационных рисков человека от внутреннего облучения ^{137}Cs , при котором в разной мере облучаются все органы и ткани. В наборе моделей риска НКДАР ООН [3] по локализациям отсутствует модель для рака яичника, но представлены модели для рака кости, мозга и немеланогенного рака кожи, которые отсутствуют в наборе моделей МКРЗ [1].

Доза облучения костей от ^{137}Cs при его поступлении в организм человека, как показано на рис. 1, мало отличается от доз облучения других органов и тканей, и суммарный радиационный риск для всего организма, рассчитанный только в рамках набора моделей МКРЗ [1], был бы заниженным. Поэтому в данной работе влияние внутреннего облучения от ^{137}Cs на развитие рака кости учитывалось по соответствующей модели НКДАР ООН [3].

Существенным отличием расчёта пожизненных радиационных рисков МКРЗ [1] от расчётов, используемых НКДАР ООН [3] и ВОЗ [10], является применение параметра $DDREF = 2$, в два раза снижающего радиационные риски от их исходных, рассчитанных непосредственно по моделям, значений. Оценка радиационных рисков по методу МКРЗ [1] являются менее

консервативной, чем оценка по методам НКДАР ООН [3] или ВОЗ [10], в которых *DDREF* не используется. Однако в уже сложившейся международной практике разработки систем норм и правил радиационной безопасности, именно модели риска МКРЗ используются для вычисления коэффициентов номинального риска и последующего обоснования дозовых нормативов [9, 14]. Поэтому и в данной работе радиационный вред для населения от загрязнений ^{137}Cs вычислялся в основном с использованием моделей риска МКРЗ [1].

При прогнозе пожизненных радиационных рисков использовались фоновые показатели заболеваемости и смертности российской населения за 2017 г. [7], которые, однако, не будут оставаться постоянными на протяжении временного периода прогноза рисков (порядка 100 лет). Данный подход может занижать прогноз радиационных рисков и потенциального радиационного вреда, если наблюдавшаяся до сих пор тенденция увеличения онкозаболеваемости со временем сохранится и в будущем.

Величина неопределённости полученных в данной работе оценок потенциального радиационного вреда требует отдельного исследования и разработки соответствующих программных средств расчёта.

Заключение

В работе проведены расчеты радиационного вреда для населения, проживающего в настоящее время (в 2020 г.) на территориях России, загрязнённых ^{137}Cs после Чернобыльской аварии. Радиационный вред рассчитывался двумя способами: по исходной методике МКРЗ [1], и приближённо как произведение номинального коэффициента риска по НРБ-99/2009 [9] на эффективную дозу (номинальный радиационный вред).

В 2020 г. для мужчин в возрасте 44 года и для женщин в возрасте 55 лет номинальный радиационный

вред приблизительно равен значению радиационного вреда, рассчитанного по методике МКРЗ [1]. При этом номинальный вред существенно (до 2,3 раза) занижен для младших и завышен для старших возрастов.

В 2020 г. критическими группами населения, имеющими максимальные накопленные дозы и максимальный радиационный вред, являются мужчины в возрасте 34 года и женщины в возрасте 35 лет. Для этих групп населения накопленные средние эффективные дозы составили 35,3 мЗв и 39,2 мЗв, а средний радиационный вред – $2,6 \times 10^{-3}$ и $4,2 \times 10^{-3}$ для мужчин женщин соответственно.

По районам проживания самые высокие показатели как дозы облучения, так и радиационного вреда, наблюдаются для шести районов Брянской области: Гордеевский, Злынковский, Климовский, Клиновский, Красногорский, Новозыбковский.

Для 11,8 % населения (для 8,3 % мужчин и 14,8 % женщин) индивидуальный радиационный вред, рассчитанный по методике МКРЗ [1], превышает предельное значение $3,5 \times 10^{-3}$, соответствующее предельному приросту за 70 лет облучения индивидуального пожизненного риска для населения ($5,0 \times 10^{-5}$ от облучения в течение года [9]) при нормальных условиях облучения. Максимальные радиационный вред $3,9 \times 10^{-2}$ найден для женщины Красногорского района Брянской области в возрасте 35 лет, при накопленной эффективной дозе 392 мЗв.

Результаты данной работы могут быть использованы при подготовке рекомендаций органам здравоохранения по улучшению медицинского наблюдения за облученными гражданами, проживающими на загрязнённых радионуклидами территориях, а также при разработке нормативных документов по оказанию адресной медицинской помощи лицам из групп повышенного радиационного риска с использованием методов персонализированной медицины.

Forecast of Radiation Risks of the Population in the Contaminated ^{137}Cs Territories of Russia, in Accordance with Current ICRP Recommendations

A.N. Menyajlo, V.V. Kashcheev, E.A. Pryakhin, S.Yu. Chekin, M.A. Maksioutov, K.A. Tumanov, V.K. Ivanov

A. Tsyb Medical Radiological Research Center — branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Kaluga region

ABSTRACT

Purpose: Calculations of radiation detriment to the population currently living (in 2020) in the territories of Russia contaminated with ^{137}Cs after the Chernobyl accident in 1986.

Material and methods: Radiation detriment was calculated in two ways: according to the original ICRP method, and approximate calculation as the product of the nominal risk factor of RSS-99/2009 by the effective dose (nominal radiation detriment). For ICRP calculations, equivalent doses were estimated using the dose coefficients of the US Environmental Protection Agency (EPA). The number of the studied population at the beginning of 2020 was 142676 people, 65205 men and 77471 women. This is mainly the population of the Bryansk region and Tula region, 85.5 % and 10 % of the total population, respectively. The average accumulated effective dose of the population was 30.6 mSv, and the maximum individual accumulated dose was 707 mSv.

Results: In 2020, for men at the age of 44 and for women at the age of 55, the nominal radiation detriment is approximately equal to the value of radiation detriment calculated using the ICRP method. At the same time, the nominal detriment is significantly (up to 2.3 times) underestimated for younger and overestimated for older ages. In 2020, the critical population groups with the highest accumulated doses and maximum radiation detriment are men aged 34 and women aged 35. For these population groups, the average accumulated effective doses were 35.3 mSv and 39.2 mSv, and the average radiation detriment was 2.6×10^{-3} and 4.2×10^{-3} , for

men and women, respectively. For 11.8 % of the population (8.3 % of men and 14.8 % of women), the individual radiation detriment calculated using the ICRP method exceeds the value of 3.5×10^{-3} , which corresponds to the maximum increase in individual risk for the population over 70 years of exposure, established by RSS-99/2009 for normal exposure conditions. The maximum radiation detriment of 3.9×10^{-2} was found for a woman of the Krasnogorsky district of the Bryansk region at the age of 37 years, with an accumulated effective dose of 392 mSv.

Conclusion: The results of this work can be used in preparing recommendations to health authorities on improving medical supervision of exposed citizens living in areas contaminated with radionuclides, as well as in developing regulatory documents for the provision of targeted medical care to people from high radiation risk groups using personalized medicine methods.

Key words: lifetime radiation risk, RSS-99/2009, Chernobyl accident, ^{137}Cs , population of contaminated areas, radiation risk models, nominal risk coefficient

For citation: Menyajlo AN, Kashcheev VV, Pryakhin EA, Chekin SYu, Maksioutov MA, Tumanov KA, Ivanov VK. Forecast of Radiation Risks of the Population Living in the Contaminated ^{137}Cs Territories of Russia, in Accordance with Current ICRP Recommendations. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):45-52. (In Russ.).

DOI: 10.102737/1024-6177-2020-65-3-45-52

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. Под ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: 2009. 312 с. URL: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (дата обращения 13.04.2020 г.). [ICRP Publication 103. Ed by Kiselev MF, Shandala NK, Moscow. 2009. 312 p. Available from: http://www.icrp.org/docs/P103_Russian.pdf (cited 13.04.2020). (In Russ.).]
2. Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, et al. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987. *Radiat Res.* 1994;137 (Suppl.):68–97.
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2006 Report Vol. I, Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York: 2008.
4. Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Максютлов М.А., Корело А.М., Туманов К.А. и др. Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки. *Радиация и риск.* 2018;27(1):5–21. [Menyajlo AN, Chekin SYu, Kashcheev VV, Maksioutov MA, Korelo AM, Tumanov KA, et al. Lifetime attributable risks from external and internal exposure to radiation: method for estimating. *Radiation and Risk.* 2018;27(1):5–21. (In Russ.).]
5. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0, official website. URL: <http://www.icrp.org/page.asp?id=402> (дата обращения 19.05.2020).
6. DCAL Software and Resources. URL: <https://www.epa.gov/radiation/dcal-software-and-resources> (дата обращения 19.05.2020).
7. Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет. Под ред. В.К. Иванова, А.Д. Каприна. М.: ГЕОС, 2015. 450 с. [Health effects of Chernobyl: Prediction And Actual Data 39 Years after the Accident. Ed. by Ivanov VK, Kaprin AD. Moscow. 2015. 450 p. (In Russ.).]
8. Злокачественные новообразования в России в 2017 году (заболеваемость и смертность). Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2018. [Malignant neoplasms in Russia in 2017 (morbidity and mortality). Ed by Kaprin AD, Starinskiy VV, Petrova GV. Moscow. 2018. (In Russ.).]
9. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [Radiation safety standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. SP2.6.1.252309. Moscow. 2009. 100 p. (In Russ.).]
10. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. World Health Organization, 2013.
11. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Radiat Res.* 2007;168:1–64.
12. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Максютлов М.А., Туманов К.А., и др. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть I: заболеваемость солидными раками. *Радиация и риск.* 2019;28(4):16–30. [Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksioutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992–2017. Part I: Solid cancer incidence. *Radiation and Risk.* 2019;28(4):16–30. (In Russ.).]
13. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Максютлов М.А., Туманов К.А., и др. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть II: смертность от солидных раков. *Радиация и риск.* 2020;29(1):18–31. [Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksioutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of Russian liquidators of the Chernobyl accident for the period 1992–2017. Part II: Solid cancer mortality. *Radiation and Risk.* 2020;29(1):18–31. (In Russ.).]
14. Радиационная защита и безопасность источников излучения. Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 311 с. [Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. International Basic Safety Standards, GSR Part 3 (Interim), General Safety Requirements. Vienna: IAEA; 2015. 311 p. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 22.06.2020. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 22.06.2020. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

М.С. Петросян, Л.С. Нерсесова, Е.М. Каралова, А.С. Аветисян, Л.О. Аброян, Л.А. Акопян,
М.Г. Газарянц, Ж.И. Акопян

ПОСТЛУЧЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 900 МГц В ПЕЧЕНИ КРЫС

Институт молекулярной биологии НАН Республики Армении, Ереван, Армения

Контактное лицо: Нерсесова Людмила Степановна, l.nersesova@yahoo.com

РЕФЕРАТ

Цель: Исследование изменений активности креатинкиназы (КК) печени и сыворотки крови крыс и ядерно-ядрышкового аппарата гепатоцитов, индуцированных действием низкоинтенсивного электромагнитного излучения с параметрами 900 МГц и плотностью потока энергии 25 мкВт/см², характерными для мобильных телефонов.

Материал и методы: Опыты проводили на белых беспородных крысах-самцах 6-месячного возраста, массой тела 180–200 г. В качестве источника излучения с частотой 900 МГц использовали генераторный блок панорамного измерителя Х1-42. Активность КК в сыворотке крови и экстрактах печени определяли спектрофотометрически по накоплению свободного креатина. На основании данных по содержанию ДНК в гепатоцитах крыс, соотнесенных к эталону, выявляли распределение гепатоцитов по плоидности и определяли соотношение зу- и анэуплоидных клеток.

Результаты: Показано, что 2-часовое однократное общее облучение крыс вызывает более выраженные изменения уровня активности как печеночной, так и сывороточной КК, чем равноценное по времени дробное облучение: при этом фермент проявляет значительные адаптационные свойства. Уменьшение среднего содержания ДНК ядер и ядрышек и среднего числа ядрышек на ядро, а также увеличение количества безядрышковых ядер после однократного радиочастотного облучения свидетельствует об угнетении транскрипционной активности гепатоцитов. В то же время пострadiационное увеличение количества гиподиплоидных клеток, половину из которых составляют безядрышковые гепатоциты, а также возрастание количества триплоидных клеток, сопровождающееся уменьшением числа тетраплоидных гепатоцитов и исчезновением гипертетраплоидных гепатоцитов, свидетельствуют о гибели значительного количества гепатоцитов.

Заключение: Активность КК печени крыс чувствительна к действию как однократного, так и дробного облучения. При этом биологический эффект однократного облучения более выражен. Динамика пострadiационных изменений, происходящих в популяции гепатоцитов при однократном облучении крыс свидетельствует об угнетении транскрипционной активности гепатоцитов и гибели значительной части их.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, низкая интенсивность, частота 900 МГц, однократное и дробное облучение, креатинкиназа, ядерно-ядрышковый аппарат, печень, сыворотка крови, крысы

Для цитирования: Петросян М.С., Нерсесова Л.С., Каралова Е.М., Аветисян А.С., Аброян Л.О., Акопян Л.А., Газарянц М.Г., Акопян Ж.И. Постлучевые эффекты низкоинтенсивного электромагнитного излучения с частотой 900 МГц в печени крыс. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):53-58.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-53-58

Введение

За последние 25 лет произошло глобальное изменение электромагнитной обстановки на Земле, связанное с широчайшим использованием населением беспроводной связи, что значительно изменило ситуацию искусственного загрязнения окружающей среды электромагнитными полями (ЭМП). Это нашло свое выражение в широком потоке соответствующих экспериментальных и теоретических работ из различных лабораторий по всему миру, очередной критический обзор которых сделан недавно в работах Ю.Г. Григорьева и соавт. [1, 2]. Так, на конкретных примерах рассмотрены факты относительного увеличения риска развития опухолей мозга после длительного периода активного использования сотовых телефонов. Впервые за весь период цивилизации в группу риска включены дети. Согласно выводам Международного агентства по изучению раковых заболеваний (IARC), ЭМП мобильных телефонов отнесены к классу 2В – агентам, потенциально канцерогенным для человека [3]. В то же время ряд ученых и международных организаций [2, 4] до сих пор считают, что для этого нет абсолютных доказательств. Таким образом, в настоящее время отсутствует единый подход к оценке опасностей для здоровья воздействия ЭМИ, связанного с мобильной связью; недооценена возможность развития долгосрочных неблагоприятных последствий. Кроме того, технические решения по созданию новых типов беспроводной связи опережают научные ис-

следования по оценке опасности для населения этих новых решений. В связи с этим цитируемые выше авторы характеризуют сложившуюся сегодня ситуацию как электромагнитный хаос в окружающей среде [1, 2].

Электромагнитное излучение (ЭМИ) одновременно действует на все клетки и ткани организма, что на клеточном уровне выражается, в частности, в пострadiационных изменениях активности ключевых ферментов клеточного метаболизма. Тесная близость антенны используемых мобильных телефонов к абдоминальным органам, в частности, к печени, повышает риск поражения этого органа. Кроме того, печень – важнейший метаболический орган и основной орган детоксикации, отличается высокой чувствительностью к действию вредных экологических факторов. Как известно, креатинкиназа (КК), ключевой фермент энергетического обмена клетки, катализирующий обратимую реакцию переноса фосфорильного остатка с креатинфосфата (КФ) на АДФ, проявляет высокую чувствительность к окислительному стрессу как на посттранскрипционном, так и на генном уровнях [5–7]. Будучи гарантом поддержания энергетического гомеостаза клетки, КК вовлечена в немедленную ответную реакцию клетки на воздействие стресса, приводящего ее к энергетическому истощению. В связи с этим данный фермент, а также уровни отношений КФ/АТФ и КФ/Кр принято рассматривать как показатель энергетического статуса клетки [5]. Вместе с тем, одними из показателей функциональных изменений, проис-

ходящих в клетках при действии различных стрессорных факторов, являются изменения содержания ДНК и состояния ее ядрышкового аппарата, которые могут объективно отражать степень напряженности рибосомального синтеза и пролиферативной активности гепатоцитов [4, 8, 9]. Ранее нами было исследовано влияние сублетальных доз рентгеновского излучения на активность ряда ключевых ферментов клеточного метаболизма, в том числе и КК и на ядерно-ядрышковый аппарат гепатоцитов; наиболее радиочувствительным и адаптабельным ферментом оказалась КК, а пострадиационные изменения содержания ДНК в ядрышках гепатоцитов, площади и периметра ядрышек, а также среднего числа ядрышек на ядро носили компенсаторно-адаптивный характер и, в целом, свидетельствовали о возрастании транскрипционной активности гепатоцитов [10].

Исходя из высокой радиочувствительности КК и из того, что ядерно-ядрышковый аппарат является первичной мишенью радиационного поражения, целью настоящей работы явилось исследование изменений активности КК печени и сыворотки крови крыс и ядерно-ядрышкового аппарата гепатоцитов, индуцированных действием низкоинтенсивного ЭМИ с параметрами 900 МГц и плотностью потока энергии 25 мкВт/см², характерными для мобильных телефонов.

Материал и методы

Опыты проводили на белых беспородных крысах-самцах 6-месячного возраста с массой тела 180–200 г, содержавшихся в строго стандартных условиях. Экспериментальные животные были разделены на две опытные группы, каждая по 20 крыс, и на две контрольные группы, каждая по 12 крыс. В первой опытной группе крыс подвергали облучению однократно в течение 2 ч, во второй группе – кратковременному дробному облучению в течение 4 дней по 0,5 ч ежедневно, таким образом, набирая 2-часовое воздействие ЭМИ из четырех отдельных сеансов облучения. Клетку с соответствующей каждой опытной группе контрольной группой крыс помещали под выключенным генератором. Пострадиационные эффекты изучали через 1, 5, 10 и 20 сут путем отбора из 20 облученных крыс на каждый срок подгрупп по 5 опытных крыс и по 3 соответствующих им контрольных животных.

В качестве источника излучения использовали генераторный блок панорамного измерителя Х1-42 с мощностью на выходе 8 мВт, диапазоном генерируемых частот 0,1–1250 МГц, позволявший в цифровой индикации с большой точностью устанавливать как центральную частоту, так и полосу генерации во всем диапазоне перестройки генератора. Излучателем служила компактная (117 × 120 мм) антенна Минковского фрактального типа нового поколения. Резонансная частота антенны была рассчитана таким образом, чтобы ее центральная частота соответствовала 900 МГц. Общее облучение крыс проводили в изолированном помещении, предназначенном для подобных опытов. Во время сеанса облучения крысы имели возможность свободного перемещения в клетке.

Декапитацию животных проводили после эфирного наркоза. Кровь после свертывания центрифугировали в рефрижераторной центрифуге при 800 г в

течение 20 мин и полученную сыворотку использовали в тот же день для определения активности ферментов. Печень тщательно отмывали от крови охлажденным физиологическим раствором и гомогенизировали в экстрагирующем растворе 0,1 моль/л HCl, pH 7,2, содержащем 5 ммоль/л дитиотреитола и 1 ммоль/л этилендиаминтетраацетата. Экстракты, полученные после центрифугирования гомогенатов при 23000 g в течение 30 мин, использовали для определения активности ферментов.

Активность КК в сыворотке крови и экстрактах печени определяли спектрофотометрически по накоплению свободного креатина [11] и выражали в единицах мкмоль использованного субстрата или полученного продукта на 1 г влажной ткани в мин, а для сыворотки крови – в мкмоль/л/мин. Поскольку величины уровней активностей фермента в контрольных подгруппах при обоих режимах облучения статистически достоверно не отличались друг от друга, для удобства восприятия диаграммы нашли возможным дать объединенный контроль. Для наглядного изображения рассчитанные средние и их стандартные отклонения для уровней активности КК и содержания креатина (Кр) на графиках выражены в % по отношению к контрольному уровню. Для статистической обработки данных использована программа SPSS. Характер распределения значений полученных данных определен методом Колмогорова – Смирнова. Сравнительный анализ проводили с использованием непараметрического теста Манна – Уитни. Различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Одновременно с приготовлением экстрактов печени и сыворотки крови готовили отпечатки печени. Для определения ультраструктурных изменений и содержания ДНК в ядрах гепатоцитов на предметных стеклах готовили отпечатки ядер, которые затем фиксировали в 96 %-этиловом спирте в течение 30 мин [12]. Препараты окрашивали по общепринятой методике реактивом Шиффа по Фельгену: гидролиз в 5 н HCl в течение 60 мин при 22 °C [13]. Определение количества ДНК в условно сравнимых единицах при длине волны 575 нм и цитоморфометрию ядер проводили телевизионным методом на сканирующем анализаторе изображений (увеличение 100 × 1,30), созданном на базе микроскопа-фотометра SMP 05 (OPTON, ФРГ), оснащенный компьютером. В связи с этим перед сканированием оконтуривали изображения ядер и каждого из ядрышек в тех клетках, где они выявлялись. Измерения в каждом случае производили в 100 ядрах. В качестве диплоидного эталона ДНК использовали лимфоциты периферической крови здоровых крыс. На основании данных по содержанию ДНК в гепатоцитах крыс, соотношенных к эталону, выявляли распределение гепатоцитов по плоидности в % и определяли соотношение эу- и анэуплоидных клеток. Значения исследованных параметров выражали в условных единицах [12]. Значимость различий средних величин между контрольными и опытными группами оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента.

Результаты

КК – ключевой фермент энергетического обмена клеток, обеспечивающий поддержание на постоянном

уровня содержания АТФ. Одной из особенностей КК как фермента является его способность тонко реагировать на структурно-функциональные изменения в клетке, что проявляется в изменениях активности КК и ее изоферментного состава. Эта способность КК лежит в основе широкого применения этого фермента в качестве биохимического маркера в клинической практике [5].

Данные, представленные на рис. 1, показывают, что при однократном длительном облучении, в отличие от равноценного по длительности дробного облучения, ответная реакция печеночной КК на воздействие излучения имеет место быть уже в первые сутки после облучения в виде повышения уровня активности фермента более чем в 1,5 раза. При этом повышение уровня активности фермента продолжается вплоть до 20-х пострадиационных суток и, дополнительно к этому, в последние сроки исследования определяется значительное повышение активности сывороточной КК – в 2–2,5 раза по сравнению с контрольным уровнем. При дробном режиме облучения только на 5-ые сут намечается тенденция к повышению КК-активности печени, которое становится достоверным и значимым по величине лишь на 10-е сут – в 2,5 раза, а к 20-м сут определяется достоверное снижение уровня активности фермента с тенденцией возвращения к контрольному уровню. Следует отметить, что указанное повышение активности печеночного фермента на 10-ые сут сопровождается повышением активности и сывороточной КК.

Известно, что в гепатоцитах после облучения наступает ряд ультраструктурных нарушений, которые приводят к функциональному дисбалансу органа [8, 9]. В связи с этим методами цитоморфометрии и цитоспектрофотометрии в тех же группах крыс оценивали состояние ядерно-ядрышкового аппарата гепатоцитов путем сравнения распределений ядер гепатоцитов крыс по классам плоидности и морфометрическим параметрам клеточных ядер и ядрышек. Как видно из табл. 1, среднее содержание ДНК в ядрах и ядрышках гепатоцитов крыс в контрольной группе достоверно выше, чем в пострадиационных группах. При этом небольшие постлучевые изменения в площадях ядер гепатоцитов носят недостоверный характер, тогда как достоверность различий площадей ядрышек между контрольной и опытными группами равна $p < 0,05$ – $0,001$. При этом сокращается и периметр ядрышек.

Достоверно уменьшается и число ядрышек на ядро в опытных группах по сравнению с контролем,

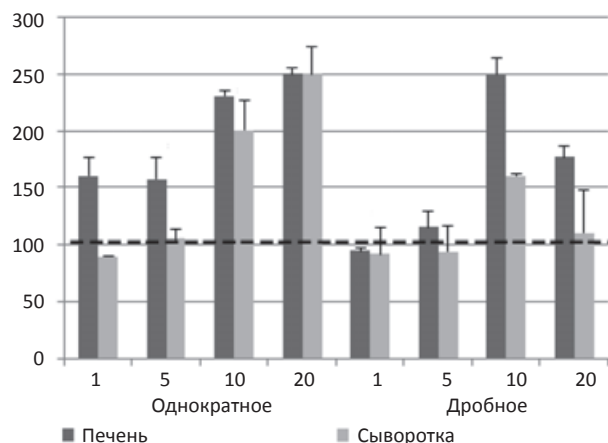


Рис. 1. Активность КК (%) в печени и сыворотке крови крыс в разные сроки после воздействия электромагнитного излучения с частотой 900 МГц при однократном и дробном режимах облучения

Fig. 1. Activity of KAT (%) in the liver and blood serum of rats at different times after exposure to electromagnetic radiation with a frequency of 900 MHz under single and fractional irradiation modes

что особенно выражено на 20-е пострадиационные сутки (табл. 2). Таким образом эти данные свидетельствуют о развитии процесса постлучевого подавления транскрипционной активности гепатоцитов.

Применение метода количественной цитохимии позволило получить гистограммы распределения ядер гепатоцитов, окрашенных по Фельгену по плоидности, дискретные пики которых соответствуют определенным классам плоидности (рис. 2). Сравнительный анализ данных, представленных на рис. 2, свидетельствует о значительных различиях в распределении ядер гепатоцитов по плоидности между контрольной и опытными группами. Полученные в контроле результаты соответствуют литературным данным [8, 9], где, как и в нашем случае, подавляющее число клеток (около 93 %), составляют эуплоидные гепатоциты. Из них, согласно полученным данным, около 52 % популяции приходится на диплоидные гепатоциты, 41 % составляют тетраплоидные клетки, октаплоидные ядра полностью отсутствуют, а гипертетраплоидные клетки составляют всего 1,5 % популяции гепатоцитов. Примерно 7,0 % приходится на анеуплоидные ядра, среди которых 2 % составляют гиподиплоидные гепатоциты. Число синтезирующих ДНК клеток с “промежуточными” между 2с и 4с и между 4с и 8с значениями достаточно низкое (около 4,5 %), и наличие их обусловлено скорее всего

Таблица 1

Среднее содержание ДНК в ядрах и околядрышном хроматине, площадь и периметр ядер и ядрышек клеток печени крыс контрольных и пострадиационных групп
The average content of DNA in nuclei and paratid chromatin, the area and perimeter of nuclei and nucleoli of liver cells in rats of control and radiation groups

Группы	Ядро			Ядрышко		
	ДНК	Площадь	Периметр	ДНК	Площадь	Периметр
Контроль n = 129	93,4 ± 3,1	46,9 ± 1,4	15,3 ± 0,3	4,1 ± 0,2	2,7 ± 0,1	3,3 ± 0,2
5-е сут после радиации n = 102	81,7 ± 3,0*	44,1 ± 1,5	14,5 ± 0,3	3,0 ± 0,3*	2,1 ± 0,2*	2,5 ± 0,2*
10-е сут после радиации n = 100	85,6 ± 3,1	48,4 ± 1,4	15,3 ± 0,3	3,4 ± 0,4	2,1 ± 0,2**	2,8 ± 0,2
20-е сут после радиации n = 100	66,0 ± 2,4*	44,2 ± 1,2	15,0 ± 0,3	1,8 ± 0,2*	1,5 ± 0,1**	2,1 ± 0,2**

Примечание: * – достоверное различие с контролем ($p < 0,05$); ** – достоверное различие с контролем ($p < 0,001$)

Таблица 2

Распределение гепатоцитов по числу ядрышек и среднее число ядрышек на ядро в контрольной и в пострadiационных группах крыс (в %)**Distribution of hepatocytes by the number of nucleoli and the average number nuclei per nucleus in the control and radiation groups of rats (in %)**

Опытные группы	0 ядрышек	1 ядрышко	2 ядрышка	Среднее число ядрышек/ядро
Контроль	13,5 ± 1,4	71,0 ± 5,1	15,5 ± 1,4	1,0 ± 0,1
5-ые сут после радиации	37,6 ± 3,5	54,7 ± 3,3*	6,1 ± 0,6*	0,8 ± 0,1*
10-ые сут после радиации	24,3 ± 2,2	56,5 ± 3,8*	17,2 ± 1,6	0,9 ± 0,1
20-ые сут после радиации	35,7 ± 3,2	59,3 ± 4,1	4,0 ± 0,5*	0,7 ± 0,1*

Примечание: * – достоверное различие с контролем ($p < 0,05$)

прохождением клетками S-фазы клеточного цикла или задержкой во второй ее половине. При этом 13,5 % приходится на безядрышковые клетки, несколько больше (около 15 %) составляют двуядрышковые гепатоциты, а 71 % ядер представлены одноядрышковыми гепатоцитами (табл. 2).

Уже на 5-е сут после однократного 2-часового облучения выявляются серьезные различия в популяции гепатоцитов опытных крыс: более чем в 13 раз увеличивается число гиподиплоидных клеток, составляя 31 % популяции, среди которых на безядрышковые гиподиплоидные гепатоциты приходится 17,5 %. В 2,5 раза увеличивается число тетраплоидных безядрышковых клеток и во столько же раз уменьшается число двуядрышковых гепатоцитов. На 10-е сут после облучения общая тенденция, изменений в популяции по сравнению с контролем сохраняется, но они менее выражены, чем на 5-е сут. К 20-м сут на гиподиплоидные клетки приходится около половины популяции гепатоцитов, а около 40 % составляют триплоидные клетки и всего 14 % приходится на долю эуплоидных гепатоцитов.

Обсуждение

Радиочастотное излучение, испускаемое мобильными телефонами, индуцирует в клетках образование свободных радикалов кислорода, которые вызывают перекисное окисление липидов и изменения в антиоксидантной системе, ведущие к оксидативному стрессу. Как следствие, повреждаются такие компоненты клеток, как ферменты, ДНК, липиды [1, 4]. Эффект оксидативного стресса зависит от силы его выраженности. Клетки могут вернуться в исходное состояние при небольших нарушениях. Однако более выраженный оксидативный стресс вызывает клеточную смерть. Известно, что биохимическим критерием повреждения ферментов является утрата присущей им активности. Исходя из того, что окончательное проявление биологического поражения ферментных молекул может растягиваться на дни, в качестве пострadiационных сроков исследования были выбраны 1-е, 5-е, 10-е и 20-е сут.

Следует отметить, что КК выявлена как один из наиболее чувствительных к окислительному стрессу ферментов, причем как на посттранскрипционном, так и на геном уровнях [6, 7]. Как и следовало ожидать, учитывая аналогичные механизмы этиопатогенеза рентгеновского и радиочастотного излучений, выражающиеся в развитии последствий окислитель-

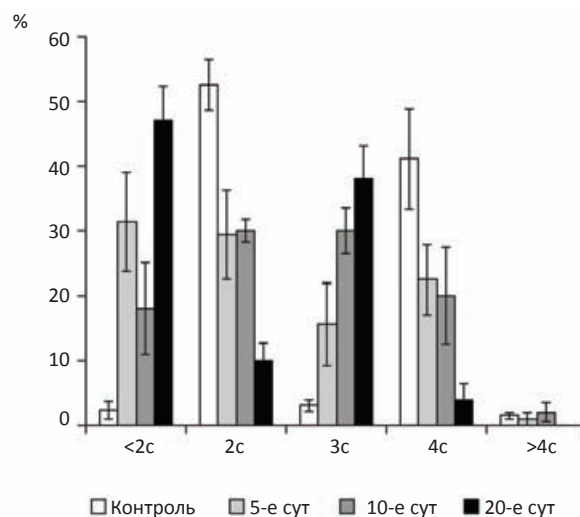


Рис. 2. Распределение ядер гепатоцитов по плоидности в контрольных и опытных образцах гепатоцитов (в каждой группе $n = 5$), подвергнутых воздействию общего однократного ЭМИ с частотой 900 МГц (в %)

Fig. 2. Distribution of hepatocyte nuclei by ploidy in control and experimental samples of hepatocytes (in each group $n = 5$) exposed to a common single EMP with a frequency of 900 MHz (in %)

ного стресса, ответная реакция Кр-КК системы печени на радиочастотное облучение оказалась подобной, обнаруженной нами ранее для сублетальных доз рентгеновского облучения [10]. Пострadiационные изменения уровня КК активности имеют развитие во времени и носят компенсаторно-адаптационный характер, что выражается в случае однократного облучения в виде постепенного повышения активности фермента, начиная с первых и вплоть до 20-ых пострadiационных сут, а в случае дробного облучения, в виде более замедленного повышения и к 20-м сут намечающегося возвращения к контрольному уровню. Такая динамика изменений уровня активности КК однозначно свидетельствует, с одной стороны, о высокой чувствительности КК к обоим режимам радиочастотного облучения и, с другой стороны, о более выраженном биологическом эффекте однократного длительного облучения по сравнению с равноценным по времени, но дробным облучением.

Кроме того, приведенные данные подтверждают значительные адаптационные возможности Кр-КК системы, направленные на восстановление энергетического гомеостаза клетки. Как свидетельствуют многочисленные данные литературы, воздействие на печень стрессорных факторов вызывает в печеночной ткани компенсаторное повышение экспрессии КК. Так например, сверхэкспрессия изоферментов КК

для стабилизации энергетического обмена показана в печени трансгенных мышей, подвергнутых кислород-дефициту или метаболическому стрессу, а также в случаях ускорения регенерации печени после обширной гепатэктомии [14, 15].

Цитоспектрофотометрия ядер и ядрышек гепатоцитов позволила выявить и определить их распределение по классам пloidности с 10 % отклонением каждого класса. Оказалось, что вклад в отклонение от «средней» ядер промежуточной пloidности, содержащих ДНК в количестве меньшем, чем 2с в контроле, не превышает 2,5 %, в то время как после однократного облучения уже на 5-ые пострadiационные сутки их количество достигает 31 %, а к 20-м сут составляет около половины популяции гепатоцитов. При этом если процент ядер гепатоцитов с промежуточными значениями между 2с и 4с ДНК в контроле не превышает 7 %, то с развитием постлучевых процессов их процент постепенно увеличивается, достигая к 20-му пострadiационному дню 37 %. Это, с одной стороны, может быть связано с увеличением числа синтезирующих ДНК клеток, а с другой стороны, являться следствием гибели части гепатоцитов, вероятнее всего путем апоптоза. Последнее предположение основывается на обнаружении в исследованных препаратах клеток с «апоптотными тельцами» и на отсутствии воспалительного процесса в печени облученных крыс, являющимся отличительным признаком некроза [16]. Следует отметить, что независимо от механизма гибели на гистограммах всех пострadiационных групп обнаруживается достаточно высокий процент анеуплоидных клеток.

Следует отметить, что данные, обсуждаемые в литературе относительно активации апоптоза под воздействием ЭМИ, носят противоречивый характер. Так, например, показано, что ЭМИ с частотой 1800 МГц не вызывает апоптоз в мононуклеарных клетках периферической крови [17]. В то же время аналогичное облучение с плотностью потока энергии 2 Вт/кг стимулирует апоптоз в иммунных клетках человека MAC6 and K562 [18]. Указанные противоречия скорее всего обусловлены такими факторами, как различия типов клеток, уровней их дифференциации и клеточного цикла, пострadiационных сроков исследования и т.п.

Таким образом, анализ пострadiационных изменений, происходящих в популяции гепатоцитов, сви-

детельствует, что во все сроки достоверно уменьшается среднее содержание ДНК ядер и ядрышек и среднее число ядрышек на ядро. Достоверно увеличивается количество безъядрышковых ядер. Резко увеличивается число гиподиплоидных и триплоидных гепатоцитов, на фоне выраженного достоверного уменьшения числа ди- и тетраплоидных ядер. Важно отметить, что резкое увеличение (более чем в 12 раз) количества триплоидных клеток сопровождается значительным уменьшением числа тетраплоидных гепатоцитов (более чем в 10 раз) и полным исчезновением гипертетраплоидных гепатоцитов, что вероятнее всего связано с их гибелью, о чем также свидетельствует резкое увеличение количества гиподиплоидных клеток, половину из которых составляют безъядрышковые гепатоциты.

Выводы

1. Активность КК печени крыс чувствительна к действию как длительного однократного низкоинтенсивного электромагнитного излучения с частотой 900 МГц, так и равноценного по времени дробного облучения. При этом биологический эффект однократного облучения более выражен, чем дробного.

2. Динамика пострadiационных изменений уровня активности КК свидетельствует о значительных адаптационных свойствах фермента.

3. Динамика пострadiационных изменений, происходящих в популяции гепатоцитов, выражается в уменьшении среднего содержания ДНК ядер и ядрышек и среднего числа ядрышек на ядро, а также в увеличении количества безъядрышковых ядер, что свидетельствует об угнетении транскрипционной активности гепатоцитов при их однократном радиочастотном облучении.

4. Увеличение количества гиподиплоидных клеток, половину из которых составляют безъядрышковые гепатоциты, а также возрастание количества триплоидных клеток, сопровождающееся уменьшением числа тетраплоидных гепатоцитов и исчезновением гипертетраплоидных гепатоцитов, свидетельствуют о гибели значительного количества гепатоцитов, индуцированной действием исследованного однократного облучения.

Postradiation Effects of Low Intensity Electromagnetic Radiation with a Frequency of 900 MHz in Rat Liver

M.S. Petrosyan, L.S. Nersesova, E.M. Karalova, A.S. Avetisyan, L.O. Abroyan, L.A. Akopian, M.G. Gazaryants, J.I. Akopian

Institute of Molecular Biology of NAS of Republic Armenia, Erevan, Armenia

ABSTRACT

Purpose: To study the changes in the activity of the liver and blood serum creatine kinase (KK) and the nucleus-nucleolus apparatus of hepatocytes of rats, subjected to the low-intensity electromagnetic radiation of 900 MHz and 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ energy flux density, typical for a range of mobile phones.

Material and methods: The experiments were carried out on white outbred male rats of 6 months of age, weighing 180–200g. The generator Panoramic X1-42 was used as a source of radiation having a frequency of 900 MHz. The activity of CK in the blood serum and liver extracts respectively was determined spectrophotometrically, based on the accumulation of free creatine. Using the

extent of the DNA content in rat hepatocytes relative to the accepted standard, the distribution of hepatocytes in ploidy (measured in percentage points) was detected; so was determined the ratio of eu- and aneuploid cells.

Results: It appears that the two-hour single total exposure of rats causes more substantial changes in the activity levels of rats both liver and serum creatine kinase than the total time-wise comparable fractional exposure; while the enzyme exhibits signs of significant adaptation. A decrease in the average DNA content of the nucleus and nucleolus, as well as the average number of nucleolus per nucleus, along with an increase in the number of nucleolus-free nuclei after a single radiofrequency irradiation act indicates certain inhibition of the transcriptional activity of hepatocytes. At the same time, a post-radiation increase of hypodiploid cells, half of which are nucleolus-free hepatocytes, as well as an increase in the number of triploid cells, accompanied by a decrease in the number of tetraploid hepatocytes and the disappearance of hypertetraploid hepatocytes, indicate the incidence of death of a significant number of hepatocytes.

Conclusion: The rat liver CK is sensitive to the action of both single low-intensity electromagnetic radiation with a frequency of 900 MHz and that dispersed through fractional exposure: the biological effect of a single exposure is more pronounced. The dynamics of the post-radiation changes occurring in the hepatocyte population upon their single radiofrequency irradiation indicates certain inhibition of the transcriptional activity of the hepatocytes, as well as the incidence of death of a significant number of hepatocytes.

Key words: *electromagnetic radiation, low intensity, frequency 900 MHz, single and fractional irradiation, creatine kinase, nucleus-nucleolar apparatus, liver, blood serum, rats*

For citation: Petrosyan MS, Nersesova LS, Karalova EM, Avetisyan AS, Abroyan LO, Akopian LA, Gazaryants MG, Akopian JI. Postradiation Effects of Low Intensity Electromagnetic Radiation with a Frequency of 900 MHz in Rat Liver. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):53-8. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-53-58

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье. М. Энергиздат, 2013. 567 с. [Grigoriev YuG, Grigoriev OA. Mobile communication and health. Moscow. 2013. 567 p. (In Russ.).]
2. Григорьев Ю.Г. От электромагнитного смога до электромагнитного хаоса. К оценке опасности мобильной связи для здоровья человека. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018;63(3):28-33 [Grigoriev YuG. From Electromagnetic Smog to Electromagnetic Chaos. To Evaluating the Hazards of Mobile Communication for Health of the Population. Medical Radiology and Radiation Safety 2018;63(3):28-33 (In Russ.).]
3. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Int Agency Res Cancer. 2011;(208):4-6.
4. Warille AA, Altun G, Elamin AA, et al. Skeptical approaches concerning the effect of exposure to electromagnetic fields on brain hormones and enzyme activities. 2010. DOI: 10.1016/j.jmau.2017.09.002
5. Nersesova LS. Role of creatine kinase and its substrates in the central nervous system in norm and in various pathologies. Journal Evol Biochem Fiziol. 2011;47(2):120-7.
6. Malone J, Ullrich R. Novel radiation response genes identified in gene trapped MCF10A mammary epithelial cells. Radiat Res. 2007;167(2):176-84.
7. Aksenov M, Aksenova M, Butterfield DA, Markesbery WR. Oxidative modification of creatine kinase BB in Alzheimer's disease brain. J Neurochem. 2000;74(6):2520-7.
8. Мозжухина Т.Г., Азарскова М.В., Литошенко А.Я. Цитофлуориметрический анализ ядер регенерирующей печени крыс в отдаленные сроки после рентгеновского облучения. Цитология и генетика. 1998;32(2):49-56. [Mozzhukhina TG, Azarksova MV, Litoshenko AY. Cytofluorimetric analysis of the nuclei of the regenerating rat liver in the long term after x-ray irradiation. Cytology and Genetics. 1998;32(2):49-56. (In Russ.).]
9. Штейн Г.И., Кудрявцева М.В., Кудрявцев Б.Н. Изменение морфометрических параметров окрашенных серебром ядрышек гепатоцитов крыс при циррозе печени и в процессе их реабилитации. Цитология. 1999;43(41):574-80. [Shtein GI, Kudryavtseva MV, Kudryavtsev BN. Changes in the morphometric parameters of the silver-stained nucleoli of rat hepatocytes during liver cirrhosis and in the process of their rehabilitation. Cytology. 1999;43(41):574-80. (In Russ.).]
10. Нерсесова Л.С., Газарянц М.Г., Мкртчян З.С. и др. Влияние ионизирующей радиации на ферментные активности и состояние ядерноядрышкового аппарата гепатоцитов крыс. Радиация. биология. Радиоэкология. 2013;53(1):55-62 [Nersesova LS, Gazaryants MG, Mkrtchyan ZS, Meliksetyan GO, Poghosyan LH, Poghosyan SA, et al. Influence of Ionizing Radiation on Enzymatic Activity and State of Nucleus Nucleolar Apparatus in Rat Hepatocytes. Radiation Biology Radioecology. 2013;53(1):55-62. (In Russ.).]
11. Петрова Т.А., Лызлова С.Н. Оптимизация условий определения активности креатинкиназы колориметрическим методом. Вестн. ЛГУ. 1985;(24):88-90. [Petrova TA, Lislova SN. Optimization of Conditions for Determining Creatine kinase Activity by the Colorimetric Method. LSU Bulletin. 1985;(24):88-90. (In Russ.).]
12. Магакян Ю.А., Каралова Е.М. Цитофотометрия ДНК. Ереван. 1989. 204 с. [Maghakyan YuA, Karalova EM. Cytomorphometry of DNA. Yerevan. 1989. (In Russ.).]
13. Romeis B. Mikroskopische Technik. München, Leibniz Verlag. 1948.
14. Miller K, Halow J, Koretsky AP. Phosphocreatine protects transgenic mouse liver expressing creatine kinase from hypoxia and ischemia. Am J Physiol. 1993;265(6Pt1):1544-51. DOI: 10.1152/ajpcell.1993.265.6.C1544.
15. Satoh S, Tanaka A, Hatano E, Inomoto T, Iwata S, Kitai T, et al. Energy metabolism and regeneration in transgenic mouse liver expressing creatine kinase after major hepatectomy. Gastroenterology. 1996;110(4):1166-74. PubMed PMID: 8613006.
16. Kerr JF, Winterford CM, Harmon BV. Apoptosis. Its significance in cancer and cancer therapy. Cancer. 1994;73(8): 2013-26. PubMed PMID: 8156506.
17. Capri M, Scarcella E, Bianchi E, Fumelli C, Mesirca P, Agostini C, et al. 1800 MHz radiofrequency (mobile phones, different Global System for Mobile communication modulations) does not affect apoptosis and heat shock protein 70 level in peripheral blood mononuclear cells from young and old donors. Int J Radiat Biol. 2004;80(6):389-97. DOI: 10.1080/09553000410001702346
18. Lantow M, Lupke M, Frahm J, Mattsson MO, Kuster N, Simko M. ROS release and Hsp70 expression after exposure to 1,800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in primary human monocytes and lymphocytes. Radiat Environ Biophys. 2006;45(1):55-62. DOI: 10.1007/s00411-006-0038-3.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 18.03.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 18.03.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

А.Г. Цовьянов¹, А.Е. Карев¹, С.М. Шинкарев¹, И.П. Коренков¹, А.С. Самойлов¹,
В.А. Стебельков², А.В. Жуков², К.М. Измestьев³, С.Г. Терентьев³

ДИСПЕРСНОСТЬ, МОРФОЛОГИЯ И ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ПРОИЗВОДСТВЕ СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

¹ Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

² НП «Лаборатория анализа микрочастиц», Москва

³ Акционерное общество «Сибирский химический комбинат», Томск

Контактное лицо: Цовьянов Александр Георгиевич, atsovyan@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Исследование физико-химических характеристик радиоактивных аэрозолей, образующихся при производстве смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива.

Материал и методы: Для исследования дисперсного состава применялись отечественные импакторы: АИП-2, ФРТЧ (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна), а также зарубежные модели: каскадный импактор Андерсена (Copley Scientific, UK), индивидуальный импактор SKC Sioutas (SKC inc., США). При исследовании морфологических характеристик использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) LYRA-3 (Tescan), оснащенный рентгеновским микроанализатором (РМА) X-max 80 (Oxford Instruments). Для поиска содержащих уран и плутоний частиц в отдельных пробах применяли масс-спектрометр вторичных ионов IMS-1280 (Cameca) и трековый анализ.

Результаты: Значение медианного по активности (Σa) аэродинамического диаметра (АМАД) аэрозольных частиц варьирует от 12 до 33 мкм, для ^{239}Pu – от 14 до 27 мкм. Наименьшие значения АМАД (0,4–2,5 мкм для ^{239}Pu) обнаружены в ремонтной зоне у бокса синтеза и спекания. Элементный состав аэрозольных частиц определяется наличием U (63–86 %), Pu (5–10 %) и O (9–47 %), Fe в отдельных пробах – до 32 %, другие элементы Na, S, N, P содержатся в гораздо меньшем количестве, не превышающем 2–8 %. В составе лишь одной частицы, содержащей уран и плутоний, присутствует азот (3 %).

Заключение: В операторской зоне основной вклад в объемную активность вносит грубодисперсная фракция радиоактивных аэрозолей, вероятно, обусловленная операциями прессования и дробления. Аэрозольные частицы присутствуют в виде индивидуальных частиц или плотных агрегатов размером 0,2–2 мкм, а также в виде конгломератов размером от 0,5 до 4 мкм на основе оксидов кремния, железа, карбоната кальция и т.д., содержащих включения (от 200 до 400 нм) или индивидуальные частицы (20–200 нм) смешанного оксида урана-плутония, либо оксида урана как на поверхности конгломерата, так и в приповерхностных слоях внутри.

Ключевые слова: плутоний, радиоактивные аэрозоли, АМАД, импактор, смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, растровый электронный микроскоп, масс-спектрометр

Для цитирования: Цовьянов А.Г., Карев А.Е., Шинкарев С.М., Коренков И.П., Самойлов А.С., Стебельков В.А., Жуков А.В., Измestьев К.М., Терентьев С.Г. Дисперсность, морфология и элементный состав аэрозольных частиц на производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):59–65.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-59-65

Введение

Важным фактором, влияющим на дозу внутреннего облучения при ингаляционном поступлении радиоактивных аэрозолей, является их дисперсный состав [1]. Дисперсный состав аэрозоля характеризуется распределением частиц по их размерам или распределением массы аэрозоля по частицам различных размеров. В случае радиоактивных аэрозолей существенное значение имеет распределение активности, в частности определенных радионуклидов, по частицам различных размеров [2].

Представлены результаты исследований дисперсности, морфологии и элементного состава радиоактивных аэрозольных частиц на участке по производству смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива КЭУ-1 на ХМЗ АО «СХК», проведенные в 2014 и 2017 гг.

Материалы и методы

Дисперсный состав

Импакторы – селективные пробоотборные устройства, состоящие из последовательно расположенных каскадов, на каждом из которых происходит осаждение заданной размерной фракции аэрозолей, причем в качестве заключительного каскада используют фильтр.

Минимальный размер частиц, которые могут быть разделены обыкновенным инерционным импактором, составил ~ 0,3 мкм. Более мелкие частицы задерживаются конечным (выходным) фильтром [3].

Отбирая пробы аэрозолей с помощью импактора, а затем измеряя активность радионуклидов на коллекторных пластинах, строят гистограммы распределения активности радионуклидов (р/н) по аэродинамическому диаметру (АД) частиц. Опыт и теоретические исследования показали, наиболее подходящей для аппроксимации результатов измерений является функция логнормального распределения [2]. Параметры, его определяющие, – медианный по активности аэродинамический диаметр (АМАД) и стандартное геометрическое отклонение σ_g (СГО) [4]. Величина σ_g характеризует разброс диаметров частиц относительно АМАД: 67 % активности аэрозоля ассоциировано с частицами в диапазоне диаметров от АМАД/ σ_g до АМАД $\cdot\sigma_g$. Монодисперсный аэрозоль имеет $\sigma_g = 1$.

В настоящей работе применялись импакторы, разработанные в ФМБЦ:

- АИП-2, патент RU 2239815 [5], номер в Госреестре СИ № 28021-04;
- ФРТЧ, патент RU 2509375 [6, 7];

а также зарубежные импакторы:

- каскадный импактор Андерсена (Copley Scientific, Великобритания);
- индивидуальный импактор SKC Sioutas (SKC Inc., США).

Расчет АМАД проводился в соответствии с методиками [9, 10].

В качестве побудителей расхода применялись переносные воздухопроводы либо штатная вакуумная система предприятия. Отбор проб проводился на высоте ~ 1,6–2,0 м в точках, согласованных со службой РБ. Для исследования динамики счетной концентрации аэрозолей применялись шестиканальные оптические счетчики Handheld 3016 (Госреестр № 48014-11). Измерения активности проб проводили после обязательной выдержки не менее 3 сут для распада естественных короткоживущих радионуклидов. Суммарная активность альфа-излучающих р/н измерялась на радиометрах УМФ-2000 (№ 16297-08 Госреестра).

Измерение активности гамма-излучающих радионуклидов (^{241}Am) проводили на полупроводниковом гамма-спектрометре, состоящем из широкополосного детектора Canberra BE3830 и анализатора InSpector-2000 (№ 18509-10 Госреестра), измерения проводили в соответствии с методикой [11]. Радиохимическую пробоподготовку и приготовление счетных образцов для альфа-спектрометрии проводили в соответствии с методиками [12–14], измерения проводили на альфа-спектрометре Alpha Duo (ORTEC) (№ 46163-10 Госреестра).

Морфология и элементный состав

Автоматический поиск частиц методом МСВИ (масс-спектрометрия вторичных ионов) проводили на масс-спектрометре IMS-1280 (Самека, Франция) (№ 47061-11 Госреестра). Поиск частиц осуществляли на подложках из монокристаллического кремния, на которые частицы были перенесены методом вакуумной импакции. Область сканирования составляла 900 мм².

Автоматический поиск, получение изображения и проведение элементного анализа осуществляли на растровом электронном микроскопе Lyra 3 (Tescan,

Чехия) (№ 53938-13 Госреестра), оснащенным рентгеновским микроанализатором X-max 80 (Oxford Instruments, Великобритания). Автоматический поиск частиц методом РЭМ-РМА проводили на подложке из монокристаллического кремния. Площадь сканирования препаратов составляла 25–40 мм².

Условия сканирования: ускоряющее напряжение 25–30 кВ, сила тока 0,5–1,5 нА, размер поля 100×100 мкм, размер изображения 2048×2048 пикселей, скорость сканирования 4 мкм на пиксел, скорость счета детектора 10⁵ с⁻¹, длительность анализа микрочастицы 3 с. При таком режиме сканирования удается обнаружить частицы размером от 100 нм и более.

Для предварительной количественной оценки присутствия радионуклидов в пробах использовали метод альфа-авторадиографии.

Результаты и обсуждение

Дисперсный состав

Результаты исследования дисперсного состава радиоактивных аэрозолей КЭУ-1 представлены в табл. 1–2. В операторской зоне основной вклад в объемную активность (ОА) вносит грубодисперсная фракция радиоактивных аэрозолей, вероятно, обусловленная операциями прессования и дробления. Значение АМАД (Σa) варьируется от 12 до 33 мкм, для ^{239}Pu – от 14 до 27 мкм. Наименьшие значения АМАД (0,4–2,5 мкм для ^{239}Pu) обнаружены в ремонтной зоне у бокса синтеза и спекания (табл. 1).

На рис. 1–2 представлено распределение активности ^{239}Pu по АД в ремонтной зоне у бокса синтеза и спекания в период 29.09–5.10.2017. Данное распределение носит бимодальный характер. Значение АМАД субмикронной фракции – 400 нм с вкладом в ОА 37 %. Значение АМАД грубодисперсной фракции составило более 9 мкм. Результат оценки вклада в ожидаемую эффективную дозу (ОЭД) внутреннего облучения каждой из фракций представлен в табл. 3.

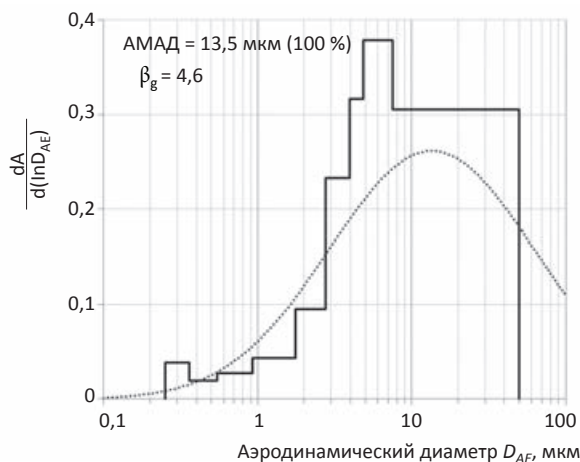
При расчете вклада в ОЭД в случае субмикронной фракции использовали дозовый коэффициент из базы данных МКРЗ [15] для значения АМАД 0,3 мкм, для

Таблица 1

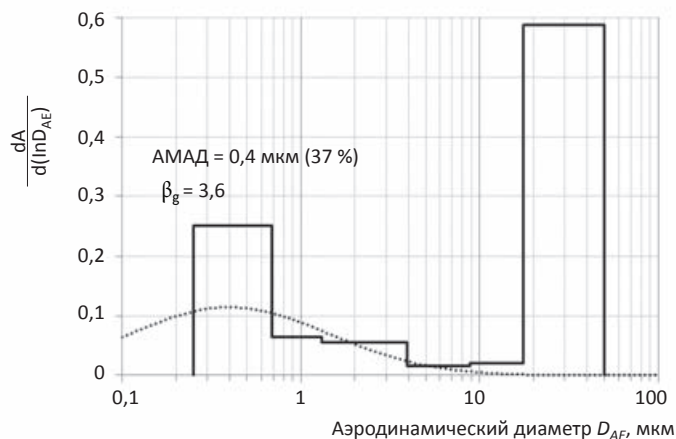
Дисперсный состав радиоактивных аэрозолей КЭУ-1
Dispersed composition of radioactive aerosols KEU-1

Дата	Зона	Место отбора	Σa			^{239}Pu			^{241}Am		
			АМАД, мкм	σ_g , мкм	Вклад в ОА, %	АМАД, мкм	σ_g , мкм	Вклад в ОА, %	АМАД, мкм	σ_g , мкм	Вклад в ОА, %
29.09-4.10.17	Операторская	Бокс измельчения и смешения исходных компонентов и нитридов	2,6	2,0	2	2,7	2,4	3	1,1	1,4	9
			29	1,9	98	27	1,4	97	23	1,5	91
29.09-5.10.17		Бокс прессования шашек и таблеток	3,0	2,1	3	3,6	3,0	1	1,6	2,6	1
			22	2,1	97	26	1,7	99	31	2,0	99
29.09-5.10.17	Ремонтная	Бокс синтеза и спекания	9,3	2,6	29	–	–	–	0,7	5,4	15
			> 22	–	71				33	2,0	85
29.09-4.10.17		Бокс синтеза, спекания	1,4	3,8	71	0,4	3,6	37	0,6	3,4	92
			> 9,0	–	29	> 9,0	–	63	> 9,0	–	8
4-5.10.17			2,9	2,3	76	2,5	2,8	64	1,7	2,5	86
			> 19	–	24	> 19	–	36	> 19	–	14
29.09-4.10.17		Бокс измельчения и смешения исходных компонентов и нитридов	–	–	–	14	4,6	100	4,8	2,4	100
4-5.10.17			9,1	4,0	21	9,0	3,4	19	0,8	5,4	8
			> 20	–	79	> 20	–	81	27	1,7	92

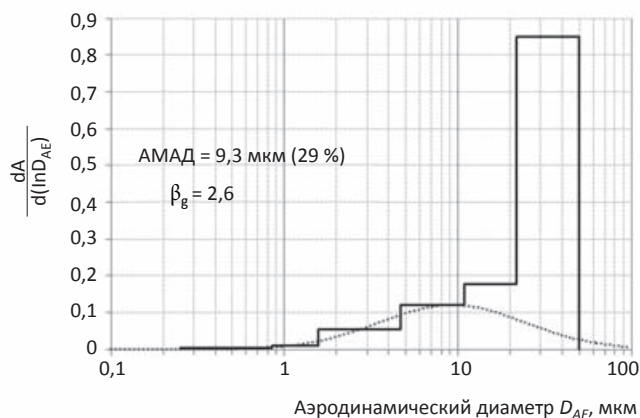
(а) Бокс измельчения и смешения исходных компонентов и нитридов



(б) Бокс синтеза и спекания

Рис. 1. Распределение активности ^{239}Pu по АД в ремонтной зоне 29.09-4.10.17Fig. 1. Distribution of ^{239}Pu activity by AD in the repair zone 29.09-4.10.17

(а) Бокс измельчения и смешения исходных компонентов и нитридов



(б) Бокс синтеза и спекания

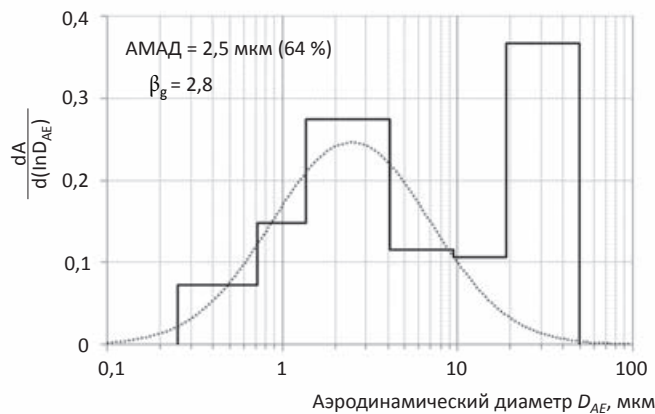
Рис. 2. Распределение активности ^{239}Pu по АД в ремонтной зоне 4-5.10.2017Fig. 2. Distribution of the activity of ^{239}Pu by AD in the in the repair zone 4-5.10.2017

Таблица 2

Дисперсный состав радиоактивных аэрозолей КЭУ-1 (альфа-радиометрия)
Dispersed composition of radioactive aerosols KEU-1 (alpha-radiometry)

Дата отбора	Зона	Место отбора	Σa			
			АМАД, мкм	σ_g , мкм	Вклад в ОА, %	ОА, ДОА*
25.06 – 2.07.14	Операторская	Место хранения оборотов	8,5	3,7	22	1,3
			> 22	–	78	
03.10.2017		Бокс прессования шашек и таблеток	33	3,2	100	27
2-3.10.17		Бокс контроля содержания примеси углерода в синтезированном нитриде	18	3,5	100	5,0
2-5.10.17		Загрузка-выгрузка оборотов и оснастки	18	3,4	100	6,3
3-5.10.17		Бокс хранения готовой продукции	12	3,4	100	0,5
25 – 30.06.14	Ремонтная	Бокс измельчения, смешения исходных компонентов и нитридов	22	4,4	100	9,4

Примечание: * – 1 ДОА = 0,032 Бк/м³

грубодисперсной фракции – дозовый коэффициент для значения АМАД 10 мкм, тип соединения при ингаляции – П для обеих фракций. Как видно из табл. 3, несмотря на меньший вклад в ОА, вклад субмикронной фракции в ОЭД выше в 2 раза по сравнению с вкладом грубодисперсной фракции.

Анализ динамики счетной концентрации и ОА (рис. 3) указывает на то, что ингаляционное посту-

пление радиоактивных аэрозолей носит импульсный характер, обусловленный кратковременными выбросами.

Данный вывод подтверждается при анализе значений ОА ^{239}Pu в ремонтной зоне (табл. 4). Суточные значения ОА превышают значения ОА за 5 суток в 3–6 раз.

Более крупные значения АМАД в ремонтной зоне у бокса смешения и измельчения (14 мкм и более)

Таблица 3

**Оценка вклада в ОЭД фракций частиц
распределения на рис. 26**

Estimation of the contribution to the EED of fractions is shown
in Fig. 2b

Фракция	АМАД, мкм	Дозовый коэффици- ент, Зв/Бк	Вклад в ОА, %	Вклад в ОЭД, %
Субмикронная	0,3	$2,0 \cdot 10^{-5}$	37	67
Грубодисперсная	10	$5,9 \cdot 10^{-6}$	63	33

(табл. 1) указывают на близость к источнику аэрозолей. По-видимому, дисперсный состав у бокса синтеза и спекания обусловлен данным источником: доля грубодисперсной фракции исходного выброса при распространении аэрозоля снижается за счет седиментации, доля торакальной фракции возрастает (рис. 1–2). Однако нельзя исключить влияние высокотемпературных процессов, которые, как известно, являются потенциальными источниками образования наноаэрозолей в производственной среде [16].

Морфология и элементный состав

Обнаруженные методом МСВИ в режиме автоматического сканирования частицы исследованы методом РЭМ-РМА. При оценке элементного состава содержание кремния и углерода не учитывали, поскольку частицы в препаратах помещали на кремниевую подложку и закрепляли их органическим связующим.

В препарате пробы SH-SKC4 методом МСВИ обнаружено двенадцать урансодержащих частиц, в состав пяти из которых входит плутоний. Элементный состав частиц представлен в табл. 5.

Морфология частиц, в состав которых входит плутоний, различается:

- 1) плотная индивидуальная частица смешанного оксида урана-плутония, содержащая в своем составе 3 % азота, размером 1,1 мкм неправильной формы (рис. 4а);
- 2) конгломерат размером 1,3 мкм, содержащим плотную угловатую частицу (0,4 мкм) смешанного оксида урана-плутония с острыми краями;

Таблица 4

**ОА ^{239}Pu в ремонтной зоне (по результатам измерений
активности ^{239}Pu на каскадах импакторов)**

Volumetric activity ^{239}Pu in the repair zone (based on the
results of measurements of ^{239}Pu activity on impactor cascades)

Точка	Дата	ОА ^{239}Pu , ДОА
Бокс измельчения и смешения исходных компонентов и нитридов	29.09–4.10.17	$3,8 \pm 0,8$
	4–5.10.17	24 ± 5
Бокс синтеза и спекания	29.09–4.10.17	$5,6 \pm 1,1$
	4–5.10.17	18 ± 4

Примечание: * – 1 ДОА = $0,032 \text{ Бк/м}^3$

3) конгломераты размером 0,9 мкм, содержащие в своем составе сферические частицы смешанного оксида урана-плутония диаметром 0,25–0,35 мкм (рис. 4б).

4) конгломерат (1 мкм), который состоит из скопления уран- и плутоний-содержащих частиц размером 20–50 нм (рис. 4в). В конгломерате присутствуют области, в которых обнаружен только уран, без плутония, и области, в которых уран и плутоний присутствуют совместно.

Частицы, содержащие уран без плутония, также можно разделить три группы:

- 1) агрегат оксида урана неправильной формы размером 2 мкм, образовавшийся, по-видимому, в результате взаимодействия (химическое, термическое) сферических и округлых частиц размером 200–250 нм;
- 2) конгломераты (0,5–2 мкм), содержащие скопления (200–250 нм) урансодержащих частиц размером 50–100 нм;
- 3) конгломераты (0,6–1,5 мкм), содержащие рыхлые включения урана на поверхности и в приповерхностных слоях.

Представленные данные находятся в согласии с результатами исследований НП «Лаборатория анализа микрочастиц» 2014 г., когда в пробах воздушной среды из ремонтной зоны были обнаружены субмикронная частица оксида плутония, а также конгломерат урановых частиц субмикронных размеров (рис. 5 а, б) [18].

Таким образом, как показывают исследования морфологии и элементного состава частиц аэрозолей на производстве СНУП топлива, аэрозольные части-

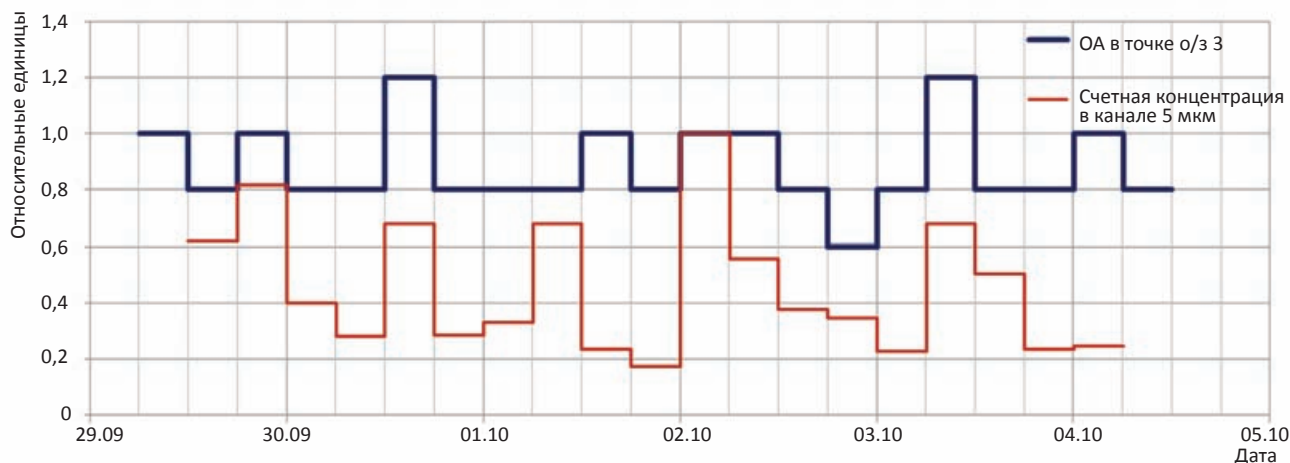


Рис. 3. ОА (в единицах ДОА) у бокса измельчения и смешения исходных компонентов и нитридов в операторской зоне и нормированная счетная концентрация (измеренная счетчиком HandHeld 3016)

Fig. 3. Volumetric activity (in permissible volumetric activity units) at the grinding and mixing box of initial components and nitrides in the operator's zone and the normalized counting concentration (measured by the HandHeld 3016 counter)

Таблица 5

Элементный состав урановых микрочастиц пробы SH-SKC-4
Elemental composition of SH-SKC-4 uranium microparticles

№ частицы	Содержание, %										
	U	Pu	O	Fe	N	S	Na	P	K	Ca	Mn
1	64 ± 29	–	28 ± 12	5 ± 2	–	–	1 ± 0,5	–	–	–	3 ± 1
2	78 ± 14	10 ± 2	9 ± 2	–	3 ± 1	–	–	–	–	–	–
3	82 ± 22	–	18 ± 5	–	–	–	–	–	–	–	–
4	86 ± 15	–	14 ± 3	–	–	–	–	–	–	–	–
5	74 ± 17	7 ± 2	19 ± 5	–	–	–	–	–	–	–	–
6	42 ± 13	–	37 ± 12	6 ± 2	–	< 1	1 ± 0,5	8 ± 3	–	6 ± 2	–
7	76 ± 20	9 ± 2	15 ± 4	–	–	–	–	–	–	–	–
8	63 ± 13	–	25 ± 6	–	–	6 ± 2	3 ± 1	–	3 ± 1	–	–
9	71 ± 23	9 ± 3	20 ± 7	–	–	–	–	–	–	–	–
10	73 ± 13	5 ± 1	22 ± 4	–	–	–	–	–	–	–	–
11	84 ± 10	–	16 ± 2	–	–	–	–	–	–	–	–
12	62 ± 12	–	32 ± 6	2 ± 1	–	4 ± 1	2 ± 1	–	–	–	–

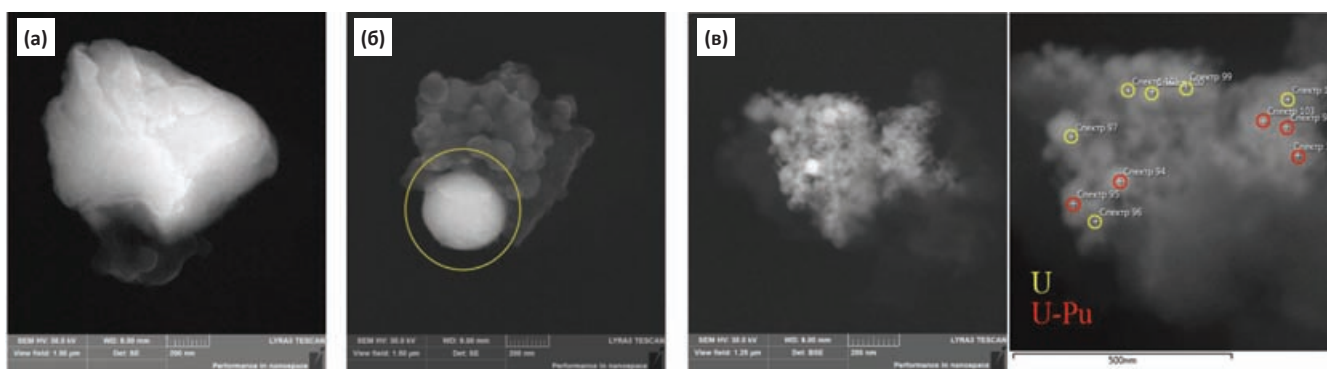


Рис. 4. Проба SH-SKC-4, частицы, содержащие Pu: (а) — частица 2; (б) — частица 7; (в) — частица 10
Fig. 4. Sample SH-SKC-4, particles containing Pu: (a) — particle 2; (б) — particle 7; (в) — particle 10

цы присутствуют в виде индивидуальных частиц или плотных агрегатов размером 0,2–2 мкм, а также в виде конгломератов размером от 0,5 до 4 мкм на основе оксидов кремния, железа, кальция и т.д., содержащих включения (от 200 до 400 нм) или индивидуальные частицы (20–200 нм) смешанного оксида урана-плутония, либо оксида урана как на поверхности конгломерата, так и в приповерхностных слоях внутри.

При ингаляционном поступлении и последующем взаимодействии с жидкостями тела, можно предположить, что обнаруженные наноструктурированные частицы будут распадаться на индивидуальные частицы. В этом случае, несмотря на присутствие в воздухе рабочей зоны грубодисперсных аэрозолей (что подтверждается исследованиями с помощью каскадных импакторов), внутреннее облучение при ингаляцион-

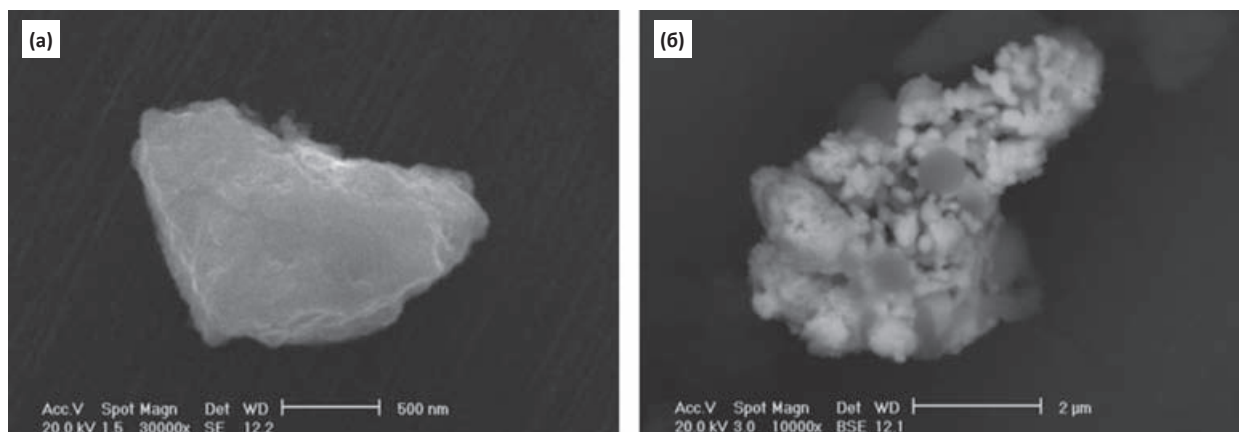


Рис. 5. Проба Н-1 (ремонтная зона): (а) — частица, состоящая из оксида плутония;
(б) — конгломерат урановых частиц субмикронных размеров (данные 2014 г.)
Fig. 5. Test H-1 (repair area): (a) — a particle consisting of plutonium oxide;
(б) — a conglomerate of submicron-sized uranium particles (2014 data)

ном поступлении будет определяться частицами субмикронного и, возможно, нанометрового диапазона.

Выводы

1. В операторской зоне основной вклад в объемную активность вносит грубодисперсная фракция радиоактивных аэрозолей, вероятно, обусловленная операциями прессования и дробления. Значение АМАД (Σa) варьирует от 12 до 33 мкм, для ^{239}Pu – от 14 до 27 мкм. Наименьшие значения АМАД (0,4–2,5 мкм для ^{239}Pu) обнаружены у частиц в ремонтной зоне у бокса синтеза и спекания.

2. В ремонтной зоне у бокса синтеза и спекания обнаружено бимодальное распределение активности ^{239}Pu по АД, состоящее из субмикронной (АМАД 400 нм) и грубодисперсной (АМАД более 9 мкм) фракций. При этом, несмотря на меньший вклад в ОА (37 %), вклад субмикронной фракции в ОЭД в 2 раза выше по сравнению с вкладом грубодисперсной фракции, составляя 67 %.

3. Анализ динамики счетной концентрации и объемной активности указывает, что ингаляционное поступление радиоактивных аэрозолей носит импульс-

ный характер, обусловленный кратковременными выбросами.

4. Аэрозольные частицы присутствуют в виде индивидуальных частиц или плотных агрегатов размером 0,2–2 мкм, а также в виде конгломератов размером от 0,5 до 4 мкм на основе оксидов кремния, железа, кальция и т.д., содержащих включения (от 200 до 400 нм) или индивидуальные частицы (20–200 нм) смешанного оксида урана-плутония, либо оксида урана как на поверхности конгломерата, так и в приповерхностных слоях внутри.

5. В пробах обнаружено гораздо большее число ураносодержащих частиц. Так, например, в пробе SH-SKC4 (ремонтная зона) обнаружено 12 ураносодержащих частиц, только в 5 из них выявлен плутоний. Данный результат, по-видимому, обусловлен большей массовой долей оксида урана по сравнению с диоксидом плутония в исходной смеси реагентов. Элементный состав аэрозольных частиц определяется наличием U (63–86 %), Pu (5–10 %) и O (9–47 %), Fe в отдельных пробах до 32 %, другие элементы (Na, S, N, P) содержатся в гораздо меньшем количестве, не превышающем 2–8 %. В составе лишь одной частицы, содержащей уран и плутоний, присутствует азот (3 %).

Size Distribution, Morphology and Elemental Composition of Aerosol Particles on the Fabrication of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel

A.G. Tsovyanov¹, A.E. Karev¹, S.M. Shinkarev¹, I.P. Korenkov¹, A.S. Samoylov¹,
V.A. Stebelkov, A.V. Zhukov², K.M. Izmaytyev³, S.G. Terentiev³

¹ A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

² Laboratory for Microparticle Analysis, Moscow, Russia

³ Joint Stock Company "Siberian Chemical Combine", Tomsk, Russia

ABSTRACT

Purpose: Study of physical and chemical properties of radioactive aerosols formed on the fabrication of mixed nitride uranium-plutonium (MNUP) fuel.

Material and methods: The following impactors were utilized for activity particle-size distribution analysis: AIP-2, PHRT, IRAM-2-4I (SRC FMBC), Andersen cascade impactor (Copley Scientific, UK), SKC Sioutas (SKC inc., USA). Scanning electron microscope (SEM) Tescan LYRA-3 equipped the X-ray microanalyzer X-max 80 (Oxford Instruments) was used for study of morphological characteristics of aerosol particles. Secondary ion-mass spectrometer Cameca IMS-1280 and track analysis were used for search of particles containing the uranium and plutonium radionuclides.

Results: Values of AMAD (Σa) vary from 12 μm till 30 μm , for ^{239}Pu – from 14 till 27 μm . Lowest AMAD values (0.4–2.5 μm for ^{239}Pu) were found in the repair area near the glove box of synthesis and sintering. The samples contain a much larger number of uranium-containing particles, which is likely due to a larger mass fraction of uranium oxide compared with plutonium dioxide in the initial mixture of reagents. Elemental composition of aerosol particles includes U (63–86 %), Pu (5–10 %) and O (9–47 %), Fe – in some samples till 32 %. Other elements like Na, S, N, P are contained in rather lowest amounts not exceeding 1–8 %. Only one nitrogen-containing particle was found (3 % of N).

Conclusion: Coarse fraction of radioactive aerosols makes a major contribution in activity concentration in air of the operator zone which is driven by such operations as pressing and crushing. Aerosol particles are presented as individual particles or dense aggregates by size of 0,2–2 μm and also as conglomerates by size 0,5–4 μm consisting of oxides (or carbides) of silicon, iron, calcium, etc. containing inclusions (200–400 nm) or individual particles (20–200 nm) of mixed U-Pu oxide or uranium oxide on the surface of conglomerate as well as located in the near-surface layers inside.

Key words: plutonium, radioactive aerosol, AMAD, impactor, mixed nitride uranium-plutonium fuel, scanning electron microscope

For citation: Tsovyanov AG, Karev AE, Shinkarev SM, Korenkov IP, Samoylov AS, Stebelkov VA, Zhukov AV, Izmaytyev KM, Terentiev SG. Size Distribution, Morphology and Elemental Composition of Aerosol Particles on the Fabrication of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):59–65. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-59-65

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карев А.Е., Цовьянов А.Г., Кухта Б.А., Шинкарев С.М., Припачкин Д.А. Метод оценки осаждения частиц радиоактивных аэрозолей в дыхательном тракте человека. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016;5:23-31. [Karev AE, Tsovyanov AG, Kukhta BA, Shinkarev SM, Pripachkin DA. Method to estimate a radioactive aerosol particle deposition in the human respiratory tract. Safety and Emergency Issues 2016;5:23-31. (In Russ.).]
2. Огородников Б.И., Сухоручкин А.К., Будыка А.К. и др. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). Часть 3. Дисперсность радиоактивных аэрозолей – Чернобыль, 2004. Препр. НАН Украины. Институт проблем безопасности АЭС; 04-4. 60 с. [Ogorodnikov BI, Suhoruchkin AK, Budyka AK, et al. Radioactive aerosols of object “Shelter” (review). Part 3. Particle-size distribution of radioactive aerosols. Chernobyl (In Russ.).]
3. Происхождение субмикронной фракции в результатах измерений дисперсного состава аэрозолей объекта «Укрытие»: Отчет ГСП ЧАЭС, инв. ТО ОУ № 364 от 20.12.2002 г. Исп. А.К. Сухоручкин. Славутич, 2002. 22 с. [The origin of the submicron fraction in the results of measurements of the dispersed composition of aerosols of the object “Shelter”: Report GSPChernobyl NPS, inv. TO OY № 364 of 20.12.2002. A.K. Suhoruchkin. Slavutich, 2002. 22 p. (In Russ.).]
4. МУ 2.6.1.065-2014. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования. [Guidelines 2.6.1.065-2014. Dosimetric control of occupational internal exposure. General requirements (In Russ.).]
5. Патент RU 2239815 «Каскадный импактор» от 10.11.2004. Авторы: Цовьянов А.Г., Бадьин В.И., Молоканов А.А., Припачкин Д.А., Ризин А.И., Фертман Д.Е. [Patent RU 2239815 «Cascadeimpactor» from 10.11.2004. Authors: Tsovyanov AG, Badin VI, Molokanov AA, Pripachkin DA, Rizin AI, Fertman DE. (In Russ.).]
6. Патент RU 2509375 «Импактор-фантом респираторного тракта человека» от 10.03.2014. Авторы: Цовьянов А.Г., Кухта Б.А., Карев А.Е. [Patent RU 2509375 «Impactor-phantom of the human respiratory tract» of 10.03.2014. Authors: Tsovyanov AG, Kukhta BA, Karev AE. (In Russ.).]
7. Цовьянов А.Г., Крамер-Агеев Е.А., Фертман Д.Е. и др. Моделирование и разработка импактора-фантома респираторного тракта человека. АНРИ. 2013(74)52-60. [Tsovyanov AG, Kramer-Ageev EA, Fertman DE, et al. Impactor-Phantom of Human Respiratory Tract: Numerical Simulation and Design. ANRI 2013(74)52-60. (In Russ.).]
8. Карев А.Е., Шинкарев С.М., Цовьянов А.Г. Применение соглашения о вдыхаемой, торакальной и респиральной фракциях (ГОСТ Р ИСО 7708-2006) для стационарного и индивидуального контроля объемной активности радиоактивных аэрозолей на предприятиях атомной отрасли. АНРИ. 2015 (83):43-50. [Karev AE, Shinkarev SM, Tsovyanov AG. Application of Sampling Conventions for Inhalable, Thoracic and Respirable Fractions (GOST R ISO 7708-2006) for Stationary and Individual Control of Volumetric activity of Radioactive Aerosols at the Enterprises of Atomic Industry. ANRI. (In Russ.).]
9. МУК 2.6.1.08-2004. Определение характеристик распределения радиоактивного аэрозоля по размерам. [Guidelines on control methods 2.6.1.08-2004. Determination of the size distribution characteristics of a radioactive aerosol. (In Russ.).]
10. Определение характеристик распределения радиоактивного аэрозоля по размерам с помощью импактора-фантома респираторного тракта человека. Свидетельство об аттестации № 7-4/25.01.00087-2015 от 07.10.2015. ФР.1.31.2016.23130. [Determination of the size distribution characteristics of a radioactive aerosol using the impactor-phantom of a human respiratory tract (certification certificate № 7-4/25.01.00087-2015 of 07.10.2015. FR.1.31.2016.23130) (In Russ.).]
11. Методика выполнения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с применением системы гамма-спектрометрической LabSOCS. Свидетельство об аттестации № 770/07 от 25.06.2007 г. [Method for measuring the activity of gamma-emitting radionuclides in counting samples using the gamma-spectrometry system LabSOCS. Certificate of Attestation № 770/07 of 25.06.2007 (In Russ.).]
12. ФР.1.40.2013.15390. Методика измерений удельной активности изотопов урана (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U) в пробах почв, грунтов, донных отложений, горных пород и строительных материалов на их основе альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Москва. ФГУП «ВИМС». 2013. [FR.1.40.2013.15390. Method of measuring the specific activity of uranium isotopes (^{238}U , ^{234}U , ^{235}U) in samples of soil, bottom sediments, rocks and building materials based on the alpha-spectrometric method with radiochemical preparation. Moscow. 2013 (In Russ.).]
13. ФР.1.40.2013.15395. Методика измерений удельной активности изотопов плутония (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Москва. ФГУП «ВИМС». 2013. [FR.1.40.2013.15395. Method for measuring the specific activity of plutonium isotopes (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$) in samples of soil, bottom sediments, rocks and building materials based on the alpha-spectrometric method with radiochemical preparation, Moscow. 2013 (In Russ.).]
14. ФР.1.40.2013.15396. Методика измерений удельной активности америция-241 (^{241}Am) в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Москва. ФГУП «ВИМС». 2013. [FR.1.40.2013.15396 Method for measuring the specific activity of americium-241 (^{241}Am) in samples of soil, bottom sediments, rocks and building materials based on the alpha-spectrometric method with radiochemical preparation. Moscow. 2013 (In Russ.).]
15. ICRP Database of Dose Coefficients: Worker and Members of the Public. Elsevier. 2001.
16. ГОСТ Р 54597-2011. Воздух рабочей зоны. Ультрадисперсные аэрозоли, аэрозоли наночастиц и наноструктурированных частиц. Определение характеристик и оценка воздействия при вдыхании. [GOST R 54597-2011. Air working area. Ultrafine aerosols, aerosols of nanoparticles and nanostructured particles. Characterization and evaluation of exposure by inhalation (In Russ.).]
17. <https://www.skinc.com/catalog/pdf/instructions/1690.pdf>
18. Отчет о выполнении работ по комплексному обследованию радиоактивных аэрозолей производств ХМЗ «СХК». Договор № 27/02-0399 от 28.03.2014. [Report on the accomplishment of work a «Comprehensive survey of radioactive aerosols of CMP production «SCC» Contact № 27/02-0399 of 28.03.2014. (In Russ.).]
19. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. Ann. ICRP. 1994;24(1-3).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 24.11.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.
Article received: 24.11.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

Е.Г. Метляев, Л.С. Богданова, М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Г.П. Фролов, А.М. Лягинская

МЕЖДУНАРОДНЫЕ И ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОВЕДЕНИЮ ЙОДНОЙ ПРОФИЛАКТИКИ ПРИ АВАРИИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

Контактное лицо: Метляев Евгений Георгиевич, metlyayev@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Провести сравнительный анализ критериев и практик применения йодной профилактики (ЙП) в различных странах с позиций публикации ВОЗ (2017 г.) «Блокирование щитовидной железы от поступления радиоактивного йода. Руководство для использования при противоаварийном планировании и аварийном реагировании на ядерную или радиационную аварийную ситуацию» (Руководство ВОЗ) и отечественных требований, изложенных в СанПин 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) и других документах, включая объектовые и территориальные противоаварийные планы и содержащиеся в них инструкции.

Результаты: Руководство ВОЗ, подготовленное с использованием метода GRADE, определяет условную рекомендацию в пользу проведения ЙП при возникновении выброса радиоактивного йода: «Во время радиационной или ядерной чрезвычайной ситуации обеспечение ЙП для людей, у которых имеется риск воздействия радиоактивного йода, должно быть реализовано в качестве неотложного защитного действия в рамках обоснованной и оптимизированной стратегии защиты». В Руководстве ВОЗ такая рекомендация признана качественно низкой, а сила данной рекомендации условной, вследствие недостаточности данных об использовании препаратов стабильного йода. Однако после изучения вопросов реализации данной защитной меры было определено, что преимущества вмешательства перевешивают недостатки и связанные с этим затраты. В статье содержится выборочное обсуждение и мнение авторов по ряду ключевых вопросов организации и проведения ЙП.

Заключение: Сравнительный анализ выявил схожесть и различия зарубежных и отечественных практик проведения ЙП. Сближение позиций необходимо и направлено на гармонизацию национальных и международных критериев и практик. На сегодняшний день в российской нормативной базе отсутствует документ федерального уровня, регламентирующий порядок планирования, организации и проведения ЙП в отношении населения, не связанного с работой на радиационно опасных объектах и не проживающего на территориях, обслуживаемых ФМБА России. Исходя из этого, определен круг первоочередных важных вопросов, требующих решения.

Ключевые слова: радиационная безопасность, противоаварийное планирование, аварийное медицинское реагирование, йодная профилактика, радиационная авария, дозовые критерии

Для цитирования: Метляев Е.Г., Богданова Л.С., М Грачев.И., Саленко Ю.А., Фролов Г.П., Лягинская А.М. Международные и отечественные подходы к проведению йодной профилактики при аварии ядерного реактора. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):66-72.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-66-72

Введение

В конце 2017 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) выпустила публикацию «Блокирование щитовидной железы от поступления радиоактивного йода. Руководство для использования при противоаварийном планировании и аварийном реагировании на ядерную или радиационную аварийную ситуацию» [1] (далее – Руководство ВОЗ). Этот документ является обновленной версией Руководства ВОЗ от 1999 г., оно предназначено в качестве технического пособия для органов здравоохранения и специалистов в области общественного здравоохранения, ответственных за планирование и проведение ЙП в случае возникновения радиационной аварии. Документ дополняет соответствующие международные стандарты безопасности и технические руководства, опубликованные МАГАТЭ. Целью Руководства ВОЗ является представление стандартных рекомендаций по поддержанию готовности систем общественного здравоохранения к радиационным ситуациям в соответствии с международным определением роли и значения общественного здравоохранения в практической работе по проведению ЙП.

Поддержка осуществляется путем предоставления технического руководства, главными задачами которого являются:

- оценить базу фактических данных и дать рекомендации по проведению ЙП в случае чрезвычайных ситуаций радиационного характера, включая сведения о сроках и кратности ее применения при продолжа-

ющейся радиационной ситуации с выбросом радиоактивного йода;

- выделить критические (уязвимые) группы населения и уточнить применимость и методы ЙП для этих групп, учитывая вероятность развития побочных эффектов и осложнений, связанных с использованием йодида калия.

Как показала практика при уже случившихся ядерных авариях, применение стабильного йода в качестве профилактической меры никогда не осуществлялось должным образом, т.е. с соблюдением всех необходимых мероприятий, предусмотренных планом реагирования. В ходе ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС ЙП была проведена с задержкой и в недостаточном объеме, наблюдалась организационная неподготовленность и неполный охват населения [2, 3]. Это привело к высоким дозам облучения части детского населения в ряде районов Белоруссии, России и Украины с последующим развитием радиогенной патологии щитовидной железы (ЩЖ) [4, 5]. При аварии на АЭС Фукусима в 2011 г. таблетки йодида калия были распространены среди населения префектуры Фукусима, однако их прием не осуществлялся, несмотря на наличие соответствующей инструкции [6].

По этим причинам недостаточно прямых доказательств эффективности применения стабильного йода в условиях ядерной аварии с выбросом большого количества радиоактивного йода в окружающую среду. Это приводит к различным интерпретациям существующих рекомендаций, в связи с чем, в Руководстве ВОЗ было

сделано заключение о необходимости разработки дополнительных указаний по вопросам практических мер проведения ЙП.

Целью настоящей статьи явился сравнительный анализ критериев и практик проведения ЙП в различных странах с позиций Руководства ВОЗ и отечественных требований, изложенных в СанПин 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) [7] и других документах, включая объектовые и территориальные противоаварийные планы и содержащиеся в них инструкции [8–11].

В обзор были также включены основные рекомендации (нормы) МАГАТЭ [12, 13] и материалы Научного комитета ООН по действию атомной радиации [4].

Результаты и обсуждение

В основе Руководства ВОЗ группа международных экспертов использовала метод GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation) – систему оценки достоверности в доказательствах и качества клинической информации. В настоящее время эта система принята ведущими международными и национальными медицинскими организациями как оптимальный принцип градации клинической информации в рекомендациях [14]. Подход GRADE считается стандартом при составлении систематических обзоров и разработке руководств. В Руководстве ВОЗ качество доказательств было разделено на высокое, среднее, низкое и очень низкое. Чем выше качество доказательств, тем сильнее обязательность рекомендации. Были исследованы факторы, которые влияют на градацию силы рекомендаций: приоритетность проблемы, значения и преимущества, баланс пользы и вреда, использование ресурсов, объективность, приемлемость, целесообразность. Исследование данных факторов послужило основой для разработки условных и безусловных рекомендаций, касающихся применения ЙП.

С использованием метода GRADE и систематического подхода составления рекомендаций, прозрачности оценок и факторов, влияющих на рекомендации, была разработана «Структура доказательств», которая включена в документ в качестве приложения и раскрывает методологию работы над документом.

В Руководстве ВОЗ содержится основополагающее утверждение, представляющее собой рекомендацию в пользу осуществления ЙП в случае выброса радиоактивного йода: «Во время радиационной или ядерной чрезвычайной ситуации обеспечение ЙП для людей, у которых имеется риск воздействия радиоактивного йода, должно быть реализовано в качестве неотложного защитного мероприятия в рамках обоснованной и оптимизированной стратегии защиты». Данная рекомендация получила качественную оценку экспертов как «очень низкую», а силу рекомендаций как условную. Это связано с недостаточностью данных в пользу использования препаратов стабильного йода во время реальных радиационных чрезвычайных ситуаций, т.к. ни одно из исследований, включенных в рассмотрение, напрямую не затрагивало влияние ЙП на возникновение рака щитовидной железы, гипотиреоза и доброкачественных узлов ЩЖ в случае радиационной или ядерной аварии.

Однако разработчики Руководства ВОЗ после изучения факторов, влияющих на градацию силы рекомен-

даций, определили, что преимущества вмешательства перевешивают недостатки и связанные с этим затраты. Такая условная рекомендация предусматривает необходимость проведения дополнительных исследований. В Руководстве ВОЗ даются также общие рекомендации по проведению ЙП, в частности, ее не следует рассматривать как самостоятельную защитную меру.

Несомненно, ЙП, направленная на предотвращение облучения ЩЖ, должна осуществляться вместе с другими защитными мерами. Как нам представляется, здесь важно правильно соотнести эффективность каждой защитной меры и их совокупности в зависимости от условий развития радиационной обстановки и времени их проведения. Так, например, при достижении значений прогнозируемой дозы, при которой требуется эвакуация населения, учитывая затраты времени на организацию сбора и передвижение людей, ЙП необходимо проводить уже в местах сбора на эвакуационных или на маршруте следования. С другой стороны, если доза облучения ЩЖ может в течение нескольких дней превысить значение 50 мЗв, но при этом не превышен формальный дозовый критерий для проведения эвакуации населения (50–500 мЗв), то целесообразно рассмотреть необходимость эвакуации беременных женщин, особенно в случае угрозы пролонгированного выброса. Следует подчеркнуть, что ЙП должна использоваться, прежде всего, для защиты ЩЖ при ингаляционном пути поступления радиоактивного йода. В этом случае прием препаратов стабильного йода носит, как правило, однократный или кратковременный характер (до 2 суток в случае пролонгированного выброса). Имеющиеся рекомендации о приеме стабильного йода до 5 дней в случае угрозы облучения ЩЖ по пищевой цепочке (при употреблении молочных продуктов и свежей зелени) следует рассматривать в качестве вынужденной и крайней меры при невозможности ограничить использование или заменить местные сельскохозяйственные продукты.

Руководство ВОЗ использует в качестве основного критерия для проведения ЙП прогнозируемую эквивалентную дозу для ЩЖ 50 мЗв за первые 7 дней от начала облучения, который представлен в стандартах безопасности МАГАТЭ GSR Part 7 «Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации» [12] и GSG-2 «Критерии для использования при обеспечении готовности и реагирования в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации» [13]. Значения критериев, действующие в различных странах, приведены в табл. 1.

В нашей стране приняты критерии для проведения ЙП по двум уровням А и Б: 250 мГр и 2500 мГр – для взрослых; 100 мГр и 1000 мГр – для детей, соответственно. Эти критерии установлены в НРБ-99/2009 в виде предотвращаемой дозы за первые 10 суток. Диапазон предотвращаемых защитной мерой доз облучения имеет характер возможного (уровень А) и обязательного (уровень Б) применения защитной меры с ожидаемой эффективностью. Для начала проведения ЙП у детей и беременных женщин рассматривается также прогнозируемая доза облучения ЩЖ 50 мГр [11]. Из сравнения (табл. 1) видно, что в международной практике решение о проведении ЙП может быть принято при меньшем дозовом уровне (50 мЗв) и одновременно для всех категорий населения.

Таблица 1

Критерии для проведения йодной профилактики
The criteria for an iodine prophylaxis

Страна	Дозовый критерий, тип дозы
МАГАТЭ	50 мЗв; прогнозируемая доза за первые 7 суток [12]
ВОЗ	50 мЗв; прогнозируемая доза за первые 7 суток [1]
Российская Федерация	250 мГр (А) – 2500 мГр (Б) для взрослых; 100 мГр (А) – 1000 мГр (Б) для детей; предотвращаемая доза за первые 10 суток [7]
Белоруссия	50 мЗв; прогнозируемая доза за первые 7 суток [15]
Бельгия	50 мЗв для взрослых; 10 мЗв для детей, беременных и кормящих женщин; прогнозируемая доза [16]
Чехия	100 мЗв; предотвращаемая доза [16]
Финляндия	100 мЗв для взрослых; 10 мЗв для детей; прогнозируемая доза [16]
Франция	50 мЗв; прогнозируемая доза [16]
Германия	250 мЗв для взрослых; 50 мЗв для детей и подростков до 18 лет и беременных женщин; прогнозируемая доза [16]
Венгрия	100 мГр; предотвращаемая доза [16]
Италия	100 мЗв для взрослых; 10 мЗв для новорожденных, детей и подростков до 18 лет, беременных и кормящих женщин [16]
Литва	100 мГр для взрослых до 40 лет, 5 Гр для взрослых старше 40 лет; 10 мГр для новорожденных, детей и подростков до 18 лет, беременных и кормящих женщин; прогнозируемая доза [16]
Польша	100 мГр; прогнозируемая доза [16]
Румыния	30–300 мЗв за 24 часа; прогнозируемая доза [16]
Словения	100 мГр; предотвращаемая доза [16]
Испания	100 мГр; прогнозируемая доза за 2 суток [16]
Швеция	Нет цифрового значения критерия. Нет времени, для того чтобы сначала измерить содержание йода в воздухе, а затем определиться с препаратами йода. Поскольку побочные эффекты стабильного йода очень малы, принято решение рекомендовать прием заранее распределенных таблеток, если есть даже небольшой риск. 1–10 мГр для детей в случае аварийной ситуации в радиусе 15 км; прогнозируемая доза [16]
Швейцария	30–300 мЗв; прогнозируемая доза за 2 суток [16]
Турция	100 мЗв; предотвращаемая доза [16]
Япония	100 мЗв; предотвращаемая доза [17]
США	5 Гр для взрослых старше 40 лет; 100 мГр для взрослых от 18 до 40 лет; 50 мГр для новорожденных, детей, подростков, беременных и кормящих женщин [18]
Великобритания	100 мГр для взрослых; 30 мГр для детей; предотвращаемая доза [19]

При разработке НРБ-99/2009, считалось, что наличие двухуровневого дозового диапазона (уровни А и Б) дает возможность принятия решения на проведение данной защитной меры в зависимости от условий развития радиационной обстановки с учетом демографических показателей (численности и возрастного распределения населения), возможностей своевременной организации проведения ЙП и других факторов [20]. При подготовке новой редакции Норм радиационной безопасности (НРБ-2019) было предложено принять одноуровневую систему дозиметрических критериев вмешательства с оценкой прогнозируемой эффективной дозы, как меры приемлемого риска для минимизации возможных стохастических эффектов облучения ЩЖ.

В Руководстве ВОЗ отмечается тенденция к дальнейшей гармонизации подходов и согласованному проведению защитных мер в соседних странах в случае аварии в непосредственной близости от границы. Так, например, Бельгия, Германия, Люксембург и Швейцария объединили работы в данной области. Российская Федерация с соседними странами имеет 13 действующих межгосударственных соглашений [16] в области предупреждения и управления авариями и

межправительственных соглашений о раннем оповещении. В рамках межгосударственных соглашений и договоров устанавливаются каналы связи для оповещения и обмена информацией в случае чрезвычайной ситуации.

Своевременное оповещение и полное информирование населения об угрозе или возникновении радиационной аварии является важной составляющей аварийной готовности, позволяющей добиться организованности действий, предотвращения паники и необоснованного применения препаратов стабильного йода, снижения уровня психологического напряжения. Для исключения случаев передозировок, медицинскими работниками должна проводиться разъяснительная работа через средства массовой информации о порядке применения и показаниях к использованию препаратов йода.

В зарубежной практике для защиты ЩЖ от радиоактивного йода наиболее часто применяется йодид калия (KI) в таблетках, однако могут использоваться и другие препараты, такие как йодат калия (KIO₃). Сроки хранения препаратов в европейских странах варьируются от 36 до 180 месяцев (в Швеции – 15 лет). Стабильный йод допускается также назначать внутрь в виде 5 % йод-

ной настойки и путем нанесения на кожу 2,5-5 % йодной настойки в виде полос на предплечье или голень (для детей до 5 лет).

В Российской Федерации основным официальным препаратом стабильного йода является йодид калия в таблетках (125 мг и 40 мг в упаковке по 1, 2 и 10 таблеток). Предусмотрены также способы хранения препарата по 50, 100, 1000, 5000 таблеток в банках или флаконах из темного стекла, однако такая форма хранения может быть неудобна для оперативной раздачи препарата в экстремальных условиях радиационной аварии. Срок годности, при условии соблюдения правил хранения, составляет 4 года [9]. Всевозможные растворы йода из аптечной сети могут быть приняты внутрь или нанесены на кожу в случае вынужденной необходимости – при отсутствии препаратов стабильного йода в таблетках.

Побочные эффекты стабильного йода, включают редкие, но клинически значимые реакции, например, у пациентов с герпетиформным дерматитом или гипоклемментарным васкулитом. При производстве препаратов рекомендуется избегать использования добавок, таких как красители, поскольку они могут вызывать аллергические реакции. Для предупреждения побочных эффектов хорошей европейской практикой считается проведение врачами лечебных учреждений, расположенных в зоне противоаварийного планирования, предварительного профилактического скрининга населения с целью выявления возможных индивидуальных противопоказаний к назначению йодида калия среди населения, особенно в районах с дефицитом йода в рационе питания и водопотребления.

Высокая эффективность блокирования ЩЖ препаратами стабильного йода сохраняется в течение первых 4 часов после начала ингаляционного поступления радиоактивного йода. Для достижения полной и гарантированной блокады ЩЖ ИП целесообразно начинать за 8 часов до поступления внутрь радиоактивного йода. Но с практической точки зрения не совсем ясно, каким образом можно обеспечить заблаговременную ИП. Существует мнение о необходимости ее проведения до начала аварийного выброса или сразу же после выброса без каких-либо предварительных оценок в случае плавления (или непредотвратимой угрозы плавления) активной зоны ядерного реактора. В большей степени указанные ситуационные критерии для проведения заблаговременной ИП могут быть использованы в отношении работников радиационно опасных предприятий при введении в действие плана мероприятий по защите персонала с учетом ряда технологических параметров, свидетельствующих о значимой вероятности (угрозе) выхода радиоактивного йода в помещения и на территорию объекта. В отношении населения данный вопрос является более сложным, поскольку корректная оценка прогнозных параметров радиоактивного выброса и метеорологических условий его переноса требует, учитывая меняющуюся аварийную обстановку, по крайней мере, нескольких часов и налаженной системы аварийного мониторинга именно «йодной угрозы». По-видимому, принятие административного решения о заблаговременной раздаче препаратов стабильного йода возможно для ограниченной части населения (мотивированного и информированного соответствующим образом), проживающего в непосредственной близости от источника радиационной опасности на основании предварительного (приблизительного) прогноза. Регистрация повышенных значений мощности дозы ионизирующего излучения датчиками автоматизированной системы радиационного контроля должно служить подтверждением правильности принятого решения для конкретного участка территории. В дальнейшем, при более широком проведении ИП требуется придерживаться численного значения прогнозируемой дозы облучения ЩЖ, используя результаты уточненного прогноза и измерений радиационных параметров в окружающей среде.

Предварительное обеспечение населения препаратами стабильного йода в явном виде не включено в сферу применения рекомендаций, содержащихся в Руководстве ВОЗ. В данной публикации отмечается, что для эффективного применения стабильного йода имеется ограниченное время, поэтому в чрезвычайной ситуации необходимо обеспечить легкий и быстрый доступ к препаратам. В этом случае предварительное распределение стабильного йода среди населения проводится с учетом планов эвакуации и укрытия. При принятии решения о проведении ИП важным элементом «обратной связи» являются операционные критерии, которые отражают реальную обстановку и могут предотвратить ошибки прогнозов или несвоевременное объявление об опасности. В районах, удаленных от мест радиоактивного выброса, вероятно, будет больше времени для принятия таких решений. Стратегические запасы стабильного йода следует хранить в школах, больницах, аптеках, пожарных частях, полицейских участках, центрах гражданской обороны, и других местах, где они могут быть оперативно применены. Обосновано хранение больших запасов стабильного йода, который может быть востребован на значительных расстояниях от потенциального места радиационной аварии.

Обычно, достаточно однократного приема препарата стабильного йода (125 мг для взрослых и 40 мг для детей). Однако повторный прием может потребоваться в случае пролонгированного (более 24 часов) или повторного воздействия (ингаляционного поступления радиоактивного йода), а также вынужденного использования загрязненных продуктов питания и питьевой воды в случае, когда эвакуация невозможна. По мнению ВОЗ, новорожденные, беременные и кормящие женщины и люди старше 60 лет не должны повторно принимать препараты стабильного йода из-за риска побочных эффектов.

В российской практике допускается повторный и многократный прием таблеток KI отдельными группами населения (дети 3–12 лет и подростки 13–18 лет) при продолжающейся угрозе поступления радиоизотопов йода. Для остальных критических групп населения (новорожденные, беременные женщины, кормящие матери) необходимо применять другие виды контрмер: укрытие, эвакуация, контроль содержания радионуклидов в пищевых продуктах. Для практического использования в табл. 2 приведены рекомендуемые дозировки и продолжительность приема йодида калия в соответствии с возрастными группами.

В российской практике допускается повторный и многократный прием таблеток KI отдельными группами населения (дети 3–12 лет и подростки 13–18 лет) при продолжающейся угрозе поступления радиоизотопов йода. Для остальных критических групп населения (новорожденные, беременные женщины, кормящие матери) необходимо применять другие виды контрмер: укрытие, эвакуация, контроль содержания радионуклидов в пищевых продуктах. Для практического использования в табл. 2 приведены рекомендуемые дозировки и продолжительность приема йодида калия в соответствии с возрастными группами.

Таким образом, в международной практике в известной степени сохраняются неоднозначные рекомендации по организации проведения ЙП в различных условиях аварийной радиационной обстановки, проживания населения и обеспеченности медицинскими препаратами. Как нам представляется, решению этой проблемы во многом будет способствовать выполнение однозначного требования об использовании в качестве средства ЙП только таблетированных форм йодида калия. Во-вторых, ЙП должна рассматриваться в качестве защитной меры в отношении ингаляционного пути поступления радиоактивного йода. Одновременный прием стабильного йода и загрязненных продуктов питания является парадоксальной и вынужденной (исключительной) ситуацией, связанной с острым дефицитом продовольствия. Исключение из рациона питания молока из свежих надоев или листовой зелени на ограниченный период времени для сельских жителей вполне осуществимо и в дальнейшем может быть скорректировано поставками продуктов питания из других районов, не затронутых радиоактивными выпадениями. В-третьих, должны быть заранее корректно определены группы и численность организованного и неорганизованного взрослого и детского населения, проживающего на расстоянии 20–30 км, например, от АЭС мощностью свыше 1000 МВт. Это позволит спланировать и создать необходимые запасы препаратов стабильного йода, условия их хранения и способы раздачи.

В Руководстве ВОЗ содержится важное высказывание о допущении добровольной и свободной закупки таблеток стабильного йода населением из-за преимуществ оперативной (своевременной) ЙП и минимальных рисков побочных эффектов. Однако в любом случае информирование населения о том, когда и как использовать препараты должно быть четко закреплено за соответствующим компетентным органом. В Российской Федерации порядок применения препаратов стабильного йода с целью ЙП регламентируется «Требованиями к комплектации лекарственными препаратами и медицинскими изделиями комплекта индивидуального медицинского гражданской защиты (КИМГЗ) для оказания первичной медико-санитарной помощи и первой помощи» (утверждены приказом Минздрава России от 15.02.2013 г. №70н). В этом документе указано, что прием лекарственных препаратов, входящих в состав КИМГЗ, в том числе йодида калия, осуществляется только по назначению медицинских

работников. Требования допускают самостоятельное выполнение назначений, в том числе переданных по системе оповещения, что немаловажно для оперативного реагирования при радиационной аварии [10].

В Руководстве ВОЗ сформулированы рекомендации, которые следует учитывать при проведении ЙП:

- для детей, подростков, беременных и кормящих грудью женщин ЙП, будет более полезной, нежели для людей старше 40 лет;
- если снабжение населения в целом препаратами стабильного йода ограничено, то приоритетным будет являться обеспечение детей, подростков, беременных и кормящих женщин;
- лица, подверженные риску воздействия высоких доз радиоактивного йода (например, аварийные работники, участвующие в операциях по спасению или ликвидации последствий), вероятно, получают пользу от ЙП независимо от их возраста, и им следует обеспечить эту возможность перед началом аварийных работ;
- люди, живущие в йододефицитных районах, более чувствительны к воздействию радиоактивного йода и для таких территорий следует предусмотреть национальные или региональные программы, направленные на ликвидацию дефицита йода.

В соответствии с методическими рекомендациями ФМБА России «Руководство по йодной профилактике в случае возникновения радиационной аварии» [11] для взрослых старше 45 лет ЙП рекомендуется проводить в том случае, если доза на ЩЖ превышает 2,5 Гр, чтобы предотвратить детерминированные эффекты. В Чехии ЙП не проводится для лиц старше 45 лет в случае имеющих противопоказаний. В других странах (Дания, Германия, Венгрия, Литва, Нидерланды, Норвегия, Румыния и Словения) ЙП лицам от 40 до 45 лет не проводится вовсе.

В нашей стране отмечается природный дефицит йода, и нет регионов, где население не подвергалось бы риску развития йододефицитных заболеваний [11]. В условиях йодного дефицита возрастают уровни накопления радиоактивного йода в ЩЖ и есть основание полагать, что риск развития радиационно-индуцированного рака ЩЖ может быть выше, чем в регионах с нормальной йодной обеспеченностью пищевого рациона.

Представляя современный взгляд на проблему ЙП, выпущенное Руководство ВОЗ, наряду с научно-практическими рекомендациями, определило приоритетные

Таблица 2

Дозировка и продолжительность приема KI в зависимости от возраста [11]

Dosage and duration of KI administration depending on age [11]

Группы населения, возраст	Дозировки KI, мг	Путь поступления радиоактивного йода	Продолжительность приема
Новорожденный ребенок	15,6	Ингаляционный, пероральный	Однократно
1 год	13,1	Ингаляционный	Допускается повторный прием (через 24 ч)
3 года	21,9		
7 лет	37,5		
10 лет	78,5		
12 лет	120		
Подростки и взрослые (до 45 лет)	125	Ингаляционный	Допускается повторный и многократный прием (1 раз в сутки в течение 5 сут)
Взрослые (46–70 лет)	125		
Беременные	125		
Кормящие	125		

направления дальнейших исследований по этому вопросу, требующих уточнения и более глубокого изучения:

- дозировка, оптимальное время и схемы для многократного приема стабильного йода в случае повторных или длительных выбросов радиоактивного йода, неблагоприятные последствия для здоровья от приема препаратов стабильного йода;
- обоснованность, приемлемость и общий эффект от проведения ЙП в отношении психосоциальных последствий при радиационных непредвиденных ситуациях;
- детальный анализ передового опыта по организации обеспечения населения препаратами стабильного йода в условиях серьезной радиологической или ядерной аварии и создания запасов стабильного йода, независимо от национальных границ, в интересах проведения согласованных и скоординированных защитных мероприятий.

Заключение

В Руководстве ВОЗ использована современная система оценки качества и силы рекомендаций (GRADE), которая позволяет оценить состоятельность представленных рекомендаций. Структура документа предполагает дальнейшее исследование доказательств, предусмотрена ревизия документа через десять лет после его публикации, а также в случае реального серьезного инцидента, или когда новые существенные доказательства потребуют их незамедлительного пересмотра.

Тем не менее, на наш взгляд использование метода GRADE для оценки доказательств и силы рекомендаций в Руководстве ВОЗ по проведению ЙП является не совсем корректным. Еще до проведения оценок с использованием этого метода было очевидно, что количество источников доказательств (фактических данных) об эффективности применения стабильного йода при имевших место радиационных авариях явно недостаточно. Хорошо известно, что метод GRADE целесообразно применять в случаях, хорошо спланированных больших рандомизированных контролируемых исследований, которые в значительной степени минимизируют предвзятость и случайность результатов.

Как нам представляется, решение о проведении ЙП должно основываться на имеющихся в настоящее время фактических, экспериментальных и гипотетических данных о заведомо большей ожидаемой пользе (желае-

мых последствий) блокады ЩЖ над гораздо меньшими ее нежелательными последствиями, как для здоровья людей, так и для экономики.

Проведенное в статье сравнение подходов к проведению ЙП выявило схожесть и различия зарубежных и отечественных практик. Сближение позиций необходимо направить на гармонизацию национальных и международных критериев и практик. Однако до настоящего времени нет результатов исследований, которые могли бы существенно повлиять на изменение действующих отечественных подходов в этом вопросе.

На сегодняшний день в российской нормативной базе отсутствует документ федерального уровня, регламентирующий порядок планирования, организации и проведения ЙП в отношении населения, не связанного с работой на радиационно опасных объектах и не проживающего на территориях, обслуживаемых ФМБА России, в котором были бы отражены следующие важные аспекты:

- зонирование территории Российской Федерации для целей организации проведения ЙП и распределения запасов препаратов йода [21];
- порядок проведения ЙП и принятия решения о начале ее проведения;
- порядок создания запасов препаратов стабильного йода.

Кроме того, требуется разработка и внедрение четкой, сертифицированной процедуры оценки доз на ЩЖ (по величине выброса, по результатам измерения мощности дозы, объемной активности радиоактивных изотопов йода и др.), медицинских рекомендаций по возможности (ограничениям) использования не таблетированных препаратов стабильного йода. Отсутствуют однозначные требования о необходимости проведения ЙП в отношении лиц старших возрастных групп, женщин на третьем триместре беременности, одновременного проведения укрытия и ЙП.

К числу первоочередных важных вопросов следует отнести: а) приведение в соответствие международных и отечественных дозиметрических критериев для проведения ЙП (численные значения, полная ожидаемая прогнозируемая доза, дифференцированный подход для различных возрастных групп, оценка приемлемости риска и эффективности ЙП и др.); б) соединение технологических и ситуационных критериев для проведения ЙП, в т.ч., до начала выброса или в самом его начале.

International and National Approaches to the Conducting of Iodine Thyroid Blocking in the Accident of a Nuclear Reactor

E.G. Metlyaev, L.S. Bogdanova, M.I. Grachev, Yu.A. Salenko, G.P. Frolov, A.M. Lyaginskaya

A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: Carry out a comparative analysis of the criteria and practices of conduct Iodine thyroid blocking (ITB) in various countries from the standpoint of WHO publication (2017) “Iodine thyroid blocking. Guidelines for use in planning for and responding to radiological and nuclear emergencies” (WHO Guidelines) and national Rules and requirements 2.6.1.2523-09 (NRB-99/2009) and other documents, including facility and territorial Emergency plans and instructions contained therein.

Results: The WHO Guidelines, prepared using the GRADE method, determine the conditional recommendation in favor of conduct ITB in the event of a release of radioactive iodine: “During a radiation or nuclear emergency, the provision of ITB for people who are at risk of exposure to radioactive iodine should be implemented as urgent protective action as part of a justified and optimized protection strategy”. In the WHO Guidelines, such a recommendation is recognized as qualitatively low, and the strength of this

recommendation is conditional, due to insufficient data on the use of stable iodine drugs. However, after studying the implementation of this protective measure, it was determined that the benefits of the intervention outweigh the disadvantages and associated costs. The article contains a selective discussion and opinion of the authors on a number of key issues of organization and conduct ITB.

Conclusion: A comparative analysis revealed the similarities and differences between foreign and national practices of conduct ITB. The convergence of positions is necessary and aimed at harmonizing national and international criteria and practices. To date, there is no federal level document in the Russian regulatory framework that regulates the planning, organization and conduct of ITB in relation to people who are not associated with work at radiation hazardous facilities and do not live on territories served by the FMBA of Russia. Based on this, a range of priority important issues that need to be addressed has been identified.

Key words: radiation safety, emergency preparedness, emergency medical response, iodine thyroid blocking, radiation accident, dose criteria

For citation: Metlyaev EG, Bogdanova LS, Grachev MI, Salenko YuA, Frolov GP, Lyaginskaya AM. International and National Approaches to the Conducting of Iodine Thyroid Blocking in the Accident of a Nuclear Reactor. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):66-72. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-66-72

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. World Health Organization. Iodine thyroid blocking. Guidelines for use in planning for and responding to radiological and nuclear emergencies. Geneva: WHO. 2017. 46 p.
2. Алексакхин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и соавт. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. Под общей ред. Л.А. Ильина, В.А. Губанова. – М.: ИздАТ. 2001. 752 с. [Aleksakhin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, et al. Major Radiation Accidents: Consequences and Protective Measures. Ilyin LA, Gubanov VA, eds. Moscow: IzdAT. 2001. 752 p. (In Russ.).]
3. Савицкий В.Л., Печиборщ В.П., Иванько О.М. и др. Проблемы организации йодной профилактики в Украине при чрезвычайных ситуациях. Экстренная медицина. 2014;(3):21-7. [Savitsky VL, Pechiborshch VP, Ivanko OM, et al. Problems of organizing iodine prophylaxis in Ukraine in emergency situations. Emergency Medicine. 2014;(3):21-7. (In Russ.).]
4. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. Scientific application D to the UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly. New York: UN.2012. 173 p.
5. Герасимов Г.А., Фигге Д. Чернобыль: двадцать лет спустя. Клиническая и экспериментальная тиреоидология. 2006;2(2):5-14 [Gerasimov GA, Figge D. Chernobyl: twenty years later. Clinical and Experimental Thyroidology. 2006;2(2):5-14. (In Russ.).]
6. Hirose K. The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Nuclear Emergency Response Headquarters, Government of Japan). Vienna: IAEA. 2011.
7. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М. 2009. 100 с. [Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow. 2009. 100 p. (In Russ.).]
8. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.24-03. М. 2004. 66 с. [Sanitary rules for the design and operation of nuclear power plants. Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.24-03. Moscow. 2004. 66 p. (In Russ.).]
9. Применение, хранение и обновление комплекта индивидуального медицинского гражданской защиты «Аптечка АП» для профилактики радиационных поражений работников (персонала) организаций и личного состава формирований сил гражданской обороны. Рекомендации ФМБА России 17.39-17-2017. М. 2017. [Application, storage and updating of the kit of individual medical civil protection «First Aid Kit» for the prevention of radiation injuries of workers (personnel) of organizations and personnel of civil defense forces. Recommendations of FMBA of Russia 17.39-17-2017. Moscow. 2017. (In Russ.).]
10. Об утверждении требований к комплектации лекарственными препаратами и медицинскими изделиями комплекта индивидуального медицинского гражданской защиты для оказания первичной медико-санитарной помощи и первой помощи: приказ Минздрава России от 15.02.2013 г. №70н [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rosminzdrav.ru/documents/5457-prikaz-minzdrava-rossii-ot-15-fevralya-2013-g-n-70n> (Дата обращения 29.01.2020). [On approval of the requirements for completing with medicines and medical products a set of individual medical civil protection for primary health care and first aid: Ministry of Health of Russia Order at 02.15.2013 №70n. Available at: <https://www.rosminzdrav.ru/documents/5457-prikaz-minzdrava-rossii-ot-15-fevralya-2013-g-n-70n> (In Russ.).]
11. Руководство по йодной профилактике в случае возникновения радиационной аварии. Методические рекомендации. М: ФМБА России. 2010. 44 с. [Guidelines for stable iodine prophylaxis in the event of a radiation accident. Guidelines. Group Requirements for life support systems in extreme situations and special systems. M. 2010. 44 p. (In Russ.).]
12. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Requirements No. GSR Part 7. Vienna: IAEA. 2015. 102 pp.
13. Criteria for Use in Preparedness and Response for Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety Standards Series No. GSG-2. Vienna: IAEA. 2011.
14. Рабочая группа по оценке, развитию и определению качества (GRADE) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gradeworkinggroup.org> (Дата обращения 29.01.2020). [The Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation (short GRADE). Available at: <http://www.gradeworkinggroup.org> (Accessed 29.01.2020). (In Russ.).]
15. Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия». Утверждены постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 г. № 213. [Sanitary norms and rules "Requirements for radiation safety" and the Hygienic standard "Criteria for assessing radiation exposure". Approved by resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus 28.12.2012. No. 213. (In Russ.).]
16. Medical effectiveness of iodine prophylaxis in a nuclear reactor emergency situation and overview of European practices. Final Report of Contract TREN/08/NUCL/SI2.520028. European Commission Radiation Protection #165. 2010.
17. Guidelines for iodine prophylaxis as a protective measure: information for physicians. Japan Med Association J. 2014;57(3):113-23. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4356652/> (Accessed 02.02.2020).
18. U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration Center for Drug Evaluation and Research (CDER). Guidance Potassium Iodide as a Thyroid Blocking Agent in Radiation Emergencies. 2001.
19. National Radiological Protection Board (NRPB). Stable Iodine Prophylaxis. Recommendations of the 2nd UK Working Group on Stable Iodine Prophylaxis. Vol.12. № 3. 2001.
20. Галушкин Б.А., Богданова Л.С. Принятие решений по защитным мерам для населения в случае радиационной аварии. Технологии гражданской безопасности. 2019;60(2):80-8. [Galushkin BA, Bogdanova LC. Decision Making on Measures to Protect Population in Case of Radiological Accident. Civil Security Technology. 2019;60(2):80-8. (In Russ.).]
21. Аветисов Г.М., Гончаров С.Ф. Проблемы обеспечения готовности к проведению йодной профилактики населению в случае крупномасштабной радиационной аварии. Медицина катастроф. 2014;86(2):8-6. [Avetisov GM, Goncharov SF. Problems of Assured Preparedness for Iodine Prophylaxis of Population in case of Large-Scale Nuclear Accident. Disaster Medicine 2014;86(2):8-6. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. **Financing.** The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов. **Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 08.08.2019. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 08.08.2019. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

И.О. Томашевский¹, И.А. Курникова², R. V. Sargar²

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ИНТРАТИРЕОИДНОГО ЙОДА И ЗАПАСОВ ТИРЕОИДНЫХ ГОРМОНОВ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЕ

¹ Центральная клиническая больница «РЖД-Медицина», Москва² Медицинский институт Российского университета дружбы народов, Москва

Контактное лицо: Томашевский Игорь Остапович, tomash_io@mail.ru

РЕФЕРАТ

Обсуждается необходимость применения рентгеновской компьютерной томографии (РКТ) для оценки *in vivo* концентрации йода непосредственно в щитовидной железе (ЩЖ). В связи с тем, что 80 % интратиреоидного йода находится в фенольном кольце тиреоидных гормонов, структурно располагающихся в коллоиде тиреоглобулина фолликулов как гормональное депо, то показатель интратиреоидного йода (ПИЙ) является индикатором запасов йодосодержащих тиреоидных гормонов непосредственно в органе. Снижение ПИЙ свидетельствует о существенном нарушении функции накопления тиреоидных гормонов в коллоиде тиреоглобулина фолликулов ЩЖ и является ранним высокоточным прогностическим признаком формирования нарушения функции железы. В связи с компенсаторными возможностями организма это нарушение функции может наступить отсрочено (например, через 2 мес после обнаружения снижения ПИЙ). Самым удобным и доступным методом определения ПИЙ является РКТ с томографами двух типов: 1) обычные (стандартные), где ПИЙ определяется по плотности ЩЖ в единицах Хаунсфилда (НУ); 2) томографы с опцией оценки концентрации интратиреоидного йода (КИЙ) в наиболее употребительных единицах измерения – мг/г или мкг/г (используются с 2016 г.). При необходимости перевод одних единиц ПИЙ в другие производят по формуле: КИЙ (в мг/г) = ([плотность в НУ] – 65)/104.

На основании данных литературы и собственных результатов исследования рассчитаны пределы нормальных колебаний ПИЙ у эутиреоидных лиц, которые составляют 85–140 единиц НУ или 200–700 мкг/г интратиреоидного йода. Выявление у обследованного ПИЙ за пределами указанных колебаний свидетельствует о нарушении функции складирования тиреоидных гормонов в ЩЖ, которое в конечном итоге обязательно приведёт к гипотиреозу или гипертиреозу (за исключением случаев, когда пациент принимает левотироксин, мерказолил, β-блокаторы, т.е. препараты, снижающие ПИЙ).

Приводится алгоритм дифференциальной диагностики йододефицитных и йодоиндуцированных нарушений функций ЩЖ, которую можно осуществить только при использовании РКТ: в случае наличия нарушения функции ЩЖ при ПИЙ, составляющего менее 85 единиц НУ или 200 мкг/г КИЙ, она считается йододефицитной; при ПИЙ, составляющем более 140 единиц НУ или 700 мкг/г КИЙ, она считается йодоиндуцированной. Алгоритм предупреждения йодоиндуцированных тиреопатий при йодной профилактике состоит в том, что йодная профилактика не должна назначаться или продолжаться при ПИЙ 140 единиц НУ или 700 мкг/г КИЙ и более.

Ключевые слова: йод, щитовидная железа, гормоногенез, КТ

Для цитирования: Томашевский И.О., Курникова И.А., Sargar R. V. Применение рентгеновской компьютерной томографии для оценки концентрации интратиреоидного йода и запасов тиреоидных гормонов непосредственно в щитовидной железе. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):73–6.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-73-76

Введение

Йод, как известно, входит в состав тиреоидных гормонов, вырабатываемых щитовидной железой (ЩЖ), и она является единственным эндокринным органом, который после синтеза этих гормонов, продолжающегося обычно на протяжении 50 дней, хранит их в структуре ЩЖ (коллоид тиреоглобулина фолликулов) и секретирует тиреоидные гормоны в кровь по запросу организма. Таким образом, интратиреоидный йод является индикатором запасов йодосодержащих тиреоидных гормонов непосредственно в ЩЖ в связи с тем, что 80 % всего йода органа находится в фенольном кольце этих гормонов, и только 20 % галогена не входят в их структуру и присутствуют в тиреоцитах в виде неорганических соединений.

Исследования щитовидной железы методом КТ

В настоящее время оптимальной технологией, позволяющей кроме размеров, объёма и структуры ЩЖ получить информацию об интратиреоидном йоде является рентгеновская компьютерная томография (РКТ) с помощью томографов двух типов:

1. Обычные, стандартные томографы, включая гибридные ОФЭКТ/РКТ – однофотонные эмиссионные компьютерные системы, совмещённые с рентге-

новскими компьютерными системами. В этом случае интратиреоидный йод определяется по радиационной плотности тканей ЩЖ, выражаемой в единицах Хаунсфилда (НУ). При необходимости перевода значения плотности в названных единицах в концентрацию интратиреоидного йода (КИЙ) существует формула: КИЙ (в мг/г) = ([плотность в НУ] – 65)/104.

2. Томографы с опцией оценки интратиреоидного йода в наиболее употребительных единицах измерения концентрации – мг/г или мкг/г (используются с 2016 г.).

Таким образом, эндокринолог с помощью РКТ может вполне доступно получить информацию об уровне йода непосредственно в тканях ЩЖ *in vivo*. Лучевая нагрузка при этом виде исследования является локальной и не превышает 1 мЗв, что позволяет обследовать широкий контингент лиц, включая детей, беременных и кормящих женщин. Необходимость измерять показатель интратиреоидного йода (ПИЙ) обусловлено тем, что он позволяет оценить запасы йодосодержащих тиреоидных гормонов непосредственно в ЩЖ, который невозможно определить никакими другими методами исследования *in vivo*. Если выявлено, что гормональные запасы достаточны, то это свидетельствует об адекватном гормоногенезе в ЩЖ. Снижение запасов тиреоидных гормонов сигнализи-

рует о снижении резервной функции органа, которое приводит к гипотиреозу или гипертиреозу.

По данным литературы можно рассчитать пределы колебаний ПИЙ (то есть индикатора запасов йодосодержащих тиреоидных гормонов) для эутиреоидных пациентов с нормальной структурой ЩЖ. Эти ПИЙ составляют: для обычных РКТ это 85–140 ед. НУ; для РКТ с опцией оценки интратиреоидного йода в наиболее употребительных единицах измерения – 200–700 мкг/г. В йододефицитных регионах мира у здоровых лиц ПИЙ составляет 85–96 единиц НУ или 200–300 мкг/г. В регионах без йодного дефицита ПИЙ колеблется от 96 до 154 единиц НУ или от 300 до 865 мкг/г.

Независимо от уровня йода в окружающей среде при заболеваниях, нарушающих структуру и функцию ЩЖ, отмечается снижение накопления тиреоидных гормонов непосредственно в тканях органа, что отражается на ПИЙ, который уменьшается до 85 единиц НУ и менее (или 200 мкг/г и менее интратиреоидного йода). Указанные снижения показателей встречаются при эутиреозе, но при высоких титрах антитиреоидных антител (вследствие цитолиза тиреоцитов из-за иммунной атаки), а также при гипотиреозе (вследствие невозможности синтеза тиреоидных гормонов, из-за чего уровень интратиреоидного йода падает), тиреотоксикозе (вследствие отсутствия фиксации йодосодержащих тиреоидных гормонов в коллоиде тиреоглобулина из-за иммунной атаки).

Показания к применению КТ

Перечисленные патологические состояния чаще всего встречаются при аутоиммунных заболеваниях (АЗ). Хорошо известно, что по общей популяционной распространенности АЗ ЩЖ занимают первое место в ряду аутоиммунной патологии человека. Падение ПИЙ, наряду с другими показателями АЗ (повышенный титр антитиреоидных антител в крови, данные ультразвукового исследования), по-видимому, может стать важным прогностическим признаком этой патологии, который заключается в том, что чем ниже критического значения показатели интратиреоидного йода (85 единиц НУ или 200 мкг/г по йоду), тем выше вероятность наличия нарушения функции ЩЖ. Однако следует иметь в виду, что при длительном применении с лечебными целями левотироксина, мерказолила, β -блокаторов ПИЙ также снижаются.

При АЗ вследствие иммунной атаки тиреоцитов и изменения их структуры происходит, как было показано выше, существенное снижение запасов тиреоидных гормонов, производимых и хранимых непосредственно в тканях ЩЖ, в фенольном кольце которых находится 80 % йода железы. Это снижение запасов фиксируется снижением ПИЙ. АЗ имеют волнообразное течение и в связи с высокоэффективным механизмом адаптации железы даже при снижении ПИЙ ниже 70 единиц НУ или 100 мкг/г по йоду, у обследованных некоторое время (пока не наступит агрессивное прогрессирование заболевания) может оставаться эутиреоз. При одномоментном существенном повреждении тиреоцитов, например, при радиойодотерапии (или гамма-терапии) и снижении вследствие этого ПИЙ до 73 единиц НУ или 77 мкг/г для интратиреоидного

йода и менее, через 2–3 мес после этого возникает вероятность ~90 % развития гипотиреоза в следующие 4–5 мес. Низкие ПИЙ при гипотиреозе, развивающемся вследствие радиойодотерапии, предшествуют изменениям концентрации ТТГ и тиреоидных гормонов в крови на 2 мес.

Таким образом, вышеизложенные данные диктуют необходимость проведения профилактических исследований ЩЖ с использованием РКТ, что особенно необходимо в йододефицитных регионах. В случае, если у обследуемого выявлена плотность ЩЖ при РКТ ниже 85 единиц НУ (что соответствует менее 200 мкг/г КИЙ), он относится к группе риска по гипотиреозу или гипертиреозу, и ему необходимы дополнительные исследования для уточнения диагноза. В том случае, когда все необходимые исследования выполнены и выявлено только незначительное увеличение размеров ЩЖ при колебании ПИЙ в пределах 75–85 единиц НУ (или 100–200 мкг/г интратиреоидного йода), показана йодная профилактика под контролем РКТ каждые 2 мес с целью предупреждения йодоиндуцированной патологии ЩЖ.

Принято считать, что в целом для здоровья населения преимущества всеобщей йодной профилактики превосходят по позитивной значимости опасность заболевания йодоиндуцированными гипо- и гипертиреозом. С другой стороны, надо отметить, что в последние годы появились сообщения о негативных последствиях многолетней йодной профилактики. Увеличение до 1,5 % (т.е. в 3 раза) заболеваемости гипертиреозом наблюдались в Австрии, Голландии, Сербии, США, Тасмании и ФРГ через 10–15 лет после начала йодной профилактики населения, при частоте этого заболевания до её начала 0,3–0,5 %. Опубликованы данные об увеличении частоты развития папиллярных раков ЩЖ, увеличении числа случаев лимфоидной инфильтрации без злокачественных новообразований и изменения структуры патологии ЩЖ через 5–15 лет после начала йодной профилактики кибной эндемии.

Изложенное выше убеждает, что йодную профилактику оптимально проводить под контролем оценки КИЙ с использованием РКТ. При выявлении ПИЙ более 140 единиц НУ (700 мкг/г интратиреоидного йода) следует сделать перерыв в приёме йодидов на 2 мес (точнее, на 50 дней). Необходимость дальнейшего продолжения йодной профилактики решается после оценки значения ПИЙ и уровня ТТГ в крови. В этой связи надо отметить, что проведение йодной профилактики в США и Китае увеличило ПИЙ у здоровых лиц до соответственно ($M \pm m$) в США 181 ± 3 единиц НУ (или 1112 ± 149 мкг/г интратиреоидного йода), а в Китае до 235 ± 2 и 1639 ± 414 мкг/г. Такое увеличение ПИЙ у людей в этих регионах, по нашему мнению, уже является избыточным и, следовательно, рискованным в плане развития йодоиндуцированной патологии ЩЖ. В настоящее время считается, что одним из последствий бесконтрольной (в плане отсутствия оценки КИЙ в процессе её проведения) непрерывной йодной профилактики стало увеличение уровня АЗ ЩЖ. Общепринято, что в патогенезе тиреоидных АЗ взаимодействуют генетические и экологические факторы. Роль экологических факторов внешней среды в рас-

пространении АЗ состоит в индуцировании аутоиммунного процесса у генетически предрасположенных людей. В последние годы установлено, что одним из экологических факторов риска возникновения АЗ является избыток йода, поэтому при проведении йодной профилактики должна периодически проводиться оценка КИЙ с использованием РКТ.

Следует подчеркнуть, что в последние годы увеличилось потребление населением фармакологических количеств йода, который входит в состав неорганических или органических его соединений, часто применяемых в терапевтических или диагностических целях. Число таких веществ, содержащих различные количества йода, более 29. Нередко пациенты, принимая их, не всегда могут вспомнить их названия. Несмотря на существование высокоэффективного механизма адаптации ЩЖ, избыток йода может вызвать преходящее нарушение тиреоидной функции. Исходя из вышесказанного, при установленном нарушении функции ЩЖ с целью дифференциальной диагностики йодоиндукции всегда показана РКТ с измерением ПИЙ, которая при йодоиндуцированном нарушении функции железы будет увеличена до 140 единиц НУ (700 мкг/г интратиреоидного йода) или выше этого значения. При нарушении функции ЩЖ, не связанной с йодоиндукцией, всегда происходит снижение названных показателей до 85 и менее единиц НУ (200 мкг/г).

При обнаружении изменённых показателей в крови ТТГ и/или тиреоидных гормонов и сомнении в правильности этих значений, например по причине голодания пациента, применения им ряда лекарственных препаратов (дофаминовые средства, цитокинины), стресса, лишения сна, тяжёлого заболевания обследуемого или восстановительного периода после тяжелого заболевания, также показано проведение РКТ с определением ПИЙ, поскольку определение концентрации ТТГ и/или тиреоидных гормонов (за счёт так называемых внетиреоидных факторов) может создать ложное представление о нарушенной функции ЩЖ. При ПИЙ в пределах нормальных колебаний (8–140 единиц НУ или 200–700 мкг/г интратиреоидного йода) функция ЩЖ считается нормальной, так как только при этих значениях показателей интратиреоидного йода возможен адекватный гормоногенез независимо от показателей в крови ТТГ и/или тиреоидных гормонов.

Заключение

Следует подчеркнуть, что оценка концентрации всего йода и запасов тиреоидных гормонов непосредственно в ЩЖ необходима, так как позволяет оценить результат одной из основных функций железы – удержание гормонов в коллоиде тиреоглобулина фолликулов. Наиболее доступным методом для получения информации о запасах йодосодержащих тиреоидных гормонов в ЩЖ является рентгеновская компьютерная томография. Причём этим методом можно получить показатель интратиреоидного йода как в единицах НУ, так и в наиболее употребительных единицах измерения концентрации – мг/г или мкг/г (используются с 2016 г.). Нами на основании данных литературы и собственных результатов исследования рассчитаны пределы нормальных колебаний ПИЙ у эутиреоид-

ных лиц, которые составляют 85–140 единиц НУ или 200–700 мкг/г интратиреоидного йода. Выявление у обследованного ПИЙ за пределами указанных колебаний свидетельствует о нарушении функции складирования тиреоидных гормонов в ЩЖ, которое в конечном итоге обязательно приведёт к гипотиреозу или гипертиреозу (за исключением случаев, когда пациент принимает левотироксин, мерказолил, β -блокаторы – препараты снижающие ПИЙ).

Практические рекомендации

Выработаны следующие рекомендации по определению ПИЙ с использованием РКТ:

1. Оценка наличия риска нарушения функции ЩЖ при профилактических обследованиях. В случаях, когда выявлен ПИЙ, составляющий менее 85 единиц НУ или 200 мкг/г КИЙ либо более 140 единиц НУ или 700 мкг/г КИЙ, пациент относится к группе риска по гипотиреозу или гипертиреозу и ему необходимы дополнительные исследования для уточнения диагноза.

2. Дифференциальная диагностика йододефицитных и йодоиндуцированных нарушений функций ЩЖ. В случае наличия нарушения функции ЩЖ при ПИЙ, составляющем менее 85 единиц НУ или 200 мкг/г КИЙ, она считается йододефицитной; при ПИЙ, составляющем более 140 единиц НУ или 700 мкг/г КИЙ, она считается йодоиндуцированной.

3. Прогнозирование наличия ошибки при определении концентрации ТТГ и/или тиреоидных гормонов в крови за счёт внетиреоидных факторов. При ПИЙ в пределах колебаний 85–140 единиц НУ или 200–700 мкг/г КИЙ функция ЩЖ считается нормальной независимо от показателей в крови ТТГ и/или тиреоидных гормонов, которые могут быть искажены за счёт так называемых внетиреоидных факторов.

4. Оценка индивидуальной и популяционной йодной профилактики и контроль её эффективности. Йодная профилактика не должна назначаться или продолжаться при ПИЙ 140 единиц НУ или 700 мкг/г КИЙ и более с целью предупреждения йодоиндуцированных тиреопатий.

Следует подчеркнуть, что при первичной диагностике эндокринологу в большинстве случаев нужно высокоточное прогнозирование риска формирования нарушения функции ЩЖ. Необходимость такого прогнозирования возрастает, если у обследованного имеются антитиреоидные антитела, и/или достоверное изменение ТТГ и тиреоидных гормонов в крови, и/или наличие гипозоженности ЩЖ при УЗИ. Для оценки степени повышенного риска к дистиреозу врач направляет пациента на РКТ ЩЖ и получает информацию о размере, объёме, структуре и плотности органа в единицах НУ (или в мкг/г КИЙ при наличии соответствующей опции РКТ). Снижение ПИЙ свидетельствует о существенном нарушении функции удержания тиреоидных гормонов в коллоиде тиреоглобулина фолликулов ЩЖ и является ранним высокоточным прогностическим признаком формирования нарушения функции железы. В связи с компенсаторными возможностями организма это нарушение функции может наступить отсрочено (например, через 2 мес после обнаружения снижения ПИЙ).

The Use of X-ray Computed Tomography to Assess the Intrathyroidal Iodine Concentration and its Storage in the Thyroid Gland

I.O. Tomashevskiy¹, I.A. Kurnikova², R.V. Sargar²

¹ Central Clinical Hospital "RZD-Medicine", Moscow, Russia

² RUDN University, Moscow, Russia

ABSTRACT

In this lecture, the need of using X-ray computed tomography (CT) to assess the intrathyroidal iodine concentration and its storage in the thyroid gland has been discussed. Due to the fact that 80 % of intrathyroidal iodine is located in the phenolic ring of thyroid hormones, which are structurally located in colloid-thyroglobulin follicles as a hormonal depot, the parameter of intrathyroidal iodine (PII) is an indicator of the stores of iodine-containing thyroid hormones directly in the organ. A decrease in intrathyroidal iodine indicates a significant functional impairment of storing thyroid hormones in the colloid of thyroglobulin of the thyroid follicles and is an early highly accurate prognostic sign of the formation of gland dysfunction. Due to the compensatory capabilities of the body, this dysfunction may appear late onset (for example, 2 months after detecting a decrease in intrathyroidal iodine). The most convenient and affordable method for determining intrathyroidal iodine is CT with two types of tomographs: 1) standard by which intrathyroidal iodine is determined by the density of the thyroid gland in Hounsfield units (HU); 2) tomographs with the option of assessing the concentration of intrathyroidal iodine (CII) in the most common units of measurement – mg/g or µg/g (used since 2016). If necessary, the conversion of some units of intrathyroidal iodine to others has the formula:

$CII \text{ (in } \mu\text{g/g)} = ([\text{density in HU}] - 65) / 104.$

Based on the literature and our own research results, for the first time, we calculated the limits of normal intrathyroidal iodine fluctuations in euthyroid individuals, which are 85–140 HU units or 200–700 µg/g intrathyroidal iodine. Identification of the examined intrathyroidal iodine beyond the indicated fluctuations indicates the functional impairment of storing thyroid hormones, which ultimately will lead to hypothyroidism or hyperthyroidism (except when the patient is taking levothyroxine, mercazole, β-blockers – drugs that reduce intrathyroidal iodine).

For the first time, an algorithm is presented for differential diagnosis of iodine-deficient and iodine-induced thyroid dysfunctions, which can only be done using CT: if there is a functional impairment of the thyroid gland with intrathyroidal iodine level less than 85 units of HU or 200 µg/g CII, then it is considered iodine deficient; with intrathyroidal iodine level more than 140 units of HU or 700 µg/g of CII, it is considered iodine-induced.

The algorithm for the prevention of iodine-induced thyroid pathology with iodine prophylaxis is that iodine prophylaxis should not be prescribed or continued when intrathyroidal iodine level is 140 units of HU or 700 µg/g of CII or more.

Key words: iodine, thyroid gland, hormone genesis, CT

For citation: Tomashevskiy IO, Kurnikova IA, Sargar RV. The Use of X-ray Computed Tomography to Assess the Intrathyroidal Iodine Concentration and its Storage in the Thyroid Gland. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):73–6. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-73-76

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Томашевский И.О., Кузовлёв О.П., Зарьков К.А. и др. Определение функции щитовидной железы по концентрации интратиреоидного йода. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2007;52(3):25–32. [Tomashevskiy IO, Kouzovlev OP, Zarkov KA, et al. Thyroid Function Estimation via Intrathyroidal Iodine Concentrations. Medical Radiology and Radiation Safety. 2007;52(3):25–32. (In Russ.).]
2. Томашевский И.О., Колосков С.А., Митоян М.Р. и др. Рентгенофлуоресцентный анализ интратиреоидного стабильного йода в оценке функции щитовидной железы. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2007; 52(4):28–34. [Tomashevskiy IO, Koloskov SA, Mitoian MR, et al. X-ray Fluorescent Analysis of Intrathyroid Stable Iodine in the Estimation of Thyroid Function. Medical Radiology and Radiation Safety. 2007; 52(4):28–34. (In Russ.).]
3. Sargar R, Kurnikova IA, Tomashevskiy IO, Mavlyavieva ER. X-ray Computed Tomography in the Evaluation of Intrathyroid Hormone Formation in Diseases of the Thyroid Gland. J Diabetes Res Endocrinol. 2017;1(2):21.
4. Sargar R, Kurnikova IA, Tomashevskiy IO. Differential Diagnosis Between Iodine-Induced Hyperthyroidism and non Iodine-Induced Hyperthyroidism with Computed Tomography. J Clin Mol Endocrinol. 2018;3:35–6.
5. Sargar R, Kurnikova I, Tomashevskiy I. Determination of the Thyroid Gland Density in the Differential Diagnosis of Functional Disorders in Patients with Autoimmune Thyroiditis. Acta Sci Medical Sci. 2019;3(12):23–6.
6. Imanishi Y, Ehara N, Mori J, et al. Measurement of Thyroid Iodine by CT. J Comput Assist Tomogr. 1991;15(2):287–90.
7. Ishibashi N, Maebayashi T, Aizawa S, et al. Computed Tomography Density Change in the Thyroid Gland before and after Radiation Therapy. Anticancer Research. 2018(38):417–21.
8. Kamiyo K. Clinical Studies on Thyroid CT Number in Chronic Thyroiditis. Endocrine J. 1994;41(1):19–23.
9. Lee GS, Patton JA, Brill AB. Serial Thyroid Iodine Content in Hyperthyroid Patients Treated with Radioiodine. J Nucl Med. 1978;19(6):742.
10. Milakovic M, Berg G, Eggertsen R, et al. Determination of Intrathyroidal Iodine by X-ray Fluorescence Analysis in 60- to 65-year Olds Living in an Iodine-Sufficient Area. J Internal Med. 2006;260:69–75.
11. Pandey V, Reis M, Zhou Y. Correlation Between Computed Tomography Density and Functional Status of the Thyroid Gland. J Comput Assist Tomogr. 2016;40(2):316–9.
12. Shao W, Liu J, Liu D. Evaluation of Energy Spectrum CT for the Measurement of Thyroid Iodine Content. BMC Medical Imaging. 2016;16(47):1–5.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 10.02.2020. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 10.02.2020. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

С.М. Шинкарев, О.А. Кочетков, В.Н. Клочков, В.Г. Барчуков**К ДИСКУССИИ О ВНЕСЕНИИ ИЗМЕНЕНИЙ В ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН
ОТ 09.01.1996 № 3-ФЗ «О РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ»**

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

Контактное лицо: Клочков Владимир Николаевич, vnklochkov22@mail.ru

Ключевые слова: население, радиационная безопасность, нормативно-правовое регулирование, федеральный закон, гармонизация с международными требованиями**Для цитирования:** Шинкарев С.М., Кочетков О.А., Клочков В.Н., Барчуков В.Г. К дискуссии о внесении изменений в федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):77-8.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-77-78

В порядке организации широкой дискуссии предлагаем высказаться на страницах журнала по вопросу законодательной инициативы относительно пересмотра Федерального закона от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (далее Федеральный закон № 3-ФЗ), который разрабатывался в 1994–95 гг. и был принят Государственной Думой в конце 1995 г. в период становления российской правовой базы в области атомной энергии, а также на волне радиофобии, сформировавшейся после аварии на ЧАЭС. Это определило ряд существенных недостатков закона, которые ослабили его регулирующее действие. Почти одновременно с Федеральным законом № 3-ФЗ был принят Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» (далее Федеральный закон № 170-ФЗ). Оба этих закона частично дублируют друг друга, а по ряду позиций имеются противоречия. Поэтому за 25 лет действия Федерального закона № 3-ФЗ неоднократно предпринимались попытки внесения в него изменений, оказавшиеся безрезультатными.

В мае 2020 г. на Федеральном портале проектов нормативных правовых актов (<https://regulation.gov.ru/projects>) был размещен для публичного обсуждения проект Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения», разработанный специалистами Роспотребнадзора [1].

В июне 2020 г. во все заинтересованные организации был разослан (исх. от 30.06.2020 № 11407/01-0191) препринт ИБРАЭ РАН [2] по теме «Актуальные вопросы внесения изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»». Надо отнестись должное, указанный препринт содержит аргументированную критику проекта [1], на основании которой сделаны, в частности, следующие выводы:

1. Законопроект не отражает потребностей развития нормативно-правовой базы, в том числе в части гармонизации с международно признанными подходами, прямо предусмотренной Основами государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, утвержденными Указом Президента РФ от 13.10.2018 № 585.

2. Предлагаемый законопроект не обсуждался в широком кругу специалистов. Более того, в списке официальной рассылки проекта в рамках процедур его опубликования на сайте regulation.gov.ru отсутствовали наиболее заинтересованные организации, в том числе органы управления использованием атомной энергии, включая Госкорпорацию «Росатом».

Авторы настоящей статьи вполне солидарны с указанной оценкой авторов препринта [2], а также с рядом их предложений по переработке Федерального закона № 3-ФЗ, особенно с предложением вести разработку изменений в закон более широким кругом специалистов.

Со своей стороны, считаем необходимой не косметическую, а коренную переработку Федерального закона № 3-ФЗ. При этом необходимо иметь в виду, что гармонизация нашего законодательства с международными требованиями необходима как демонстрация нашего сотрудничества с международными организациями для беспрепятственной деятельности на международном рынке услуг и оборудования в области использования атомной энергии. Такой подход не противоречит внесенным изменениям в Конституцию РФ о приоритете российского законодательства над международным.

В плане переработки структуры федерального закона за основу может быть взят опыт разработки и применения Федерального закона РФ от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» (далее Федеральный закон № 190-ФЗ), который учитывает сложившуюся в России новую структуру власти и управления в области использования атомной энергии.

Новый закон «О радиационной безопасности» должен устанавливать:

- исчерпывающую систему понятий и терминов в области обеспечения радиационной безопасности;
- полномочия Правительства РФ, федеральных органов исполнительной власти, органов государственной власти субъектов РФ, органов местного самоуправления в области обеспечения радиационной безопасности;
- структуру федеральных норм и правил, регулирующих обеспечение радиационной безопасности по техническим и радиационно-гигиеническим аспектам.

Очень важно, чтобы нормативно-правовые положения обеспечения радиационной безопасности были установлены именно на уровне федерального закона. Такая затратная область, как обеспечение радиационной безопасности персонала и населения (об этом свидетельствуют многомиллиардные объемы финансирования ФЦП ЯРБ), требует четкого законодательного определения источников финансирования, системы распределения финансов и ответственности органов власти и органов управления всех уровней за рациональное использование финансов и ответственность за достижение требуемого результата. Однако легко убедиться, что даже термины «финансы», «финансирование» и в Федеральном законе № 3-ФЗ, и в предлагаемых изменениях [1] отсутствуют.

Вместе с тем, как в действующем Федеральном законе № 3-ФЗ, так и в предлагаемых изменениях присутствует излишняя детализация нормативных положений. В частности, в ст. 9 установлены основные гигиенические нормативы (допустимые пределы доз) облучения на территории РФ в результате использования источников ионизирующего излучения. Присутствие в ст. 9 Федерального закона № 3-ФЗ числовых значений лишь отдельных дозовых пределов является нелогичным и ни в коей мере не создает целостную систему регулирования доз облучения персонала и населения.

В этом плане полезным представляется сопоставление Федерального закона № 3-ФЗ с упомянутым выше Федеральным законом № 190-ФЗ, в котором нет ни одного цифрового показателя. В Федеральном законе № 190-ФЗ изложены принципиальные нормативно-правовые положения, обеспечивающие законодательное регулирование соответствующей области деятельности. А количественные критерии установлены постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

Есть все основания аналогичным образом перестроить нормативно-правовую базу регулирования радиационной безопасности:

- основные нормативно-правовые положения установить на уровне федерального закона;
- количественные критерии регулирования радиационной безопасности установить в утверждаемых Правительством РФ Нормах радиационной безопасности и Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности;
- нормативно-методические положения, необходимые

для практического регулирования и обеспечения радиационной безопасности, целесообразно устанавливать в документах, утверждаемых органом исполнительной власти, уполномоченным осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор – в части обеспечения радиационной безопасности человека (персонал и население), и органом исполнительной власти, уполномоченным осуществлять федеральный государственный экологический, технологический и атомный надзор – в части радиационной безопасности радиационных объектов и технологий.

Заключение

Поскольку представленные Роспотребнадзором на рассмотрение изменения [1] в Федеральный закон № 3-ФЗ не решают указанные выше проблемы, предлагаем проект Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»» в дальнейшем не рассматривать.

Для выработки концепции и нового текста федерального закона «О радиационной безопасности персонала и населения» необходима консолидация усилий специалистов различных министерств и ведомств, в том числе Российской научной комиссии по радиационной защите (РНКРЗ), Минздрава России, ФМБА России, Роспотребнадзора, Ростехнадзора, Российской академии наук, Госкорпорации «Росатом». Реализовать указанную задачу целесообразно в рамках рабочей группы из компетентных специалистов указанных ведомств и организаций, созданной постановлением Правительства РФ.

Предлагаем специалистам в области радиационной безопасности принять участие в дискуссии по новому закону «О радиационной безопасности персонала и населения».

Discussion

Medical Radiology and Radiation Safety. 2020. Vol. 65. No. 3. P. 77–78

To Discussion on Amendments to the Federal Law as of 09.01.1996 No. 3-FZ «About Radiation Safety of the Public»

S.M. Shinkarev, O.A. Kochetkov, V.N. Klochkov, V.G. Barchukov

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Key words: *pubic, radiation safety, legal regulation, Federal law, harmonization with international requirements*

For citation: Shinkarev SM, Kochetkov OA, Klochkov VN, Barchukov VG. To Discussion on Amendments to the Federal Law as of 09.01.1996 No. 3-FZ «About Radiation Safety of the Public». Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):77-8. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-77-78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Проект Федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»». Официальный сайт для размещения информации о подготовке федеральными органами исполнительной власти проектов нормативных правовых актов и результатах их общественного обсуждения. «Федеральный портал проектов нормативных правовых актов», <https://regulation.gov.ru/projects>. Май 2020. [Draft Federal law «On amendments to Federal law No. 3-FZ of 09.01.1996 On radiation safety of the population». Official website for posting information about the preparation of draft regulatory legal acts by Federal Executive authorities and the results of their public discussion.

«Federal portal of draft normative legal acts», <https://regulation.gov.ru/projects>. May 2020. (In Russ.).

2. Ведерникова М.В., Линге И.И., Панченко С.В. и др. Актуальные вопросы внесения изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». (Препринт. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, № IBRAE-2020-03). М.: ИБРАЭ РАН, 2020. 22 с. [Vedernikova MV, Linge II, Panchenko SV, et al. Topical issues of amendments to the Federal law of 09.01.1996 No. 3-FZ «on radiation safety of the population». (Preprint. In-t of problems of safe development of nuclear energy RAS, no. IBRAE-2020-03). Moscow: IBRAE RAS, 2020. 22 p. (In Russ.).]

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 23.06.2020. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 23.06.2020. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

А.Ю. Бушманов, И.А. Галстян, В.Ю. Соловьев, М.В. Кончаловский**УРОКИ ДЛЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ: АВАРИЯ НА ЧАЭС И ПАНДЕМИЯ COVID-19**

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

Контактное лицо: Галстян Ирина Алексеевна, igalstyan@rambler.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Статья посвящена анализу организационных мероприятий по преодолению медицинских последствий двух широкомасштабных событий: аварии на ЧАЭС 26.04.86 г. и пандемии COVID-19.

Результаты: Проведено сопоставление причин возникновения, основных действующих факторов, числа пострадавших и вовлеченных в эти события, а также наличия исходных знаний о клинической картине, диагностике, профилактике и лечении заболеваний, развивающихся в результате воздействия ионизирующего излучения и действия вируса SARS-Cov-2. Рассмотрена обеспеченность специальными лечебными учреждениями, поражаемость медицинских работников, наличие отдаленных последствий как для здоровья пострадавших, так для экономики в целом.

Выводы: В условиях развития подобных техногенных или природных катастрофических событий важную роль должно играть: 1) своевременное и адекватное информирование населения; 2) необходимо иметь достаточное количество коек, которые могут быть перепрофилированы в соответствии с потребностями сегодняшнего дня и обеспечены соответствующим оборудованием для поддержания жизненно важных функций организма; 3) должна проводиться плановая подготовка квалифицированных медицинских кадров; необходимо иметь большие запасы средств защиты, что позволит в первые дни, недели, месяцы не терять заболевших медицинских работников; 4) необходимо иметь запасы препаратов неотложного назначения (например, йодид калия при радиационной аварии), приближенные к учреждениям, где возможно поступление пострадавших; 5) в специализированных стационарах необходимо возобновить подготовку врачей – специалистов в области радиационной медицины и предусмотреть резервный специализированный коечный фонд для больных с лучевыми поражениями и их отдаленными последствиями.

Ключевые слова: катастрофы, авария на ЧАЭС, новая коронавирусная инфекция, COVID-19

Для цитирования: Бушманов А.Ю., Галстян И.А., Соловьев В.Ю., Кончаловский М.В. Уроки для здравоохранения: авария на ЧАЭС и пандемия COVID-19. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):79-84.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-79-84

Введение

Ход истории демонстрирует, что развитие мировой цивилизации неминуемо сопровождается значительными катастрофами природного, техногенного или смешанного происхождения. Цунами, землетрясения, климатические катаклизмы, вызывающие масштабные наводнения, лесные пожары – вот далеко не полный перечень того, с чем мы сталкивались за последние годы. И, наконец, пандемия с коронавирусом COVID-19 – эпидемическая катастрофа, с которой за последние десятилетия человечество не встречалось. С другой стороны, покорение атома и создание новых источников энергии создало предпосылки для возникновения катастроф техногенного происхождения (авария на ЧАЭС 1986 г.) или смешанного генезиса (авария в Фукусиме 2011 г. в результате воздействия мощного цунами).

При подобных ситуациях перед руководством стран, которых коснулась подобная катастрофа, и мировым сообществом в целом возникает проблема адекватного реагирования. К сожалению, одним из самых важных факторов в принятии решения о вводимых мероприятиях по защите населения является ВРЕМЯ. Фактор времени для принятия административных решений был очень важен в первые дни после аварии на ЧАЭС. И в современной действительности в связи с пандемией COVID-19 экстренные меры, принимаемые руководством стран в период, когда вирус переходит через их границы и начинает распространяться по своим законам, также имеют первостепенное значение для защиты населения, сохранения жизни и здоровья огромного количества людей.

Вторым значимым фактором является деятельность средств массовой информации. Полное молчание в прессе в СССР в первые дни после аварии на

ЧАЭС с последующим «разгулом» всяких инсинуаций «желтой» прессы о сотнях тысяч потенциальных жертв аварии также сыграло немаловажную роль в принятии экстренных малоэффективных по сути защитных мер в прилегающих районах с непрогнозируемыми последствиями. Но мы все чему-то учимся, извлекаем уроки из прошлого и пытаемся не делать ошибок в настоящем. В этой связи, несмотря на возможности Интернета, активно пресекаются всякие попытки вбросов фейковой информации по ситуации с пандемией COVID-19, и населению выдается тщательно выверенная официальная информация о текущем состоянии ситуации на всей территории страны.

Теперь о сути вопроса, прежде всего о медицинской составляющей.

Коллектив ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России был на первом рубеже оказания медицинской помощи практически всем наиболее тяжело пострадавшим при аварии на ЧАЭС с диагнозом острой лучевой болезни (ОЛБ), а в настоящее время наряду с другими медицинскими учреждениями страны проводит лечение больных с инфекцией COVID-19. И есть возможность сопоставить две значимые катастрофы, прежде всего, их значение для жизни и здоровья людей.

Настоящая публикация посвящена обзору основных сложностей при оказании медицинской помощи в вышеуказанных ситуациях и урокам, которые из них необходимо вынести.

Авария на Чернобыльской АЭС

Авария на ЧАЭС произошла 26.04.1986 во время проведения физико-технических испытаний в блоке № 4. Ее развитие в значительной мере было предопределено конструктивными недостатками реактора

РБМК и ошибочными действиями оперативного персонала [1].

Работники аварийной смены блока № 4, пожарные, сотрудники охранного подразделения подверглись воздействию гамма-бета-облучения продуктов деления урана в дозах, вызывавших развитие острых лучевых поражений, и воздействию пара, приведшего к появлению термических ожогов [2, 3]. Два работника блока № 4 погибли от тяжелых механических травм [3]. Недооценка тяжести разрушений руководством смены и администрацией станции, отсутствие точных сведений об уровнях радиационного воздействия в разрушенных помещениях привели к возможно необоснованному переоблучению персонала, участвовавшего в аварийных работах в первые часы после взрыва реактора, развитию у них острой лучевой болезни (ОЛБ) и острых местных лучевых поражений (МЛП) [3, 4]. У некоторых – не совместимых с жизнью.

Необходимо отметить, что неадекватность первых оценок и общая растерянность руководства на различных уровнях привели к замалчиванию факта аварии в течение 2 суток до 28.04.1986 [3]. Первые сведения о произошедшем были получены из скандинавских стран, где 28.04.1986 было зафиксировано увеличение радиационного фона, и по следу радиоактивного облака было высказано предположение о крупной радиационной аварии на территории СССР. Информационное сообщение было опубликовано 30.05.1985 г. [3].

Неадекватная оценка уровней облучения в первые часы после аварии отсрочила мероприятия по изоляции жителей города Припяти в домах. 26.04.1986 город жил обычной жизнью выходного дня. Эвакуация населения состоялась только 27.04.86 [3]. Позднее поэтапно были отселены жители 10 км и 30 км-зоны вокруг АЭС. Всего эвакуации подверглись более 116 тыс. жителей загрязненных территорий [1].

Необходимо отметить, что к моменту аварии на ЧАЭС радиационная медицина в СССР развивалась в течение нескольких десятилетий, и уже был накоплен большой опыт диагностики и лечения острых лучевых поражений [5]. Кроме того, с конца 1960-х гг. в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (тогда Институт биофизики МЗ СССР) в качестве модели ОЛБ рассматривался цитопенический синдром при лечении острого лейкоза. В гематологическом отделении проводились испытания новых лекарственных препаратов, схем лечения, разрабатывалась методика пересадки костного мозга. В эксперименте и клинической практике были получены четкие представления о ближайших и отдаленных последствиях лучевого воздействия в диапазоне доз до 1 Гр [5]. Лечение больных с острыми лучевыми поражениями к 1986 г. на территории СССР проводилось в трех лечебно-профилактических учреждениях: в клиническом отделе ИБФ МЗ СССР на базе больницы № 6 Третьего ГУ МЗ СССР (ныне ФМБА России) (Москва), в МСО № 71 (Челябинск-65, ныне Озерск) и ВМА имени С. М. Кирова (Ленинград, ныне Санкт-Петербург). В них работали опытные кадры, готовые к оказанию медицинской помощи пострадавшим.

Авария на ЧАЭС по общему количеству вовлеченных и пострадавших была одной из самых крупных. В СССР и позднее в РФ не было радиационной аварии с единовременным поступлением большого количества

больных. Все пациенты с развитием острых лучевых поражений были госпитализированы для лечения в специализированную клинику на базе Клинической больницы № 6, остальные – в ряд киевских и московских больниц. В дальнейшем на основе этого опыта была сформирована концепция оказания медицинской помощи на случай массового поступления больных с лучевыми поражениями [7].

Согласно ей, лечение больных с ОЛБ легкой степени может проводиться в амбулаторных условиях или профпатологических отделениях многопрофильных больниц, лечение больных с диагнозом ОЛБ средней, тяжелой и крайне тяжелой степени должно проводиться в специализированном стационаре с привлечением хирургов для лечения сопутствующих местных лучевых поражений. При развитии полиорганной недостаточности больные с ОЛБ крайне тяжелой степени, а также больные с комбинированными поражениями будут нуждаться в лечении в условиях отделения реанимации.

Среди пострадавших в аварии на ЧАЭС у 21 человека развилась ОЛБ крайне тяжелой степени [2]. В том случае, если бы количество больных с полиорганной недостаточностью было бы больше, возникли бы вполне объяснимые трудности в их лечении.

Своевременная санитарная обработка кожных покровов поступающих больных позволила у большинства из них существенно уменьшить радионуклидное загрязнение. Соответственно, эти пациенты в стационаре не представляли опасности в отношении облучения медицинского персонала. Радионуклидное загрязнение сохранялось только на поверхности обширных термических ожогов у двух больных. Использование принципа защиты временем и расстоянием (минимизация времени общения с пациентом, а также увеличение расстояния между медработником и пациентом) при их лечении позволило ликвидировать риски неблагоприятного воздействия на здоровье медицинских работников.

Кроме пострадавших с развитием острых лучевых поражений к вовлеченным в эту аварийную ситуацию могут быть отнесены около 600 тыс. участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС и около 5,1 млн жителей загрязненных в результате аварии территорий [1]. Из возможных эффектов облучения на здоровье этих контингентов реально доказанным является увеличение количества раков щитовидной железы у детей [1, 8].

Несмотря на готовность специализированной медицинской службы, обращение за медицинской помощью большого количества вовлеченных в аварию или эвакуированных лиц высветило ряд недостатков общей системы здравоохранения, заключавшихся в отсутствии знаний в области радиационной медицины, опыта диагностики и лечения возможных лучевых поражений у персонала лечебных учреждений общей сети. С этим была связана гипердиагностика ОЛБ легкой степени тяжести [9]. В первые дни в лечебных учреждениях ощущался дефицит средств защиты и профилактики поражений щитовидной железы (препараты стабильного йода) [1, 8].

Появление новых контингентов лиц, пострадавших от радиационного воздействия в результате аварии на

ЧАЭС, привело к созданию специализированных лечебно-профилактических учреждений на наиболее загрязненных территориях (Украина, Белоруссия, Брянская область), а также специализированных отделений для динамического наблюдения за участниками ликвидации последствий аварии.

Кроме непосредственных медицинских последствий, авария на ЧАЭС повлекла за собой тяжелые последствия для экономики. Она нанесла удар для мировой атомной отрасли (заккрытие многих АЭС), а в СССР (позднее Украине, Белоруссии и Российской Федерации) привела к выведению из сельскохозяйственной деятельности части загрязненных территорий.

После аварии на ЧАЭС прошло 34 года. Главный урок, который был получен из опыта оказания медицинской помощи большому количеству пострадавших с острыми лучевыми поражениями и дальнейшего динамического наблюдения за сотнями тысяч лиц, подвергшихся пролонгированному лучевому воздействию в малых дозах, выявил первоначальную недостаточную информированность работников лечебно-профилактических учреждений общей сети в вопросах диагностики и лечения радиационной патологии, а также недостаточное внимание руководства МЗ СССР к развитию службы радиационной медицины в стране.

Пандемия новой коронавирусной инфекции COVID-19

Подобная ситуация разворачивается в настоящее время на наших глазах. В конце 2019 г. в КНР произошла вспышка новой коронавирусной инфекции с эпикентром в г. Ухане (провинция Хейлуцзян). 11.02.2020 ВОЗ присвоила название новой коронавирусной инфекции – COVID-19, а возбудителю, ее вызывающему, – SARS-CoV-2 [10]. 11.03.2020 ВОЗ объявила пандемию новой коронавирусной инфекции. Природный источник вируса до настоящего времени не обнаружен. Предполагается распространение «дикого» вируса с территории рынка в г. Ухане. Животное-носитель вируса – предположительно летучая мышь. Наиболее распространенным клиническим проявлением новой коронавирусной инфекции является двусторонняя пневмония, у 3–4 % больных наблюдается развитие острого респираторного дистресс синдрома [10].

На момент написания статьи известно, что за 6 мес распространения новой коронавирусной инфекции зараженными в мире являются более 6 млн человек [11].

Появление нового коронавируса и быстрое его распространение в мире поставило перед здравоохранением разных стран задачи профилактики, диагностики и лечения больных COVID-19. Однако, несмотря на то, что в течение полугода медики всего мира борются за жизнь и здоровье людей, сведения об эпидемиологических и клинических особенностях, методах диагностики и лечения до настоящего времени весьма ограничены [10]. Быстрому распространению в мире нового заболевания способствовало широкое развитие экономических, транспортных и культурных связей между различными государствами и внутри отдельных государств с обширной территорией. Адекватно оценить контагиозность и скорость распространения в популяции не позволяло отсутствие четких пред-

ставлений о дифференциальных диагностических признаках заболевания и надежных способах выявления нового вируса в биологических субстратах. В связи с этим принятие противоэпидемических мер на уровне правительств различных государств (национальный уровень) варьировало от отрицания их необходимости (Швеция, Бразилия, Великобритания и др.) до введения жестких карантинно-изоляционных мероприятий на всей территории страны или в отдельных регионах, с закрытием границ и с прекращением транспортного сообщения с другими странами (КНР, Российская Федерация, отдельные страны Евросоюза).

К началу распространения COVID-19 тесты для выявления возбудителя отсутствовали. К настоящему времени они разработаны, но при заборе материала в виде орофарингеальных и назальных мазков вирус выявляется в 30–60 % случаев инфицирования, что не позволяет охватить специальными мероприятиями и адекватным лечением всех зараженных и заболевших [12].

С декабря 2019 г. и до настоящего времени терапия подбирается эмпирическим путем. Эффективная этиотропная терапия до сих пор отсутствует. К настоящему времени несколько лучше разработана патогенетическая (синдромальная) терапия [10, 13–18].

Специфическая профилактика (вакцина) для COVID-19 до настоящего времени также не получена. В связи с этим основными противоэпидемическими мерами (уровень общей популяции) являются: введение карантинных мероприятий и длительных режимов самоизоляции, социальное дистанцирование, использование средств защиты органов дыхания, перчаток, дезинфицирующих средств, а также средств индивидуальной защиты для медработников [10, 14].

Необходимо отметить, что особенности клинического течения новой коронавирусной инфекции в виде развития двусторонней пневмонии различной степени тяжести и острого респираторного дистресс синдрома у 3–4 % больных [10, 15–18] при массовом заражении становится очень серьезной нагрузкой на систему здравоохранения практически всех стран мира. В связи с тем, что лечение больных в условиях реанимации всегда является дорогостоящим, в большинстве стран количество реанимационных коек, обеспеченных соответствующей аппаратурой для поддержания функций различных органов и систем, и число квалифицированных специалистов-реаниматологов находятся на уровне, соответствующем потребностям здравоохранения в обычных (не-эпидемических) условиях. В связи с этим в большинстве стран мира в условиях пандемии вирусного заболевания ощущается острая потребность как в дополнительных аппаратах жизнеобеспечения (ИВЛ, ЭКМО и др.), так и квалифицированных кадрах, особенно при их выбытии на длительный срок в случае карантина и заражения. С учетом вышесказанного в странах с наибольшим распространением COVID-2019 возникла необходимость разворачивания большого количества дополнительных инфекционных и реанимационных коек, обеспеченных подводкой кислорода, значительного увеличения количества аппаратов ИВЛ и ускоренно обученных реанимационных кадров, а также увеличения общего количества медицинских

работников за счет привлечения врачей других специальностей, ординаторов и студентов.

Необходимо отметить, что медработники являются одной из социальных групп, в первую очередь поражаемой новой высококонтагиозной коронавирусной инфекцией [10, 17]. Первые случаи заболеваний в этой группе были, несомненно, связаны с недостатком эффективных средств защиты (изолирующие костюмы, респираторы и др.). Однако и на сегодняшний день заболевания медработников – не редкость. По-видимому, они могут быть связаны также и с заражением вне «красной» зоны при контакте с вирусоносителями со скрытой формой протекания заболевания или больными с отрицательными результатами тестов на COVID-19.

Заболевание медицинских работников коронавирусной инфекцией имеет ключевое значение, так как при этом уменьшается (а в отдельных медицинских учреждениях и значительно) количество специалистов, способных оказывать квалифицированную медицинскую помощь и адекватный уход за больными. Ускоренное обучение медицинских работников различной узкой специализации не всегда приводит к нужному результату, так как для освоения и эффективного использования такой сложной медицинской аппаратуры, как аппараты ИВЛ, требуется весьма значительное время, которого в сложившейся реальности оказывается недостаточно.

Подводя итог, нужно сказать, что отдаленные последствия для перенесших новую коронавирусную инфекцию пока неизвестны. Неясной остается и воз-

можность заболевания при повторном заражении COVID-19. Нельзя отрицать тот факт, что пандемия уже к сегодняшнему дню нанесла серьезный удар по мировой экономике. Интегральный ущерб может достигать астрономических значений в сотни миллиардов, или даже триллионы долларов. Последующий за этим кризис может быть настолько всеобъемлющим, что предвидеть все его последствия крайне сложно.

Для медицинской отрасли, с одной стороны, получен значимый импульс для ее развития и ориентации на сохранение жизни и здоровья всего населения страны, с другой стороны, вполне вероятно, что жить в условиях пандемии придется долго и необходимо продолжать вести разъяснительную работу в средствах массовой информации как уберечься от инфекции и как поступать в случае появления признаков заболевания для уменьшения вероятности заражения людей, с которыми приходится контактировать. Нельзя также исключить определенные мутации коронавируса, придающие ему более значимые патогенные свойства и/или появление других вирусов, несущих гораздо большие угрозы для человеческой популяции. В то же самое время получен громадный опыт реагирования и на такие, новые типы угроз.

Сопоставление ситуаций аварии на ЧАЭС и пандемии COVID-19

В таблице приведена информация по сравнению двух катастрофических событий с точки зрения непосредственных участников в медицинских мероприятиях по диагностике и лечению пострадавших.

Таблица

Сопоставление ситуаций аварии на ЧАЭС и пандемии COVID-19
Comparison of Chernobyl accident and pandemic situations COVID-19

Авария на ЧАЭС 26.04.1986	Пандемия COVID-19 2020 г.
Причина	
Конструктивные недостатки реактора РБМК, ошибочные действия оперативного персонала [1].	Природный источник вируса не обнаружен. Предполагается распространение «дикого» вируса с территории рынка в г. Ухане (КНР). Животное-носитель вируса – предположительно летучая мышь [10].
Основной действующий фактор	
Гамма-бета-излучение продуктов деления урана [1].	Вирус SARS-CoV-2, вызывающий развитие новой коронавирусной инфекции COVID-19 [10].
Число пострадавших	
Острые лучевые поражения – 134 человека, среди них у 2 – термические ожоги, у 1 – механическая травма. Вовлеченные в аварийную ситуацию без диагноза лучевых поражений – 103 человека, 30 погибших (2 во время взрыва и 28 в первые три месяца после аварии от облучения) [2–4]. Участники ликвидации последствий аварии (около 600 тыс.), жители загрязненных территорий (5,1 млн) [1].	Более 6 миллионов (6302318 инфицированных, из них 376 210 умерших, данные Университета Джона Хопкинса на 02.06.2020 г.). В том числе в РФ: 423186 инфицированных, 5031 умерших [11]. Рост числа инфицированных и погибших продолжается.
Клиническая картина	
До аварии была хорошо известна.	К началу распространения коронавируса неизвестна. Новые симптомы и синдромы выявляются и описываются до сих пор.
Диагностика и лечение	
Основные диагностические тесты и принципы лечения были хорошо известны, так как разрабатывались в течение многих десятилетий до аварии. У пострадавших на ЧАЭС с острыми лучевыми поражениями оценивалась эффективность некоторых новых лекарственных средств и процедур, которые в доаварийном периоде изучались в эксперименте и на модели острой лучевой болезни – больных острым лейкозом.	К началу распространения вируса тесты для его выявления отсутствовали. К настоящему времени они разработаны, но при заборе материала в виде орофарингеальных и назальных мазков вирус выявляется в 30–60 % случаев [12] инфицирования, что не позволяет охватить специальными мероприятиями и адекватным лечением всех зараженных и заболевших. С декабря 2019 г. и до настоящего времени терапия подбирается эмпирическим путем. Эффективная этиотропная терапия до сих пор отсутствует. К настоящему времени несколько лучше разработана патогенетическая (синдромальная) терапия [10].

Авария на ЧАЭС 26.04.1986		Пандемия COVID-19 2020 г.	
Профилактика			
Соблюдение техники безопасности на производстве, норм радиационной безопасности, назначение препаратов йода при радиационной аварии.		Специфическая профилактика: COVID-19 вакцина отсутствует. Неспецифическая профилактика: введение карантинных мероприятий и длительных режимов самоизоляции. Использование средств защиты органов дыхания, перчаток, дезинфицирующих средств, а также средств индивидуальной защиты (СИЗ) для медработников. Социальное дистанцирование [10, 14].	
Принятие специальных мероприятий по уменьшению контактов населения с поражающим фактором			
28.04.1986 эвакуация жителей г. Припяти. Вслед за этим – отселение жителей 10 км зоны, позднее – 30 км зоны. Назначение препаратов йода, у отдельных контингентов использование СИЗ [1, 8].		Изоляционные мероприятия (перевод школ и ВУЗов на дистанционное обучение, домашняя изоляция возрастных групп населения старше 65 лет, перевод значительных контингентов работников на удаленный режим работы). Карантин для заболевших COVID-19 и вирусоносителей. Проведение мероприятий по дезинфекции помещений и территорий [14].	
Информационная поддержка			
Замалчивание факта аварии в течение 4 суток до 30.04.1986 [3]. Первые сведения о произошедшей аварии были получены из скандинавских стран, где было зафиксировано увеличение радиационного фона и по следу радиоактивного облака было высказано предположение о радиационной аварии на территории СССР [3].		Неопределенность в оценке масштабов эпидемии в КНР в течение по крайней мере одного месяца до января 2020. Длительное отрицание факта передачи вируса от человека к человеку. Появление заболевших коронавирусной инфекцией в разных странах мира после посещения территории КНР, Южной Кореи и Ирана привело к объявлению ВОЗ 11.03.2020 пандемии COVID-19 [10].	
Обеспеченность специализированными лечебно-профилактическими учреждениями			
Возникла необходимость создания специализированных лечебно-профилактических учреждений на наиболее пострадавших территориях (Украина, Белоруссия, Брянская область РФ).		В странах с наибольшим распространением COVID-2019, в том числе в РФ, возникла необходимость разворачивания большого количества дополнительных инфекционных и реанимационных коек, обеспеченных подводкой кислорода, а также значительного увеличения количества аппаратов ИВЛ и обученных реанимационных кадров.	
Поражаемость медицинских работников, оказывающих медицинскую помощь			
Отсутствовала		Высокая заболеваемость COVID-19	
Отдаленные последствия для вовлеченных в ситуацию			
Рост частоты рака щитовидной железы у детей [1, 3, 8], частая инвалидизация больных, перенесших острые лучевые поражения [3].		Неизвестны. Отсутствуют данные о возможности повторного заражения.	
Последствия для экономики			
Тяжелый удар для мировой атомной отрасли (закрытие многих АЭС), выведение из сельскохозяйственной деятельности загрязненных территорий.		Временное прекращение авиа-, железнодорожного и других видов сообщения, закрытие многих промышленных предприятий, закрытие средних и мелких предприятий с частичной потерей рабочих мест.	

Выводы

1. Возникновение катастрофических событий может сопровождаться нерешительностью административных органов и запаздыванием с введением необходимых мероприятий по защите населения (информационное замалчивание и отсутствие адекватного реагирования в первые дни после аварии на ЧАЭС и непринятие экстренных карантинных мер при пандемии COVID-19 в некоторых странах), что приводит к неоправданно большому количеству пострадавших, требующих оказания высококвалифицированной медицинской помощи.

2. Общественное здравоохранение должно быть готово к подобным вызовам. Необходимо иметь достаточное количество коек, которые могут быть перепрофилированы в соответствии с потребностями сегодняшнего дня и обеспечены соответствующим оборудованием для поддержания жизненно важных функций организма.

3. Вполне очевидно, что должна проводиться плановая подготовка квалифицированных медицинских кадров. Необходимо расширить программы подготовки врачей-специалистов: гематологи и хирурги

должны быть ознакомлены с клиникой, диагностикой и лечением острых лучевых поражений, пульмонологи должны иметь подготовку в области реаниматологии и искусственной вентиляции легких. Необходимо иметь большие запасы средств защиты, что позволит в первые дни, недели, месяцы не терять заболевших медицинских работников.

4. Для предотвращения угроз радиологического характера (техногенные аварии, террористическая деятельность) необходимо иметь запасы препаратов неотложного назначения (например, йодид калия при радиационной аварии), приближенные к учреждениям, где возможно поступление пострадавших.

5. В специализированных стационарах (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ВМА им. С.М. Кирова, ЮуриБФ ФМБА России) необходимо возобновить подготовку врачей – специалистов в области радиационной медицины и предусмотреть резервный специализированный коечный фонд для больных с лучевыми поражениями и их отдаленными последствиями. Понятно, что в современных условиях необходимо государственное финансирование подобных «резервных» больниц, коек, оборудования и расширенного образования специалистов.

Lessons for Health Service: the Chernobyl Accident and the COVID-19 Pandemic

A.Yu. Bushmanov, I.A. Galstyan, V.Yu. Soloviev, M.V. Konchalovsky

A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: The article is devoted to the analysis of organizational measures to overcome the medical consequences of two large-scale events: the Chernobyl accident on 26.04.1986 and the COVID-19 pandemic.

Results: A comparison of the causes, key factors, numbers affected and involved in these events persons, and the availability of the source of knowledge about the clinical picture, diagnosis, prevention and treatment of diseases, developing as a result of radiation exposure and the virus SARS-CoV-2. The article considers the availability of special medical institutions, the infectability of medical workers, the presence of long-term consequences for the health of victims and for the economy.

Conclusions: In the development of such catastrophic events, an important role should be played by 1) Timely and adequate information to the population. 2) It is necessary to have a sufficient number of beds that can be repurposed in accordance with the needs and provided with appropriate equipment to support the vital functions of the body. 3) Planned training of qualified medical personnel should be carried out. 4) It is necessary to have stocks of emergency drugs close to the institutions where it is possible to receive victims.

Key words: disasters, Chernobyl accident, a new coronavirus infection, COVID-19

For citation: Bushmanov AY, Galstyan IA, Soloviev VYu, Konchalovsky MV. Lessons for Health Service: the Chernobyl Accident and the COVID-19 Pandemic. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):79–84. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-79-84

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Радиационные аварии. Под ред. Л.А. Ильина. Москва: ИздАТ. 2001. 752 с. [Radiation Accidents. Ed. L.A. Ilyin. Moscow. 2001. 752 p. (In Russ.).]
2. Барабанова А.В., Баранов А.Е., Бушманов А.Ю. и др. Острая лучевая болезнь человека. Атлас. Часть I. Пострадавшие при радиационной аварии на ЧАЭС 1986 г. Под ред. А.С. Самойлова и В.Ю. Соловьева. М.: Изд-во ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. 2016. 140 с. [Barabanova AV, Baranov AE, Bushmanov AY, et al. Acute radiation syndrome. Atlas. Part I. Victims of the Chernobyl radiation accident in 1986. Eds. Samoylov AS, Solovov VYu. Moscow. 2016. 140 p. (In Russ.).]
3. Гуськова А.К., Галстян И.А., Гусев И.А. Авария на Чернобыльской атомной станции (1986–2011): последствия для здоровья, размышления врача. Москва. 2011. 253 с. [Guskova AK, Galstyan IA, Gusev IA. The accident of the Chernobyl nuclear power station (1986–2011): Effects on health, the doctor thoughts. Moscow. 2011. 253 p. (In Russ.).]
4. Соловьев В.Ю., Барабанова А.В., Бушманов А.Ю. и др. Анализ медицинских последствий радиационных инцидентов на территории бывшего СССР (по материалам регистра ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России). Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2013;58(1):36–42. [Solovov VYu, Barabanova AV, Bushmanov AY, et al. Analysis of medical consequences of radiation incidents in the former USSR (on the materials of the register of the Burnasyan Federal Medical Biophysical Center). Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;58(1):36–42. (In Russ.).]
5. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека. М.: Медицина. 1971. 384 с. [Guskova AK, Baysogolov GD. Radiation syndrome. Moscow. 1971. 384 p. (In Russ.).]
6. Москалев Ю.И. Отдаленные последствия ионизирующих излучений. М.: Медицина. 1991. 463 с. [Moscalev YuI. Late effects of radiation. Moscow. 1991. 463 p. (In Russ.).]
7. Протоколы работы медицинского персонала на этапах оказания медицинской помощи при радиационных авариях. В сб.: «Медико-санитарное обеспечение в случае радиационных аварий». Москва. 2018. С. 106–53. [Protocols of the work of medical personnel at the stages of medical care in radiation accidents. In: "Health care in case of radiation accidents". Moscow. 2018:106–53. (In Russ.).]
8. Ильин Л.А., Кенигсберг Я.Э., Линге И.И. и др. Радиационная защита населения при реагировании на Чернобыльскую аварию. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016;61(3):6–16. [Ilyin LA, Kenigsberg JaE, Linde II, et al. Radiation protection of the population in response to the Chernobyl accident. Medical Radiology and Radiation Safety. 2016;61(3):6–16. (In Russ.).]
9. Надежина Н.М., Барабанова А.В., Баранов А.Е. и др. Острые эффекты облучения при аварии на Чернобыльской АЭС: непосредственные исходы заболевания и результаты лечения. В сб.: «Медицинские аспекты аварии на Чернобыльской атомной станции». Киев. 1988. С. 143–55. [Nadejina NM, et al. Acute radiation effects in the Chernobyl accident: immediate outcomes and treatment outcomes. In: Medical aspects of the Chernobyl accident. Kiev. 1988: 143–55. (In Russ.).]
10. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Временные методические рекомендации. Версия от 28.04.2020 [Prevention, diagnosis and treatment of new coronavirus infection (COVID-19). The provisional guidelines. Version 28.04.2020. <https://docviewer.yandex.ru/view/131721953/?page=1&4joaL9fuN8%2FqB0hfh> 6.05.2020.
11. COVID-19: Daily dashboard. Johns Hopkins University CSSE <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> 2.06.2020.
12. Wang W, Xu Y, Gao R, et al. Detection of SARS-CoV-2 in Different Types of Clinical Specimens. JAMA. 2020. DOI: 10.1001/jama.2020.3786 1.06.2020.
13. Баклаушев В.П., Кулемзин С.В., Горчаков А.А. и др. COVID-19. Этиология, патогенез, диагностика и лечение. Клиническая практика. 2020;11(1):7–20. [Baklaushov VP, Kulemzin SV, Gorchakov AA, et al. COVID-19. Etiology, pathogenesis, diagnosis and treatment. Clinical Practice. 2020;11(1):7–20. (In Russ.).]
14. Богданова Е.М., Иванова В.Ю. Правила поведения при карантине (на примере коронавируса). В сб.: Международная научно-практическая конференция «Проблемы научно-практической деятельности. Поиск и выбор инновационных решений». Уфа. 2020: 272–5. [Bogdanova EM, Ivanova VYu. Quarantine rules of conduct (for example, coronavirus). In: Internat. Sci. Pract Conf "Problems of Scientific and Practical Activities. Search and selection of innovative solutions". Ufa. 2020: 272–5. (In Russ.).]
15. Sasmita Poudel Adhikari, Sha Meng, Yu-Ju Wu, et al. Epidemiology, causes, clinical manifestation and diagnosis, prevention and control of coronavirus disease (COVID-19) during the early outbreak period: a scoping review. Infectious Diseases of Poverty. 2020. P. 9–29. DOI: 10.1186/s40249-020-00646-x 1.06.2020
16. Singhal T. A Review of Coronavirus Disease-2019 (COVID-19) The Indian Journal of Pediatrics. April 2020;87(4):281–6. DOI: 10.1007/s12098-020-03263-6 1.06.2020.
17. Jiaojiao Chu, Nan Yang, Yanqiu Wei, et al. Clinical characteristics of 54 medical staff with COVID-19: A retrospective study in a single center in Wuhan, China. J Med Virology. Wiley. DOI: 10.1002/jmv.25793. 1.06.2020.
18. Rothan HA., Byraredy SN. The epidemiology and pathogenesis of coronavirus disease (COVID-19) outbreak. J Autoimmunity. 2020. 109. journal homepage: www.elsevier.com/locate/jautimm. 1.06.2020.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. **Financing.** The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 03.06.2020. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 03.06.2020. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

А.С. Самойлов, Ю.Д. Удалов, В.И. Рубцов, В.П. Зиновьев, И.В. Оленина, А.Н. Тимошенко, В.В. Андреев,
Ю.А. Бушманов, А.В. Белоусов, А.С. Кретов, Н.А. Селезнев, Ю.Е. Смирнов

РАДИАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ КОМБИНЕЗОНОВ И ВЫБОР СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА, КОНТАКТИРУЮЩЕГО С КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИЕЙ

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

Контактное лицо: Рубцов Виктор Иванович, siz-fmbc@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Рассмотрена проблема обеспечения средствами индивидуальной защиты (СИЗ) медицинского персонала, контактирующего с коронавирусной (или подобной) инфекцией в условиях масштабной пандемии и недостаточного снабжения инфекционных стационаров одноразовой дополнительной спецодеждой. Поскольку многие полимерные материалы, из которых изготавливается подобная спецодежда, не обладают необходимой термостойкостью и соответственно не могут быть подвергнуты термической дезинфекции, была изучена возможность радиационной обработки защитных комбинезонов с использованием ускорителей электронов с целью их повторного или многократного применения. Большой опыт в решении задач обеспечения высокоэффективными физиологически приемлемыми СИЗ персонала радиационно и химически опасных производств, в том числе, при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, позволил лаборатории СИЗ персонала опасных производств ФМБЦ им. А.И. Бурназяна распространить методы оценки и способы защиты человека от высокотоксичных веществ на организацию защиты от контакта с микробиологическими факторами риска.

Результаты: Приведены результаты анализа и испытаний материалов дополнительных СИЗ тела и СИЗ органов дыхания, применяемых в настоящее время. На основании проведенных испытаний материалов на устойчивость к радиационному облучению, воздухопроницаемость, проникание жидкостей и защитные свойства по аэрозолям, выработаны рекомендации по повышению эффективности и комфортности комплекта СИЗ.

Выводы: Результаты проведенных исследований показали принципиальную возможность повторного использования комбинезонов после радиационной обработки. При этом подобные обработки оправданы исключительно в период широко-масштабных чрезвычайных ситуаций мирного или военного времени, когда отсутствуют производственные возможности для изготовления новых изделий. Обязательным условием их проведения является нахождение облучательской базы в непосредственной близости от потребителя изделий (медицинских учреждений и т.п.). Особо отмечено, что радиационная обработка должна осуществляться под строгим контролем аккредитованных испытательных центров. Необходимо продолжить дальнейшие исследования по развитию и совершенствованию СИЗ и системы их применения с целью повышения комфортности их длительного ношения без снижения защитной эффективности и разработать инструкцию по радиационной обработке конкретных изделий.

Ключевые слова: *коронавирусная инфекция, средства индивидуальной защиты, радиационная обработка, чрезвычайные ситуации, радиоактивные вещества*

Для цитирования: Самойлов А.С., Удалов Ю.Д., Рубцов В.И., Зиновьев В.П., Оленина И.В., Тимошенко А.Н., Андреев В.В., Бушманов Ю.А., Белоусов А.В., Кретов А.С., Селезнев Н.А., Смирнов Ю.Е. Радиационная обработка защитных комбинезонов и выбор средств индивидуальной защиты персонала, контактирующего с коронавирусной инфекцией. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(3):85-94

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-85-94

Введение

Лаборатория средств индивидуальной защиты (СИЗ) ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (до 2007 г. — Институт биофизики) была создана в 1953 г. для обеспечения высокоэффективными физиологически приемлемыми СИЗ персонала особо опасных производств, которыми в то время в первую очередь являлись производства высокотоксичных альфа-излучателей, применяемых в атомном оружии, прежде всего полония-210 и плутония-239 [1]. О чрезвычайно высокой токсичности полония-210 свидетельствует тот факт, что наличие в 1 м³ воздуха одной частицы размером 0,1 мкм этого радионуклида соответствует одной допустимой объемной активности для производственных помещений постоянного пребывания персонала [2]. Позднее лаборатория активно участвовала в работах по обеспечению безопасности персонала химической промышленности и космической отрасли при работах с различными высокотоксичными компонентами ракетных топлив. В настоящее время лаборатория привлечена к испытаниям СИЗ, используемых либо предлагаемых к применению для защиты меди-

цинских работников, контактирующих с коронавирусной инфекцией.

По данным, полученным недавно в ГНЦ Вирусологии и биотехнологии «Вектор» с помощью метода негативного контрастирования на просвечивающем электронном микроскопе JEM-1400, размер частиц нового вируса SARS-CoV-2 составляет 0,10–0,12 мкм [3]. Таким образом, он может сохранять свою активность, находясь в частицах размером менее 0,2 мкм. Коронавирус COVID-19 относится ко второй группе патогенности.

Как показано в работе [4], если крупные аэрозольные частицы размером более 1 мкм осаждаются на горизонтальных поверхностях под действием силы тяжести, а частицы менее 0,02 мкм удаляются из воздуха благодаря диффузии, последующей коагуляции и осаждению на любых поверхностях, то частицы промежуточных размеров от 0,02 до 0,2 мкм остаются в воздухе наиболее долго. Эти частицы и представляют наибольшую опасность, так как могут долго витать в воздухе, в твердом виде подвергаться сдвигу с поверхностей и являются наиболее проникающими через большинство фильтрующих материалов и систем.

Вирусные инфекции передаются в основном воздушно-капельным путем. Применяемый в настоящее время масочный режим предусматривает ношение респираторов или медицинских и тканевых масок, которые в соответствии с требованиями и определениями технического регламента ТР ТС 019/11 [5] фактически не являются СИЗ человека, а служат исключительно средствами профилактики загрязнения воздуха общественных мест от выдыхаемого инфицированными людьми воздуха, особенно при чихании и кашле [6].

В работе [7] показано, что при кашле и чихании больной выделяет большое количество грубодисперсного (до 100 мкм) жидкого аэрозоля, который за счет быстрого испарения влаги становится высокодисперсным. Через 0,2 с после чихания или кашля количество высокодисперсного аэрозоля (диаметр от 1 до 10 мкм) составляет 30–70 %. Далее авторы констатировали:

1. Следовательно, для обеспечения медицинского персонала надежными СИЗ при контакте с инфекционными больными необходимо, прежде всего защитить органы дыхания человека и его слизистые. При этом из-за значительного объема работы при лечении больных регистрируется большое время контакта с ними медицинского персонала.

2. Для медицинского персонала наиболее рациональным будет СИЗ в виде комбинированного пневмокостюма, который должен состоять из изолирующего пневмошлема из прорезиненной ткани, продолжающегося в пылезащитный комбинезон из воздухопроницаемой текстильной ткани. Такая конструкция комбинированного пневмокостюма обеспечит его быстрое надевание и снятие. При этом сохраняется высокая работоспособность человека в СИЗ, что будет сопровождаться надежной и эффективной защитой и незначительными дополнительными нагрузками на организм.

В этой же работе [7] показано, что респиратор ШБ-1 «Лепесток-200» имеет коэффициент проникновения по микробному аэрозолю — 0,05 %, а ватно-марлевая повязка (аналог тканевой повязки) соответственно — 58 %. Эти данные хорошо коррелируют с результатами многолетних исследований респираторов ШБ-1 «Лепесток-200» [2]. Респиратор ШБ-1 «Лепесток-200» — единственный в мире респиратор, имеющий фильтрующую, а не изолирующую полосу обтюрации, и, соответственно меньший по сравнению с аналогичными по классу защиты FFP3 респираторами подсос по полосе обтюрации. При этом его сопротивление воздушному потоку при расходе 30 дм³/мин в соответствии с ГОСТ 12.4.028-76 должно быть меньше 42 Па и меньше 50 Па в соответствии с п. 4.5 ТР ТС 019/2011 [5]. В то время как у других респираторов класса FFP3 при указанном потоке воздуха допустимое сопротивление вдоху составляет по ГОСТ 12.4.294-2015 и в соответствии с п. 4.4 ТР ТС 019/2011 [5] не более 100 Па. Дышать в подобных респираторах труднее, чем в респираторах типа «Лепесток».

СИЗ с принудительной подачей очищенного воздуха лишены указанного недостатка, но в России они выпускаются в ограниченном количестве. Производство этого вида СИЗ необходимо развивать, комбинируя их с легкими пневмошлемами.

Слизистые оболочки глаз необходимо защищать с помощью легких щитков, так как по сравнению с оч-

ками они не приводят к возникновению натертостей. Часто очки плохо стыкуются с респираторами, что вызывает запотевание очков.

Руки следует защищать двумя парами медицинских перчаток, так как через одну пару вирус может проникать, либо более толстостенными техническими перчатками.

В медицине традиционно используется большое количество изделий из полимерных материалов. Так как многие полимеры не обладают необходимой термостойкостью и соответственно не могут быть подвергнуты термической дезинфекции, обеззараживание этих изделий может осуществляться радиационным способом с использованием гамма-установок или ускорителей электронов. В большинстве стран мира стандартная стерилизующая доза составляет 25 кГр. Возникшая в начале 2020 г. пандемия, обусловленная распространением коронавируса, потребовала открытия большого количества инфекционных стационаров. Такой стационар был открыт и на базе клиники ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Для защиты кожных покровов персонала многочисленных инфекционных стационаров и других людей, контактирующих на профессиональном уровне с источниками новой инфекции, находят широкое применение одноразовые комбинезоны из нетканых полимерных материалов, ламинированных пленками, мембранными материалами, специальными покрытиями и т.д. Так как масштабное производство защитных, фильтрующих, барьерных материалов было развернуто не сразу, возникла потребность изучить возможность радиационного обеззараживания защитных комбинезонов с целью их повторного или многократного применения. Возможность проведения подобных исследований определена наличием в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России облучательской базы и аккредитованных Госкорпорацией «Росатом» и Росаккредитацией испытательных центров по оценке соответствия СИЗ персонала опасных производств установленным требованиям (аттестаты аккредитации № ОИАЭ.RU.122ИЛ(ИЦ) и № RA.RU.21НК97).

Результаты и обсуждение

Облучение испытываемых комбинезонов проводилось на импульсном линейном ускорителе электронов ИЛУ-14 (паспорт УЭЛР-10,0-100-Т-100.ПС) при эффективной энергии пучка электронов 9,6 МэВ, частоте следования импульсов 25 Гц, среднем токе пучка 5 мА и поглощенных дозах в диапазоне от 10 до 50 кГр.

Для защиты кожных покровов в настоящее время применяются комбинезоны из различных видов в основном нетканых материалов, которые должны удовлетворять требованиям стандартов, в частности ГОСТ 12.4.258-2014. В соответствии с ГОСТ 12.4.258-2014 сумма значений показателей сопротивления раздиранию в двух взаимно перпендикулярных направлениях должна быть не менее 30 Н для изделий одноразового применения и не менее 40 Н для изделий многоразового применения. Сумма значений прочности при разрыве в двух взаимно перпендикулярных направлениях должна быть не менее 160 Н для изделий одноразового применения и не менее 200 Н для

Таблица 1

Прочностные характеристики материалов защитных комбинезонов
Technical characteristics of protective cover all materials

Шифр образца	Наименование образца	Прочностные показатели необлученного материала					Коэффициент снижения прочности при дозе облучения, %			
		Среднее значение нагрузки при разрыве в продольном направлении, Н	Среднее значение нагрузки при разрыве в поперечном направлении, Н	Сумма значений нагрузок разрыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях, Н	Сумма значений показателей сопротивления раздиранию в двух взаимно перпендикулярных направлениях, Н	Среднее значение разрывной нагрузки при растяжении перпендикулярно шву, Н	25 кГр		50 кГр	
							Продольный	Поперечный	Продольный	Поперечный
9М	Материал комбинезона Kimberly-Clark	88,1	43,7	131,8	27,5	27,1 (повреждение пленки)	9,1	13,7	20,9	24,0
10М	Материал комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP	127,3	62,4	189,7	42,8	55,8 (повреждение пленки)	8,2	12,7	25,6	36,3
11М	Материал комбинезона JETA SAFETY	123,0	35,7	158,6	26,9	34,1	15,5	7,1	24,1	19,2
12М	Материал комбинезона, производство ЭПМ ФМБА России	114,4 (для одного слоя материала)	59,1 (для одного слоя материала)	173,5 (для одного слоя материала)	55,3 (для одного слоя материала)	119,3 (в 2 слоя)	Не облучали	Не облучали	2,1	-7,4
15М	Материал комбинезона BONMIC	121,6	47,2	168,8	26,5	91,5 (повреждение пленки)	1,9	-0,2	12,0	10,9
16М	Материал комбинезона	135,8	85,3	221,2	38,5	75,7	Не облучали	Не облучали	Не облучали	Не облучали
17М	Материал комбинезона	56,4	88,8	145,1	—	—	Не облучали	Не облучали	Не облучали	Не облучали

изделий многоразового применения. Это минимально необходимые прочностные характеристики материала до радиационного облучения.

Критерием радиационной стойкости материала является уменьшение прочностных характеристик не более чем на 25 % [8].

В настоящей серии испытаний объектами исследования являлись материалы уже применяемых комбинезонов, либо предлагаемых для использования комбинезонов:

1. Материал комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP для защиты от проникновения жидкостей и частиц производства Китая (шифр 10М).

2. Материал комбинезона JETA SAFETY, производство Focus China Development Company Limited, Китай (шифр 11М).

3. Материал двухслойного комбинезона, предложенный в 2020 г. для производства ЭПМ ФМБА России (шифр 12М).

4. Материал комбинезона BONMIC производства Китая (шифр 15М).

5. Материал комбинезона Kimberly-Clark Europe Limited для защиты от проникновения жидкостей и частиц, произведен в Китае (шифр 9М).

6. Материал комбинезона нетканый, без маркировки (шифр 16М).

7. Материал комбинезона нетканый, без маркировки (шифр 17М).

8. Материал комбинезона (термоскрепленный белый) (шифр 18М).

9. Материал комбинезона (шуршащий тонкий ламинированный белый) (шифр 19М).

10. Материал комбинезона (ткань с микропористым покрытием, цвет — бордо) (шифр 20М).

11. Пакет материалов фильтрующей полумаски-респиратора ШВ-1 «Лепесток-200» (без шифра) производства России по ГОСТ 12.4.028.

Конкретные марки материалов не указаны для того, чтобы данная статья не рассматривалась как прямое указание к применению и как рекламный продукт.

В табл. 1 приведены прочностные характеристики необлученных материалов и облученных в дозах 25 кГр и 50 кГр.

Из полученных данных видно, что не все материалы испытанных комбинезонов удовлетворяют требованиям нормативных документов по прочностным характеристикам и сохранению их после облучения.

Следует отметить, что в Евросоюзе в соответствии с действующими стандартами EN требования значительно более мягкие.

Для примера в табл. 2 приведены результаты первичных измерений разрывных характеристик материала комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP, а на рис. 1–4 — объединенные диаграммы «нагрузка-удлинение», построенные компьютером в ходе измерений, при разрыве элементарных образцов данного материала и материала комбинезона BONMIC. Представленные результаты демонстрируют высокую однородность этих материалов и стабильность технологии их изготовления, в то время как представленные

Таблица 2

Результаты определения разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрыве материала комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP

(шифр 10М)

Results of determination of breaking load and elongation at break of ZHENDE MEDICAL GROUP coverall material (code 10M)

Доза облучения, кГр	№ образца	Разрывная нагрузка, Н		Относительное удлинение при разрыве, %	
		продольное	поперечное	продольное	поперечное
0	1	129,5	64,70	128,1	188,1
	2	123,2	61,60	120,1	176,8
	3	132,6	65,00	135,1	198,6
	4	123,8	61,30	128,1	180,0
	5	128,8	60,90	134,0	169,0
	6	125,7	60,90	126,9	178,5
	Среднее	127,3	62,4	128,72	181,8
	СКО	3,7	1,9	5,4	10,2
25	1	113,0	53,2	118,4	149,7
	2	117,6	52,4	124,1	135,0
	3	117,1	52,2	122,0	133,1
	4	118,0	56,6	125,6	147,0
	5	119,4	55,4	126,0	139,1
	6	116,0	57,2	120,2	151,0
	Среднее	116,9	54,5	122,7	142,5
	СКО	2,2	2,2	3,0	7,8
50	1	94,3	40,84	70,9	66,1
	2	94,7	41,26	82,8	69,0
	3	97,6	39,37	82,2	67,5
	4	101,1	40,00	84,4	61,9
	5	90,0	37,06	67,6	58,2
	6	90,5	39,79	69,0	62,7
	Среднее	94,7	39,7	76,15	64,2
	СКО	4,2	1,5	7,8	4,0

на рис. 5 кривые свидетельствуют о низкой прочности материала и нестабильности его характеристик и технологии его изготовления.

На рис. 6 показаны фотографии, демонстрирующие характер разрушения образцов материала в ходе испытаний.

На рис. 7 показан образец шва материала после приложения разрывной нагрузки. Видно, что прочность шва превосходит прочность основного материала.

Результаты представленных выше исследований показывают, что отдельные материалы и изделия из них могут быть обработаны радиационным способом с целью дезинфекции один, два и более раз, т.к. сохраняются прочностные характеристики в пределах норм снижения, в то время как другие материалы либо имеют изначально низкую прочность, либо значительно теряют прочность после облучения.

Вместе с тем, эти данные показывают, что радиационные обработки должны осуществляться под строгим контролем аккредитованных испытательных центров. При этом данные манипуляции оправданы исключительно в период чрезвычайных ситуаций мирного или военного времени, когда отсутствуют производственные возможности для изготовления новых изделий, при этом необходимым условием является нахождение облучательской базы в непосредственной близости от потребителя изделий (медицинских учреждений и т.п.)

В данной серии исследований нам не были предоставлены комбинезоны из материала «Тайвек» фирмы Дюпон. Но из СМИ следует, что комбинезоны фирмы «Дюпон» различных видов, марок и артикулов, которые сильно отличаются по своим техническим характеристикам, применяются достаточно часто.

Первые исследования отдельных марок этих костюмов были проведены ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (ранее Институт биофизики) еще в начале 1980-х гг. Отмечая высокую химическую стойкость

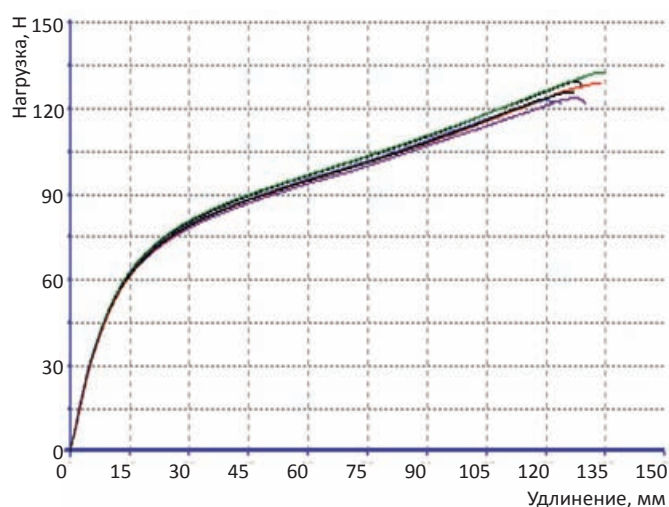


Рис. 1. Объединенная диаграмма нагрузка-удлинение при разрыве образца материала комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP (шифр 10М-00) (продольное направление)
Fig. 1. Combined diagram load-elongation at break of ZHENDE MEDICAL GROUP cover all material sample (code 10M-00) (longitudinal direction)

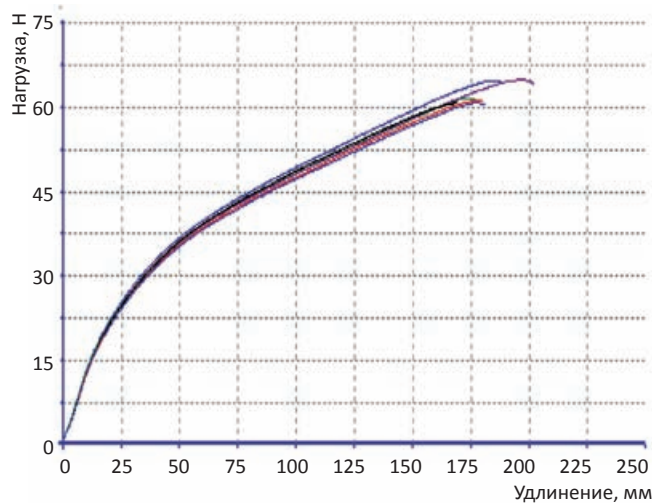


Рис. 2. Объединенная диаграмма нагрузка-удлинение при разрыве образца материала комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP (шифр 10М-00) (поперечное направление)
Fig. 2. Combined diagram load-elongation at break of ZHENDE MEDICAL GROUP cover all material sample (code 10M-00) (transverse direction)

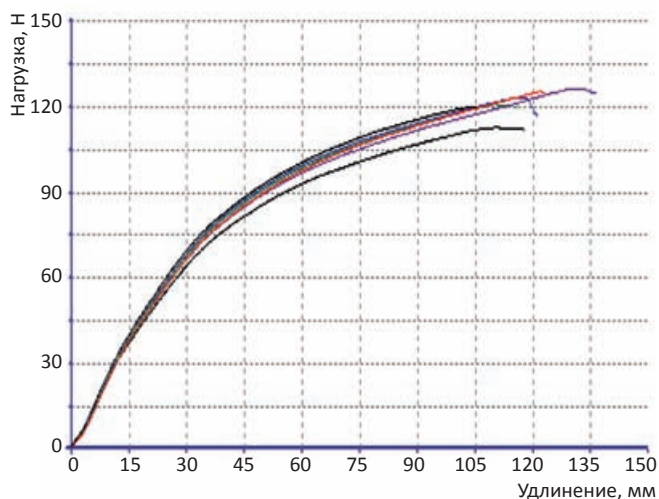


Рис. 3. Объединенная диаграмма нагрузка-удлинение при разрыве образцов материала комбинезона BONMIC (шифр 15M-00) (продольное направление)
Fig. 3. Combined diagram load-elongation at break of BONMIC coverall material samples (code 15M-00) (longitudinal direction)

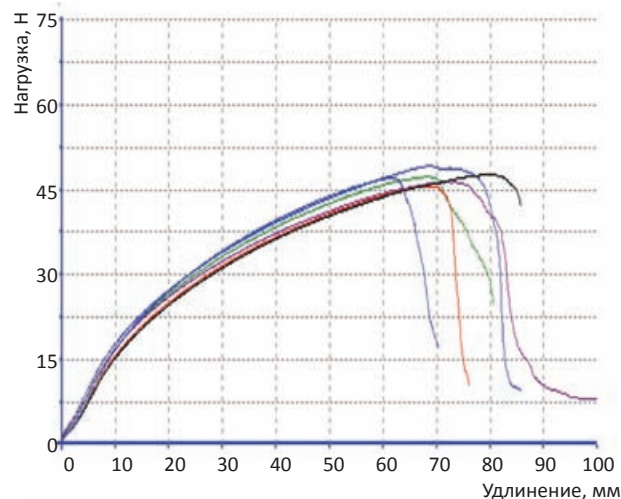


Рис. 4. Объединенная диаграмма нагрузка-удлинение при разрыве образцов материала комбинезона BONMIC (шифр 15M-00) (поперечное направление)
Fig. 4. Combined diagram load-elongation at break of BONMIC coverall material samples (code 15M-00) (transverse direction)

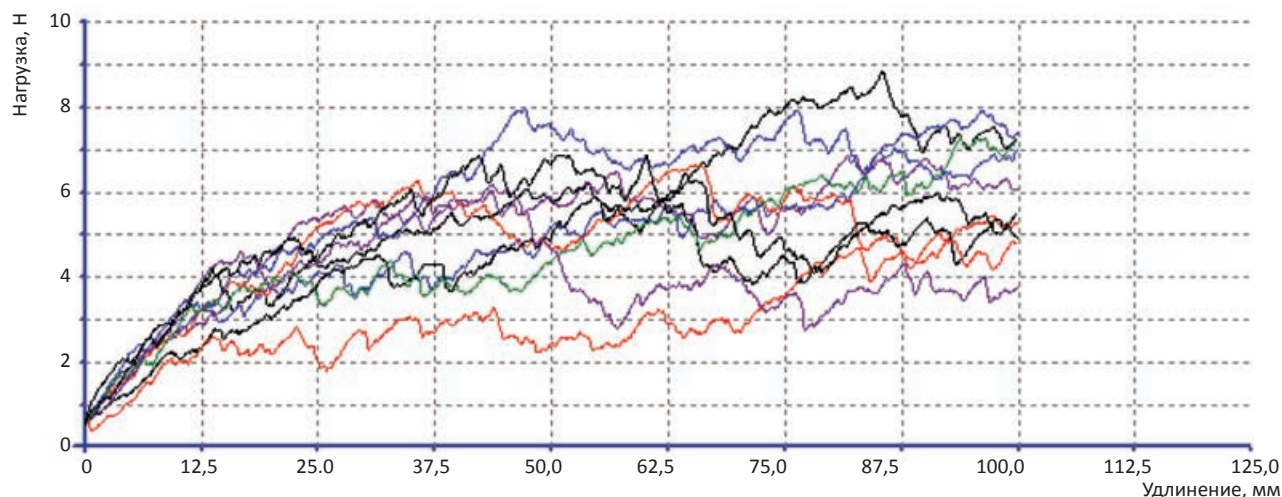


Рис. 5. Объединенная диаграмма нагрузка-удлинение при раздирании элементарных образцов материала комбинезона Kimberly-Clark Europe Limited (шифр 9M-50) (поперечное направление)
Fig. 5. Combined diagram load-elongation when tearing elementary samples of the Kimberly-Clark Europe Limited cover all material (code 9M-50) (transverse direction)

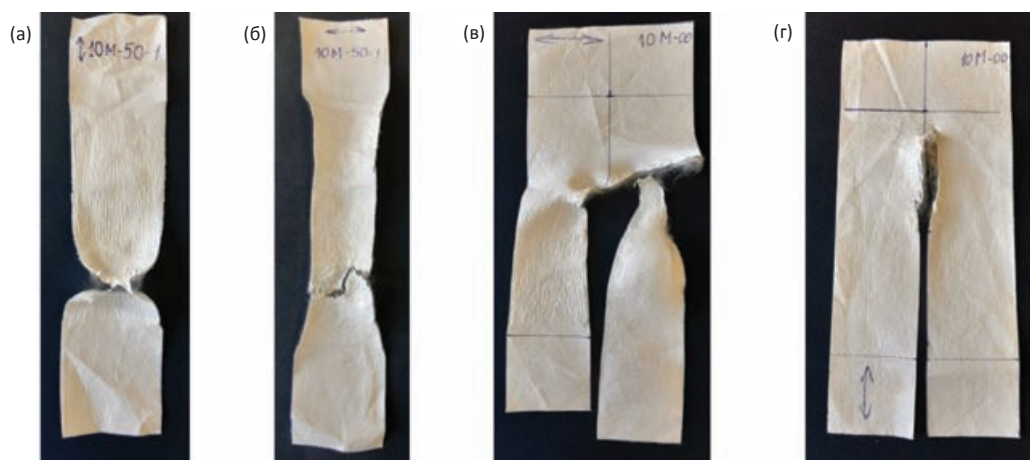


Рис. 6. Образец материала комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP (шифр 10M): а — после разрыва в продольном направлении; б — после разрыва в поперечном направлении; в — после раздирания в продольном направлении; г — после раздирания в поперечном направлении
Fig. 6. A sample of the material of the jumpsuit ZHENDE MEDICAL GROUP (Cypher 10M): а — after a break in the longitudinal direction; б — after a break in the transverse direction; в — after tearing in the longitudinal direction; г — after tearing in the transverse direction



Рис. 7. Образец материала комбинезона производства ЭПМ (шифр 12М-00) после определения разрывной нагрузки шва в продольном направлении

Fig. 7. Sample of the material of the EPM coverall (code 12M-00) after determining the breaking load of the seam in the longitudinal direction

этих костюмов и их относительно высокую эффективность по отношению к грубодисперсным аэрозолям, было рекомендовано их применение для защиты от грубодисперсных твердых аэрозолей при отсутствии воздействия каких-либо жидких сред, т.к. широко рекламируемый «воздухопроницаемый» и «паропроницаемый» материал не может защитить от облива водными растворами, содержащими поверхностно-активные вещества, смесями, содержащими одновременно водную среду и органические растворители, например, при реализации экстракционной технологии разделения изотопов, а также от фтористого водорода, образующегося при гидролизе паров гексафторида урана влагой, находящейся в воздухе производственных помещений.

На рис. 8 слева представлен слайд из презентации фирмы «Дюпон» 2019 г. (комбинезон, на который дано заключение Института биофизики), а справа — паспорт на поставляемые в 2020 г. комбинезоны. На испытанном Институтком комбинезоне есть маркировка, свидетельствующая о проверке по твердым и жидким аэрозолям и от облива жидкими реагентами, а на поставляемых комбинезонах эти сведения отсутствуют. Кстати, действующий в настоящее время сертификат на комбинезоны «Тайвек» выдан ОС по сертификации, в области аккредитации которого нет дополнительной одежды, а испытания проводились на соответствие ГОСТ 12.4.288-2013 на защиту от воды и ГОСТ 12.4.251-2013 на защиту от растворов кислот, в соответствии с которым испытания проводятся по каплям нелетучей серной кислоты. Пары летучих кислот через воздухопроницаемые материалы проникают моментально.

В результате проведенного авторами [9] из Окриджской национальной лаборатории критического анализа имевшихся случаев загрязнения кожных покровов при работах в комбинезонах из материала «Тайвек» фирмы «Дюпон» и комбинезона Kleenguard фирмы «Кимберли-Кларк» из одного слоя материала, сделан вывод: «остатки пота, вероятно, стали причиной проникновения загрязнения через материалы, которые были непроницаемы для чистой воды». В выводах они отметили необходимость использования материалов со сплошным полимерным покрытием.

Ранее подобные материалы со сплошным полимерным покрытием использовались отечественными производителями для изготовления дополнительных СИЗ, применяемых на предприятиях атомной отрасли, обеспечивающих защиту основной спецодежды и кожных покровов персонала при ожидаемых уровнях загрязнения до 100 допустимых [10, 11].

Учитывая изложенное, материалы комбинезонов, представленных на испытания, были испытаны на проникание капель объемом 0,1 мл следующих жидких сред: дистиллированная вода, NaCl (0,9 %), C_2H_5OH (50 %) и сульфенол (1 %). Результаты представлены в табл. 3. Также приводятся результаты испытаний ламинированных полиэтиленом нетканых материалов, указанных выше [10, 11], и испытаний материала «Тайвек», выполненных нашим Центром до 2007 г.

Поскольку при наличии надежной герметизации сочленений между различными компонентами комплекта СИЗ, в т.ч. комбинезоном, перчатками, бахлами и т.д., необходимо обеспечить надежную защиту кожных покровов всего тела от проникания аэрозолей и при этом сохранить тепловой баланс организма, нами были проведены исследования коэффициента защиты материалов комбинезонов и коэффициента проникания аэрозолей со средними размерами частиц 0,3 и 0,7 мкм, а также воздухопроницаемости этих материалов. Результаты представлены в табл. 4.

Из результатов, представленных в табл. 4, следует, что воздухопроницаемость материалов дополнительной спецодежды, обладающих приемлемыми защитными свойствами по аэрозолям, в десятки и сотни раз меньше воздухопроницаемости материалов основной спецодежды. Поэтому дополнительная спецодежда не способна обеспечить нормальный воздухообмен подкостюмного пространства с окружающим воздухом. Она пригодна и комфортна только для посетителей, которые практически не выполняют действий, сопровождаемых потоотделением, и находятся в зараженной зоне непродолжительное время. Ранее нами было экспериментально показано, что при работе средней тяжести воздух под молескиновым костюмом обновляется 10–20 раз в минуту.

В табл. 5 представлены обобщенные результаты исследований защитных комбинезонов из нетканых материалов, материалов основной спецодежды (молескин производства «Родники-Текстиль» и «Атекс-Комби») и пакета материалов респиратора «Лепесток-200».

При этом воздухопроницаемость молескина, широко применяемого при изготовлении основной спецодежды персонала атомной промышленности и энергетики, составляет $15,3 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$, а «Атекс-Комби» — $13,0 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$.



Рис. 8. Сравнение слайда из презентации фирмы «Дюпон» 2019 г. и паспорта комбинезона 2020 г. а — Презентация Дюпон-2019. Защитный комбинезон, рекомендованный Институтом биофизики до 2007 г. Одобрен Институтом биофизики для применения в атомной отрасли для защиты от твердых аэрозолей при отсутствии воздействия жидких сред, т.к. если аэрозоли содержат поверхностно-активные вещества или органические растворители, то материал будет проницаем для жидкостей; б — Паспорт комбинезона, представленного потребителем в 2020 г. Отсутствуют сведения о защите от аэрозолей, от твердых частиц, от облива жидкими средами, от выплеска реагентов, которые есть на левой стороне рисунка

Fig. 8. Comparison of a slide from DuPont's 2019 presentation and the passport of the overalls in 2020. а — Presentation of DuPont 2019. Protective coveralls recommended by the SSC Institute of Biophysics until 2007. Approved by the Institute of Biophysics for use in the nuclear industry for protection against solid aerosols in the absence of exposure to liquid media, since if the aerosols contain surfactants or organic solvents, the material will be permeable to liquids; б — Passport of overalls submitted by the consumer in 2020. There is no information about protection from aerosols, from solid particles, from dousing with liquid media, from splashing of reagents, which is shown on the left side of the drawing

Таблица 3

Время проникания жидких сред
The time of penetration of liquid media

№	Шифр	Наименование материала	Реактив, время проникания, мин			
			H ₂ O (100 %)	NaCl (0,9 %)	C ₂ H ₅ OH (50 %)	Сульфонил (1 %)
1	15M	BONMIC	> 40	> 40	16	2
2	9M	Kleenguard	> 40	> 40	0	0
3	б/ш	Tyvek Classic Plus (исследования до 2007 г.)	> 40	> 40	0	0
4	11M	JETA SAFETY	> 40	> 40	0	0
5	10M	ZD	> 40 (через 20 растеклась)	> 40 (через 20 растеклась)	14	14
6	12M	ЭПМ	> 40	> 40	0	0
7	16M	Нетканый материал	> 40	> 40	0	0
8	б/ш	Нетканый материал, ламинированный полиэтиленовой пленкой	> 60	> 60	> 60	> 60

Таблица 4

Проницаемость аэрозоля и воздухопроницаемость материалов
The permeability of aerosol and air permeability of materials

№ п/п	Наименование образца	Шифр образца	Поверх. плотн., г/м ²	Коэффициенты защиты и проникания аэрозоля через материал			Значение воздухопроницаемости дм ³ /с·м ² при DCT = 189 мм и разрежении 49 Па
				Размер частиц, мкм	Коэффиц. защиты	Коэффиц. проникания, %	
1	Материал комбинезона Kimberly-Clark	9M	53	0,3 0,7	5 27	20,0 3,7	0,60
2	Материал комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP	10M	65	0,3 0,7	10 131	10 0,76	0,21
3	Материалы комбинезона JETA SAFETY	11M	62	0,3 0,7	9 176	11 0,57	0,29
4	Пакет материалов для респиратора ШБ-1 «Лепесток-200»	б/ш	93	0,3 0,7	454 2777	0,22 0,036	17,8
5	Нетканый материал ЭПМ (один слой)	12M	57	—			31,3
6	Нетканый материал ЭПМ (два слоя)	12M	114	0,3 0,7	2,88 1,61	34,7 62,1	28,7
7	Нетканый материал комбинезона BONMIC	15M	64	0,3 0,7	6,9 231	14,5 0,5	0,3
8	Нетканый материал	16M	50	0,3 0,7	1 1	100 100	19
9	Нетканый материал	17M	42	0,3 0,7	1 2,37	100 42	20
10	Материал комбинезона (термоскрепленный белый)	18M	—	0,3 0,7	1,4 1,6	73,7 62,5	18
11	Материал комбинезона (шуршащий тонкий ламинированный белый)	19M	—	0,3 0,7	23 506	4,4 0,19	0,24
12	Материал комбинезона (ткань с микропористым покрытием, цвет бордо)	20M	—	0,3 0,7	20 625	5,1 0,16	0,24

Таблица 5

Обобщенные результаты исследований материалов
Generalized results of materials research

Объект испытаний	Коэффициент защиты по аэрозолям		Время защиты от проникания капель, мин		Прочность	Потеря прочности	Воздухопроницаемость, дм ³ /с·м ²
	0,3 мкм	0,7 мкм	Этиловый спирт (50 %)	ПАВ (1 %)			
Материал ЭПМ ламинированный	> 1000	> 1000	> 120	> 120	Соответствует	Соответствует	0
Материал комбинезона ZHENDE MEDICAL GROUP	10	130	14	14	Соответствует	Частичная	0,21
Нетканый материал комбинезона BONMIC	7	230	16	2	Соответствует	Частичная	0,3
Материал комбинезона (ткань с микропористым покрытием, цвет бордо)	20	625	—	—	—	—	0,24
Материалы комбинезона JETA SAFETY	9	176	0	0	Не соответствует	Не соответствует	0,29
Материал комбинезона Kimberly-Clark	5	27	0	0	Не соответствует	Не соответствует	0,60
Пакет материалов респиратора ШБ-1 «Лепесток-200»	> 200	> 1000	—	—	—	—	17,8
Ткань молекин, ХБ 100 %	1,3	3,2	—	—	Соответствует	Соответствует	15,3
Ткань «Атекс-Комби», ПЭ 18 %, ХБ 82 %	1,5	3,8	—	—	Соответствует	Соответствует	13,0

с·м², воздухопроницаемость пакета материалов респиратора ШБ-1 «Лепесток-200» — 17,8 дм³/с·м² [12]. Таким образом, к сожалению, материалы для спецодежды, имеющие высокую воздухопроницаемость, обеспечивающую комфорт при выполнении работы, имеют относительно низкую защитную эффективность, а специальные защитные, в том числе, неламинированные материалы, применяемые для изготовления комбинезонов, нарушают тепловой баланс организма и резко

снижают работоспособность персонала при работе в условиях повышенных психоэмоциональных нагрузок, характерных для инфекционных стационаров.

Вместе с тем, если использовать действительно дышащие (воздухопроницаемость более 13 дм³/с·м² при разрежении 50 Па) материалы, обладающие высокой влагоемкостью и влагоотдачей, например, хлопчатобумажные ткани с соответствующей маслородоступной и антимикробной обработкой, то при раз-

умном использовании режимов труда и отдыха можно добиться надежной защиты кожных покровов. При этом для защиты органов дыхания необходимо применять СИЗ с принудительной подачей очищенного воздуха в подшлемное пространство. Отсутствие сопротивления входу обеспечит комфортные условия труда персонала. Одновременно подобные СИЗ обеспечат защиту головы, лица, глаз и органов дыхания.

Заключение

Настоящие исследования показали принципиальную возможность использования радиационной обработки защитных комбинезонов из полимерных материалов для целей их повторного использования. При этом подобные обработки оправданы исключительно в период широкомасштабных чрезвычайных ситуаций мирного или военного времени, когда отсутствуют производственные возможности для изготовления новых изделий. Обязательным условием их проведения является нахождение облучательской базы в непосредственной близости от потребителя изделий (медицинских учреждений и т.п.). Следует отметить, что радиационная обработка должна осуществляться под строгим контролем аккредитованных испытательных центров.

Вместе с тем, материалы испытанных защитных комбинезонов из-за низкой воздухо- и паропроницаемости не обеспечивают комфортных условий труда медицинского персонала. Выходом из этой ситуации является либо использование хлопчатобумажной спецодежды из материалов с антимикробной и маслостойкой обработкой, либо использование вентилируемой комбинированной спецодежды с воздухопроницаемой ламинированной лицевой стороной комбинезона, обращенной к пациенту, и фильтрующей спинкой из воздухопроницаемых материалов в комплекте с легкими, но высокоэффективными СИЗ головы, лица, глаз и органов дыхания с принудительной подачей очищенного воздуха.

При этом необходимо ввести четкое зонирование помещений и отдельных его участков, регламентировать режимы труда и отдыха для каждой категории персонала, определить нормы выдачи и комплекты СИЗ, выдаваемых при выполнении различных видов работ с учетом их продолжительности, тяжести и наличия специальных требований.

Необходимо продолжить дальнейшие исследования по развитию и совершенствованию СИЗ и системы их применения с целью повышения комфортности их длительного ношения без снижения защитной эффективности и разработать инструкцию по радиационной обработке конкретных изделий.

Radiation Treatment of Protective Overalls and Selection of Personal Protection Equipment for the Personnel Exposed to Coronavirus Infection

A.S. Samoylov, Yu.D. Udalov, V.I. Rubtsov, V.P. Zinoviev, I.V. Olenina, A.N. Timoshenko, V.V. Andreev, Yu.A. Bushmanov, A.V. Belousov, A.S. Kretov, N.A. Seleznev, Yu.E. Smirnov

A.I. Burnasyan Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose: The article covers issues related to providing personal protection equipment (PPE) for medical staff exposed to coronavirus (or similar infection) in the face of global pandemic and insufficient supply of infectious hospitals with disposable overalls. As many polymeric materials used to make such overalls do not feature required thermal stability and consequently they cannot be treated with heat disinfection, radiation treatment of protective overalls with electron accelerators for the purpose of their reuse was considered. Due to rich experience in addressing the issues of providing high-efficient, physiologically acceptable PPE for the personnel of radiation and chemical hazardous facilities, in particular during Chernobyl nuclear disaster elimination, the Laboratory of PPE for the Personnel of Hazardous Production Facilities, Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, could extend methods of assessment and techniques of human protection against high-toxic substances to establishment of protection against microbiological threats.

Results: The article provides results of analysis and tests of materials for overalls and respiratory PPE currently in use. Based on the material tests for radiation stability, air permeability, liquid penetration and protective properties with respect to aerosols, recommendations for improvement of efficiency and comfort of the PPE suite have been developed.

Conclusion: The study showed feasibility of reusing overalls after radiation treatment. However, such treatment is appropriate only in periods of major emergencies during peacetime and wartime, when there are no production capabilities for manufacturing of new products. Location of the irradiation facility in the vicinity of consumers (e.g. medical institutions) is a prerequisite for this treatment. It should be emphasized that radiation treatment must be performed under strict supervision of accredited test facilities.

Further research is required for development and enhancement of PPE and system of its application. This will allow to make longtime wear of PPE more comfortable without sacrificing its protective efficiency and develop a manual on product-specific radiation treatment.

Key words: coronavirus infection, personal protection equipment, radiation treatment, emergencies, radioactive substances

For citation: Samoylov AS, Udalov YuD, Rubtsov VI, Zinoviev VP, Olenina IV, Timoshenko AN, Andreev VV, Bushmanov YuA, Belousov AV, Kretov AS, Seleznev NA, Smirnov YuE. Radiation Treatment of Protective Overalls and Selection of Personal Protection Equipment for the Personnel Exposed to Coronavirus Infection. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(3):85-94. (In Russ.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Рубцов В.И., Клочков В.Н. К шестидесятилетию лаборатории средств индивидуальной защиты персонала опасных производств. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2013;58(5):75-81. [Rubtsov VI, Klochkov VN. To the sixtieth anniversary of the laboratory of personal protective equipment for personnel of hazardous industries. Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;58 (5):75-81. (In Russ.)].
2. Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. и др. «Лепесток». Легкие респираторы. М.: Наука. 2015. 320 с. [Petryanov VI, Koshcheev SV, Basmanov PI, et al. «Petal». Light respirators. Moscow. 2015. 320 p. (In Russ.)].
3. Российские ученые сделали снимок коронавируса: [Электронный ресурс]. РБК. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfree/news/5e735ff09a7947be392f2bec> (Дата обращения: 20.05.2020). [Russian scientists took a picture of the coronavirus: [Electronic resource]. RBC. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfree/news/5e735ff09a7947be392f2bec> (accessed: 20.05.2020). (In Russ.)].
4. Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. и др. «Лепесток» (Легкие респираторы). М.: Наука. 1984. 216 с. [Petryanov VI, Koshcheev SV, Basmanov PI, et al. «Petal» (Light respirators). Moscow. 1984. 216 p. (In Russ.)].
5. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты» ТР ТС 019/2011. Утвержден решением комиссии Таможенного союза от 09.12.2011. № 878. [Technical regulations of the Customs Union «On the safety of personal protective equipment» TRCU 019/2011. Approved by the decision of the Customs Union Commission of 09.12.2011. № 878. (In Russ.)].
6. Рубцов В.И. Маска для простуды. Химия и жизнь. 2009;(12):47-8. [Rubtsov VI. Mask for colds. Chemistry and Life. 2009;(12):47-8. (In Russ.)].
7. Буянов В.В., Колесников Н.В. Современные средства индивидуальной защиты, применяемые для обеспечения биологической безопасности. М. 2012. 224 с. [Buyanov VV, Kolesnikov NV. Modern personal protective equipment used to ensure biological safety. Moscow, 2012. 224 p. (In Russ.)].
8. Иванов В.С. Радиационная химия полимеров: Учеб. пособие для вузов. Л. Химия. 1988. 320 с. [Ivanov VS. Radiation polymers chemistry. Recourses for higher education institutions. L. 1988. 320 p. (In Russ.)].
9. Schwahn S.O., Foster N.D. Compromise of Personal Protective Clothing from Liquid Exposure. Health Physics. 2020: DOI: 10.1097/HP.0000000000001275.
10. Кочетков О.А., Рубцов В.И., Клочков В.Н. Экспресс-отчет по государственному контракту № 2.00.30.01.2210 от 10.04.2001. «Совершенствование нормативной базы, разработка и внедрение современной спецодежды и СИЗ персонала предприятий и аварийно-спасательных формирований Минатома России». М.: ГНЦ ИБФ. 2001. 41 с. [Kochetkov OA, Rubtsov VI, Klochkov VN. Express report on the state contract № 2.00.30.01.2210 of 10.04.2001. «Improvement of the regulatory framework, development and implementation of modern workwear and PPE for the personnel of enterprises and emergency rescue». (In Russ.)].
11. Кочетков О.А., Рубцов В.И., Клочков В.Н. и др. Средства индивидуальной защиты персонала предприятий атомной промышленности и энергетики. Каталог-справочник. М. 2003. 120 с. [Kochetkov OA, Rubtsov VI, Klochkov VN, et al. Personal protective equipment for personnel of nuclear industry and power engineering enterprises. 2003. 120 p. (In Russ.)].
12. Рубцов В.И., Шустов Ю.С., Зиновьев В.П. Особенности метода определения воздухопроницаемости различных тканей. Дизайн и технологии, 2020;75(1):63-9. [Rubtsov VI, Shustov YuS, Zinoviev VP. Features of the method of determining the breathability of various fabrics. Design and Technology. 2020;75(1):63-9. (In Russ.)].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 11.06.2020. **Принята к публикации:** 24.06.2020.

Article received: 11.06.2020. **Accepted for publication:** 24.06.2020.

ПАМЯТИ В.Ф. ДЕМИНА

21 июня 2020 г. ушел из жизни Владимир Федорович Демин — ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, доцент, доктор технических наук.

В.Ф. Демин всю свою производственную жизнь трудился в Курчатовском институте: после окончания физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова учился в аспирантуре (1963–1966 гг.), а впоследствии (с 1966 г.) работал в ИАЭ им. И.В. Курчатова.

Он начал свой научный путь в качестве физика-теоретика в области атомного ядра, экзамен теоретического минимума сдавал лично знаменитому Л.Д. Ландау. Однако, в силу своих широких интересов и природного таланта, скоро стал заниматься междисциплинарными исследованиями в области экологии и радиационных рисков. Первый заместитель директора ИАЭ, Герой России В.А. Легасов активно сотрудничал с В.Ф. Деминым при расчете радиационных рисков как при подготовке доклада в МАГАТЭ о Чернобыльской аварии и ее последствиях, так и впоследствии – при построении концепции безопасности ядерных реакторов для различных отраслей промышленности.

С конца 1990-х гг. В.Ф. Демин начал дополнительно заниматься разработкой методологии оценки рисков в области здравоохранения, связанных не только с радиационным воздействием, но вообще – с воздействием любых вредных факторов для здоровья природного или техногенного происхождения. В своих публикациях он изложил строгую математическую теорию оценки риска от совокупности вредных факторов, которая с успехом используется в практической деятельности. С середины 2000-х гг. Владимир Федорович одним из первых начал заниматься проблемой оценки рисков от использования нанотехнологий.

В.Ф. Демин занимался не только теоретическими исследованиями, он работал в тесном сотрудничестве с экспериментаторами из самых разных областей – экологии, медицины, пищевой промышленности, нанотехнологий. В частности, обосновывал и разрабатывал практическое использование ядерно-физических методов нейтронно- и протонно-активационного анализа для высокоселективного и прецизионного определения сверхмалых количеств различных металлов и неорганических оксидов в различных средах, включая органы и ткани млекопитающих и человека. Эти и более ранние результаты работы В.Ф. Демина были положительно приняты мировым научным сообществом, заложили основы теории радиационных, экологических и медицинских рисков, а также практического использования ядерно-физических методов в самых разных областях человеческой деятельности.

С начала 2000-х гг. В.Ф. Демин активно участвовал в международной деятельности. Он внес большой вклад в исполнение международного проекта ИНПРО в МАГАТЭ по реализации ядерной энергетической инициативы Президента России В.В. Путина на Саммите тысячелетия ООН: им была обоснована практическая возможность реального полноценного страхования ядерных рисков, связанных с осуществлением международных проектов транспортабельных малых модульных атомных станций.

Владимир Федорович сохранял высокую производственную и научную активность до последнего дня:



14.06.1937 – 21.06.2020

в 2016 году защитил диссертацию на степень доктора технических наук, активно сотрудничал с учеными из ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ФИЦ питания и биотехнологии и других институтов, был членом диссертационного совета по защите докторских диссертаций, членом редакционной коллегии журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность». В 2019 г. инициировал и осуществлял научное руководство проектом по разработке методологии нелинейной оценки рисков в области здравоохранения. В частности, в последние годы В.Ф. Демин предложил и разрабатывал эффект нелинейной конкуренции рисков смерти от разных причин, ввел и обосновал расчет естественного возрастного распределения населения на произвольной территории, что в медицинской статистике коренным образом способно повлиять на адекватное восприятие реальной оценки радиационного риска и на политику в сфере здравоохранения.

Научные заслуги В.Ф. Демина отмечены Государственной премией Алтайского края в 1999 г., почетным знаком «Ветеран атомной энергетики и промышленности», несколькими премиями на Курчатовских конкурсах, многочисленными почетными грамотами и благодарностями. Также В.Ф. Демин в течение почти 20 лет преподавал вычислительную математику и программирование в МАИ.

Бесконечно добрый в общении с коллегами, он всегда притягивал к себе умных и талантливых людей, был своеобразным генератором идей и реализовывал их на практике, умел заряжать окружающих своей неиссякаемой энергией. Будучи в течение многих лет членом редакционной коллегии журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность», он был непримиримым борцом за качество статей, представляемых к публикации, всегда отстаивал глубоко научный подход к решаемым проблемам, в которых сам хорошо разбирался. Память о яркой жизни Владимира Федоровича Демина сохранится в сердцах и делах его учеников и коллег, с которыми он провел плодотворные годы своего научного творчества.

Редакционная коллегия журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность»

ПАМЯТИ В.Н. МАЛЬЦЕВА

12 июня 2020 г. на 83-м году жизни после непродолжительной тяжелой болезни от нас ушел коллега и товарищ Мальцев Вячеслав Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории № 4 – радиационной иммунологии и экспериментальной терапии радиационных поражений ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Вся трудовая, научная деятельность и общественная жизнь В.Н. Мальцева неразрывно связана с нашим Центром. В системе ФМБА России (бывшим Третьим Главным Управлением при Минздраве СССР) В.Н. Мальцев начал работу с февраля 1962 года после окончания Первого Московского медицинского института им. И.М. Сеченова, сначала в должности старшего лаборанта, затем младшего, старшего научного сотрудника и закончил будучи ведущим научным сотрудником.

В.Н. Мальцев занимался изучением зависимости доза–эффект в радиационной иммунологии и микробиологии и влиянием лечения на состояние иммунитета у облученных организмов. Принимал участие в исследованиях, проводившихся на Семипалатинском полигоне, обследовал больных, пострадавших при аварии на ЧАЭС. В период командировки в Ливию читал лекции и вел практические занятия с бакалаврами, готовящимися к получению звания магистра. В этих исследованиях была изучена микрофлора воды охлаждающего бассейна атомного реактора Ливийского центра ядерных исследований.

В.Н. Мальцевым опубликовано около 200 научных работ, из них 13 научных обзоров, 7 монографий и учебников по микробиологии, 5 патентов и авторских свидетельств. В.Н. Мальцев в 1983 году опубликовал блестящую монографию по фундаментальным основам радиационной иммунологии «Количественные закономерности радиационной иммунологии». В.Н. Мальцев был соавтором ряда коллективных монографий, посвященных вопросам действия радиоактивных изотопов на иммунитет, развитию дисбактериозов в облученном организме. Один из последних выпущенных им учебников для студентов высших учебных заведений «Медицинская микробиология и иммунология», М.: Практическая медицина, 2014 г.



26.07.1937 – 12.06.2020

Несомненно, он обладал талантом педагога и исследователя. Подготовил пять кандидатов медицинских наук, ему присвоено звание профессора, являлся ответственным исполнителем по темам, выполнявшимся в лаборатории.

Признанием научной деятельности В.Н. Мальцева является включение его в Ученый совет по защите докторских и кандидатских диссертаций ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, награждение серебряной и бронзовой медалями ВДНХ за экспонаты, представленные в павильоне «Наука».

Вячеслав Николаевич Мальцев – ветеран труда, его деятельность отмечена медалями «Ветеран труда», «В честь 850-летия Москвы», знаками «Отличник здравоохранения» МЗ СССР, «Ветеран атомной промышленности», «Участник ликвидации аварии на ЧАЭС» Государственной корпорации «Росатом», нагрудным знаком А.И. Бурназяна ФМБА России, почетными грамотами и благодарностями Института биофизики и ФМБА России.

Мы потеряли выдающегося ученого в области радиационной микробиологии и иммунологии, прекрасного педагога и товарища.

*Коллеги и товарищи
Редакционная коллегия журнала «Медицинская
радиология и радиационная безопасность»*