

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

**МЕДИЦИНСКАЯ
РАДИОЛОГИЯ
И
РАДИАЦИОННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

1956 — 2021

**MEDICAL RADIOLOGY
AND
RADIATION SAFETY**

2021

4

MEDITSINSKAIA RADIOLOGIIA I RADIATSIONNAIA BEZOPASNOST

Уважаемые читатели журнала, коллеги!

В 2021 году отмечает свое 75-летие Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Центр, ведущий свою историю с 1946 года, является головным учреждением страны в области ядерной медицины, радиофармацевтики, биомедицинских и аддитивных технологий, радиобиологии, радиационного контроля и дозиметрии. Началом систематизированных исследований в области радиационной медицины, радиобиологии, радиотоксикологии и радиационной безопасности следует считать 29 июня 1946 г. – в этот день специальным Постановлением Совета Министров СССР в системе Академии медицинских наук СССР в качестве самостоятельного научно-исследовательского учреждения была создана радиационная лаборатория, в дальнейшем переименованная в Институт биофизики Минздрава СССР, в настоящее время – Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства.



История ФМБЦ им. А.И. Бурназяна неразрывно связана с историей развития российской атомной отрасли – Институт биофизики был создан для медицинского и дозиметрического обеспечения работ первого атомного проекта. Чтобы получить максимальную информацию о состоянии здоровья работников атомного проекта и в целях разработки средств профилактики и лечения профессионально обусловленных заболеваний, ученые Института биофизики принимали непосредственное участие в испытаниях и самоотверженно работали на атомных производствах.

Опыт проведения радиационно-гигиенических работ в период создания и функционирования предприятий атомной индустрии показал необходимость организации трёхзональной системы при планировании, строительстве и эксплуатации соответствующих объектов. Речь идёт о последовательности перемещения работников из так называемых «грязных» зон – зон радиоактивного загрязнения в чистые помещения, находящиеся под постоянным дозиметрическим контролем. Внедрение этого принципа защиты от радиации сыграло огромную роль в обеспечении радиационной безопасности работников атомной отрасли.

За славную 75-летнюю историю ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России не раз доказывал значимость своей работы для обеспечения радиационной безопасности страны. Личное мужество и профессиональное мастерство, проявленные врачами, учёными, инженерами во время аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 году, навсегда вписаны в историю нашей страны.

Центр обеспечивал и обеспечивает радиационную безопасность страны.

Юбилей ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России приходится на Год науки и технологий, когда особое внимание уделяется реализации стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

В настоящее время сотрудники Центра вносят большой вклад в защиту и сохранение здоровья тружеников отраслей военно-промышленного комплекса и силовых ведомств страны, способствуют продвижению отечественных инноваций и перспективных разработок.

За время работы сотрудники ГНЦ ФМБЦ имени А.И. Бурназяна ФМБА России зарекомендовали себя как ведущие специалисты российского здравоохранения в области биофизики, радиационной и ядерной медицины, радиобиологии, хирургии и трансплантологии, нейрохирургии, аварийного реагирования, а также современной диагностики заболеваний и инновационных биомедицинских технологий.

В этом номере журнала, посвященном юбилейной дате, сотрудники Центра знакомят с основными результатами своих исследований широкий круг ученых, медиков, специалистов по радиационной безопасности, работников надзорных органов и служб охраны труда.

Главный редактор журнала
«Медицинская радиология и радиационная безопасность»
член-корреспондент РАН



А.С. Самойлов

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
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**

Meditinskaiia Radiologiia i Radiatsionnaia Bezopasnost

2021

Том 66

№4

Периодический научный журнал. Издается 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)

Учредители:

Российская академия наук

Министерство здравоохранения Российской Федерации

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

Редакционная коллегия:

Г.М. Аветисов – д.б.н., проф.; А.П. Бирюков – д.м.н., проф.; А.В. Бойко – д.м.н., проф.;
А.Ю. Бушманов – д.б.н., проф., зам. главного редактора; А.А. Вайнсон – д.б.н., проф.; И.П. Коренков – д.б.н., к.т.н., проф.;
А.Н. Котеров – д.б.н.; М. Марков Ph.D, проф., США; Б.Я. Наркевич – д.т.н., к.ф.-м.н., проф., научный редактор;
К.Н. Нурлыбаев – к.т.н.; В.В. Романов; А.С. Самойлов – д.м.н., проф., член-корр. РАН, главный редактор;
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., проф.; 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

Заведующий редакцией С.В. Боровков
Компьютерная верстка С.К. Лихачева
Технический редактор И.К. Соколова
Адрес редакции журнала:
123098, Москва, ул. Живописная, 46
Телефон: (499) 190-59-60

E-mail: medradiol@fmbcfmba.ru
Сайт журнала: <http://medradiol.fmbafmbc.ru/>
Годовой подписной индекс Агентства «Роспечать» – 71814
Подписано в печать 10.09.2021. Формат 60×90/8
Печать офсетная. 12,5 печ. л. Тираж 1000 экз. Заказ № 2004
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)

Founders:

Russian Academy of Sciences

Ministry of Healthcare of the Russian Federation

The journal is published with the support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia (FMBA of Russia)

Editorial Board:

G.M. Avetisov – Dr. Sci. Biol., Prof.; A.P. Biryukov – Dr. Sci. Med., Prof.; A.V. Boiko – Dr. Sci. Med., Prof.;
A.Y. Bushmanov – Dr. Sci. Med., Prof., Deputy Editor-in-Chief; A.A. Vaynson – Dr. Sci. Biol., Prof.;
I.P. Korenkov – Dr. Sci. Biol., PhD Tech., Prof.; A. N. Koterov – Dr. Sci. Biol.; M.S. Markov – Prof., USA;
B.Ya. Narkevich – Dr. Sci. Tech., PhD Phys-Math., Prof., Sci. Editor; K.N. Nurlybaev – PhD. Tech; V.V. Romanov;
A.S. Samoylov – Dr. Sci. Med., Prof., Corresponding Member of RAS, Editor-in-Chief; M.K. Sneve – PhD, Norway;
S.I. Tkachev – Dr. Sci. Med., Prof.; I.E. Tiurin – Dr. Sci. Med., Prof.; P.R. Worthington – PhD, Prof., USA;
N. K. Shandala – Dr. Sci. Med.; A.V. Shafirkin – Dr. Sci. Biol., Prof.; 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, UNSCEAR Representative
Member of the IAEA, Argentina; 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

Head of Editorial Office: S.V. Borovkov
Computer-aided makeup: S.K. Lihacheva
Technical Editor: I.K. Sokolova
Editorial Office Address:
46, Zhivopisnaya st., Moscow, Russia, 123098
Phone: (499) 190-59-60

E-mail: medradiol@fmbcfmba.ru
The journal website: <http://medradiol.fmbafmbc.ru/>
The annual subscription index Agency «Rospechat» – 71814
Signed to print 10.09.2021. Format 60×90/8
Offset printing. 12,5 printed sheets. 1000 copies. Order 2004
Printed by SRC-FMBC.
123098, Moscow, Zhivopisnaya st. 46

СОДЕРЖАНИЕ № 4 – 2021

- РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ**
- 5 Сравнение терапевтического потенциала мезенхимальных стромальных клеток крысы и человека и их кондиционированных сред при местных лучевых поражениях**
А.А. Расторгуева, Т.А. Астрелина, В.А. Брунчуков, Д.Ю. Усупжанова, И.В. Кобзева, В.А. Никитина, С.В. Лищук, Е.А. Дубова, К.А. Павлов, В.А. Брумберг, А.С. Самойлов
- 13 Сравнительная оценка противолучевой эффективности флагеллина по выживаемости и микроядерному тесту**
Н.И. Лисина, К.Ю. Романова, Л.П. Сычева, Л.М. Рождественский
- 18 Изменения нейронов коры головного мозга при однократном и фракционированном гамма-облучении**
И.Б. Ушаков, В.П. Федоров
- РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**
- 25 Радиационная безопасность населения: опыт и пути совершенствования**
Н.К. Шандала, И.П. Коренков, А.М. Лягинская, С.М. Киселев, Ю.Е. Квачева, Е.Г. Метляев, О.В. Паринов, А.В. Титов, М.П. Семенова, Ю.Н. Зозуль, Н.В. Зиновьева
- 33 Актуальные вопросы обеспечения работников радиационно-опасных производств средствами индивидуальной защиты, соответствующими установленным требованиям и условиям труда**
В.И. Рубцов, А.Б. Требухин, А.Ю. Нефедов, Е.В. Клочкова, И.В. Оленина, В.П. Зиновьев, А.Н. Тимошенко, О.В. Исаев, М.С. Богданов, С.А. Богданов, Т.В. Егерева
- 37 Совершенствование нормативного обеспечения радиационной безопасности персонала при утилизации кораблей с ядерными энергетическими установками и судов атомного технологического обслуживания**
А.В. Симаков, Д.В. Арефьева, Ю.В. Абрамов, Н.Л. Проскуракова, И.А. Кемский, А.А. Шахметова
- 42 Радиационно-гигиенический мониторинг на потенциально радоноопасных территориях**
Т.Н. Лащенкова, Л.Э. Карл, А.М. Маренный
- 51 Анализ опыта участия в межлабораторных сравнительных испытаниях лабораторий радиационного контроля в национальной системе аккредитации**
А.М. Полеицук, О.А. Дорохова, Б.А. Кухта, Н.А. Богданенко
- 54 Обоснование критериев реабилитации территорий уранового наследия**
А.В. Титов, Н.К. Шандала, Ю.С. Бельских, Д.В. Исаев, М.П. Семенова, Т.А. Дороньева, К.Ю. Оськина, Ю.В. Гущина
- 58 Результаты деятельности межведомственных экспертных советов по установлению связи заболевания, инвалидности и смерти с воздействием радиационных факторов**
А.Ю. Бушманов, А.П. Бирюков, Э.П. Коровкина, А.С. Кретов, И.В. Власова, А.А. Ломтева, А.А. Гугина
- РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА**
- 62 Хроническая лучевая болезнь подострого течения от внешнего неравномерного облучения при контакте с потерянным источником**
И.А. Галстян, А.Ю. Бушманов, Н.А. Метляева, В.Ю. Соловьев, В.Ю. Мершин, М.В. Кончаловский, В.Ю. Нугис, О.В. Щербатых, Л.А. Юнанова, А.А. Давтян, Е.Е. Обухова
- РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА, ТЕХНИКА И ДОЗИМЕТРИЯ**
- 70 Обоснование и применение критерия достаточности для измерений активности радионуклидов урана в биологических пробах**
Е.А. Дашанова, А.А. Молоканов, Е.А. Корнева
- 77 Средства и методы дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения на протонных ускорителях**
А.Г. Цовьянов, А.Ю. Комаров, П.П. Ганцовский, А.Г. Алексеев, М.Р. Попченко, В.Е. Журавлева, Н.А. Богданенко
- ДИСКУССИЯ**
- 86 Анализ результатов психофизиологических обследований персонала объектов использования атомной энергии**
М.Ю. Калинина, А.С. Кретов, А.Н. Царев, М.А. Солорева, Е.А. Денисова
- 89 К вопросу о фармакологической защите при облучении в непоражающих дозах: возможно, необходимо? Сообщение 1. Общий обзор медико-тактических и феноменологических аспектов**
А.В. Иванченко, В.А. Башарин, И.С. Драчев, А.Б. Селезнев, А.Ю. Бушманов

CONTENTS № 4 – 2021

- RADIATION BIOLOGY
- 5 **Comparison of the Therapeutic Potential of Rat and Human Mesenchymal Stromal Cells and Their Conditioned Media in Local Radiation Lesions**
A.A. Rastorgueva, T.A. Astrelina, V.A. Brunchukov, D.Yu. Usupzhanova, I.V. Kobzeva, V.A. Nikitina, S.V. Lischuk, E.A. Dubova, K.A. Pavlov, V.A. Brumberg, A.S. Samoilo
- 13 **Comparative Evaluation of the Anti-Radiation Efficacy of Flagellin by Survival and Micronucleus Test**
N.I. Lisina, K.Yu. Romanova, L.P. Sycheva, L.M. Rozhdestvensky
- 18 **Changes in the Cortex Neurons in Single and Fractional Gamma Radiation**
I.B. Ushakov, V.P. Fyodorov
- RADIATION SAFETY
- 25 **Radiation Safety of Population: Experience and Ways of Improvement**
N.K. Shandala, I.P. Korenkov, A.M. Lyaginskaya, S.M. Kiselev, Yu.E. Kvacheva, E.G. Metlyaev, O.V. Parinov, A.V. Titov, M.P. Semenova, Yu.N. Zozul, N.V. Zinovieva
- 33 **Current Issues of Providing the Personnel of the Radiation Hazardous Facilities with Personal Protection Equipment Complying with the Requirements and Working Conditions**
V.I. Rubtsov, A.B. Trebukhin, A.Yu. Nefedov, E.V. Klochkova, I.V. Olenina, V.P. Zinoviev, A.N. Timoshenko, O.V. Isaeva
- 37 **Enhancing the Regulatory Support of Occupational Radiation Protection during Decommissioning and Dismantling of Ships with Nuclear Power Installations and Nuclear Service Vessels**
A.V. Simakov, D.V. Arefeva, Y.V. Abramov, N.L. Proskuryakova, I.A. Kemskiy, A.A. Shayahmetova
- 42 **Radiation-Hygienic Monitoring in Potentially Radon-Hazardous Territories**
T.N. Lashchenova, L.E. Karl, A.M. Marennyy
- 51 **Analysis of the Experience of Participation in Interlaboratory Comparisons of the Radiation Control Laboratory in National Accreditation System**
A.M. Poleshchuk, O.A. Dorokhova, B.A. Kukhta, N.A. Bogdanenko
- 54 **Justification of Remediation Criteria of Uranium Legacy Sites**
A.V. Titov, N.K. Shandala, Iu.S. Belskikh, D.V. Isaev, M.P. Semenova, T.A. Doronieva, K.Iu. Oskina, Iu.V. Gushchina
- 58 **Results of the Activities of Interdepartmental Expert Advice on Establishing Communication Diseases, Disabilities and Death with Impact Radiation Factors**
A.Yu. Bushmanov, A.P. Biryukov, E.P. Korovkina, A.S. Kretov, I.V. Vlasova, A.A. Lomteva, A.A. Gugina
- RADIATION MEDICINE
- 62 **Subacute Course of Chronic Radiation Syndrome Caused External Non-Uniform Radiation Exposure of Lost Source**
I.A. Galstyan, A.Yu. Bushmanov, N.A. Metlyaeva, V.Yu. Soloviev, L.Yu. Mershin, M.V. Konchalovsky, V.Yu. Nugis, O.V. Shcherbatykh, L.A. Yunanova, F.S. Torubarov, A.A. Davtian, E.E. Obuhova
- RADIATION PHYSICS, ENGINEERING AND DOSIMETRY
- 70 **Justification and Application of Sufficiency Criterion for Measuring the Activity of Uranium Radioisotopes in Biological Samples**
E.A. Dashanova, A.A. Molokanov, E.A. Korneva
- 77 **Means and Methods of Dosimetry of High-Energy Neutron Radiation on Proton Accelerators**
A.G. Tsovyanov, P.P. Gantsovsky, A.Yu. Komarov, A.G. Alexeev, M.R. Popchenko, V.E. Zhuravleva, N.A. Bogdanenko
- DISCUSSION
- 86 **Analysis of the Results of Psychophysiological Examinations of Personnel of Nuclear Facilities**
M.Yu. Kalinina, A.S. Kretov, A.N. Tsarev., M.A. Soloreva, E.A. Denisova
- 89 **To the Question About Pharmacological Protection During Irradiation in Non-infecting Doses: Maybe, Necessary? Part 1. Ggeneral Overview of Medical-Tactical and Phenomenological Aspects**
A.V. Ivanchenko, V.A. Basharin, I.S. Drachev, A.B. Seleznev, A.Yu. Bushmanov

А.А. Расторгуева, Т.А. Астрелина, В.А. Брунчуков, Д.Ю. Усупжанова, И.В. Кобзева,
В.А. Никитина, С.В. Лищук, Е.А. Дубова, К.А. Павлов, В.А. Брумберг, А.С. Самойлов

СРАВНЕНИЕ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕЗЕНХИМАЛЬНЫХ СТРОМАЛЬНЫХ КЛЕТОК КРЫС И ЧЕЛОВЕКА И ИХ КОНДИЦИОНИРОВАННЫХ СРЕД ПРИ МЕСТНЫХ ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЯХ

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

Контактное лицо: Татьяна Алексеевна Астрелина: t_astrelina@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Сравнить результаты применения мезенхимальных стромальных клеток (МСК) слизистой ткани десны человека и МСК слизистой ткани десны крысы, их кондиционированных сред и оценить их влияние на регенерацию тканей при местных лучевых поражениях (МЛП).

Материал и методы: В исследование включено 120 белых крыс-самцов линии Wistar массой 210 ± 30 г в возрасте 8–12 нед, рандомизированных на 6 групп (по 20 животных в каждой): контроль (К), животные не получали терапию; контроль с введением концентрата культуральной среды (КС) трехкратно на 1, 14, 21 сут; введение МСК слизистой десны человека (ДЧ) в дозе 2 млн на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут; введение концентрата кондиционированной среды МСК слизистой десны человека (ДЧКС) в расчетной дозе 2 млн клеток на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут; введение МСК слизистой десны крысы (ДК) в дозе 2 млн на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут; введение концентрата кондиционированной среды МСК слизистой десны крысы (ДККС) в расчетной дозе 2 млн клеток на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут. Каждое лабораторное животное наблюдали 17 раз: на 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91, 98, 105, 112-е сут после моделирования ожога. Проводили гистологическое (окраска гематоксилином-эозином) и иммуногистохимическое (CD31, CD68, VEGF, PGP 9.5, MMP2,9, Collag 1, TIMP 2) исследования. Моделирование МЛП проводили на рентгеновской установке в дозе 110 Гр. Культивировали МСК по стандартной методике до 3–5 пассажа, осуществляли забор кондиционированной среды и концентрировали ее в 10 раз. Иммунофенотип МСК (CD34, CD45, CD90, CD105, CD73, HLA-DR) и жизнеспособность (7-ADD) определяли с помощью проточной цитофлуориметрии.

Результаты: При сравнительном анализе с контрольной группой (К) начиная с 42-го дня исследования наблюдали тенденцию уменьшения площади язвы кожи животных во всех группах, несмотря на то, что не во все дни статистически значимые различия были выявлены. На 112-е сут полное заживление язвы кожи в группе КС отмечалось у 40 % животных в группе ДЧ – у 60 %, в группе ДЧКС – у 20 % животных, в группе ДККС – 20 %, а в группах К и ДК не было ни одного животного с затянувшейся раневым дефектом.

Положительная экспрессия маркера VEGF отмечалась в группах К и КС на 28-е сутки и в опытных группах (ДЧ, ДЧКС, ДК, ДККС) на 112-е сутки. Статистически значимое увеличение маркера CD68 отмечено в группах К, ДК и ДККС, а в остальных группах отмечено уменьшение количества макрофагов.

Заключение: Таким образом, все использованные методы лечения, включая введение МСК, концентратов культуральной и кондиционированных сред в дозе 2 млн на 1 кг были эффективны при МЛП кожи и приводили к сокращению площади поражения, ускоренному заживлению язвы, улучшению регенеративных процессов. Кроме того, применение мезенхимальных стромальных клеток слизистой ткани десны человека приводило к улучшению васкуляризации и уменьшению воспалительных процессов в очаге лучевого поражения в большей степени, чем введение аналогичных клеток, полученных от крысы.

Ключевые слова: мезенхимальные стромальные клетки, местные лучевые поражения, кондиционированная среда, клеточные технологии, рентгеновское излучение, кожа

Для цитирования: Расторгуева А.А., Астрелина Т.А., Брунчуков В.А., Усупжанова Д.Ю., Кобзева И.В., Никитина В.А., Лищук С.В., Дубова Е.А., Павлов К.А., Брумберг В.А., Самойлов А.С. Сравнение терапевтического потенциала мезенхимальных стромальных клеток крыс и человека и их кондиционированных сред при местных лучевых поражениях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.5–12.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-5-12

Введение

Благодаря широкому использованию радиоактивных материалов в медицинских, промышленных, сельскохозяйственных, военных и исследовательских целях исследователи пытаются найти новые методы лечения последствий воздействия ионизирующего излучения. Чаще всего воздействию радиации подвергается естественный защитный барьер организма – кожа, которая является радиочувствительным органом, т.к. цикл обновления клеток эпидермиса составляет 4–20 сут. Сложность лечения местных лучевых поражений (МЛП) (длительный и болезненный период заживления) связана с гибелью клеток базального слоя эпидермиса, включающего основную массу стромальных клеток и около 70 % всех пролиферирующих клеток кожи [1–3].

Основное лечение МЛП направлено на восстановление погибших базальных клеток, волосяных фолликулов и фибробластов [4]. Одним из направлений лечения кожных ран в настоящее время является использование клеточных технологий применения мезенхимальных стромальных клеток (МСК) и их продуктов, в частности

кондиционированной среды МСК. МСК отличаются низкой иммуногенностью, что позволяет проводить их аллогенную трансплантацию [5]. Хорошо известно, что продуцируемые клетками цитокины могут регулировать по принципу обратной связи функциональный статус и активность как тех клеток, которые их синтезируют, так и окружающих клеток (аутокринные и паракринные эффекты). Паракринные факторы, выделяемые МСК (кондиционированная среда), обеспечивают пролиферативную и репаративную функцию клеток в системах клеточного обновления [6–8].

На сегодняшний день известно несколько источников мезенхимальных стромальных клеток, например, пуповинная кровь, жировая ткань, костный мозг и др. Интересным источником МСК является слизистая ткань десны. Слизистая ткань десны – это легко доступный источник МСК, обладающий высоким пролиферативным и регенеративным потенциалом. Результаты применения МСК слизистой ткани десны при лечении МЛП мало изучены, единичны [1, 6, 8], исходя из чего представленное исследование является актуальным.

Целью настоящего исследования являлось сравнение результатов применения мезенхимальных стромальных клеток (МСК) слизистой ткани десны человека (ДЧ) и МСК слизистой ткани десны крысы (ДК), их кондиционированных сред и оценка их влияния на регенерацию тканей при МЛП.

Материал и методы

Планирование эксперимента. В исследование включены 120 белых крыс-самцов линии Wistar массой 210±30 г. в возрасте 8–12 нед, полученных в специализированном питомнике лабораторных животных «Пушино», имеющих соответствующее ветеринарное свидетельство, прошедших карантин. Исследование было одобрено на заседании секции Ученого совета (выписка № 43А от 25.09.2017) и локальным биоэтическим комитетом (Протокол № 86 от 10.11.2012) ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России.

Лабораторные животные были разделены на 6 групп по 20 крыс в каждой:

1-ая группа – контроль (К), в которой животные не получали терапию;

2-ая группа – контроль с интрадермальным введением 0,4 мл концентрата культуральной среды (КС) трехкратно на 1, 14, 21 сут вокруг МЛП;

3-я группа – интрадермальное введение 0,4 мл МСК слизистой ДЧ в дозе 2 млн на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут вокруг МЛП;

4-ая группа – интрадермальное введение 0,4 мл концентрата кондиционированной среды (ДККС) МСК слизистой десны человека в расчетной дозе 2 млн клеток на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут вокруг МЛП;

5-ая группа – интрадермальное введение 0,4 мл МСК слизистой ДК в дозе 2 млн на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут вокруг МЛП;

6-ая группа – интрадермальное введение 0,4 мл концентрата кондиционированной среды (ДККС) МСК слизистой ДК в расчетной дозе 2 млн клеток на 1 кг трехкратно на 1, 14, 21 сут вокруг МЛП.

Каждое лабораторное животное наблюдали 17 раз: на 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91, 98, 105, 112-е сут после моделирования радиационного ожога. При осмотре проводился мониторинг состояния лабораторного животного с оценкой его поведения, движений, сердечно-сосудистой и/или респираторной функций, изменения аппетита и веса; температуры тела; состояния поверхности кожи и течения раневого процесса (глубина повреждения кожных покровов, их размеры (длина, ширина), общая площадь измененной кожи, площадь открытой раневой поверхности, наличие отделяемого, пузырей, струпа, слущенного эпидермиса, цвет обнаженной дермы, фибриновый налет).

Вывод животных из эксперимента осуществляли на 28, 42, 56, 70, 91 и 112-е сут с начала эксперимента. Проводили гистологическое и иммуногистохимическое исследование.

Моделирование МЛП

Моделирование МЛП проводили на рентгеновской установке ЛНК-268 (РАП100-10) (ООО «Диагностика-М», Россия) с режимом радиационного воздействия в дозе 110 Гр с алюминиевым фильтром 0,1 мм, напряжением 30 кВп, током пучка 6,1 мА, мощностью дозы 21,4 Гр/мин, неопределенностью измерения дозы ±6 % по предложенной раннее методике, приводящей к длительно текущим поражениям кожи (язв) у лабораторных животных. После облучения животных рассаживали по индивидуальным стерильным боксам с автономной системой вентиляции Smart Flow (Tecniplast Group, Италия), обеспечивая свободный доступ к воде и еде.

Получение МСК и кондиционированной среды

В эксперименте были использованы неперсонифицированные образцы МСК слизистой десны человека, находящиеся на длительном криохраниении в биобанке и образцы МСК слизистой десны крысы, полученные от самцов белых нелинейных крыс породы Wistar. Все МСК (на 3 пассаже) культивировались в среде без ксеногенных компонентов – xeno-free (Stem Cell, Канада) с добавлением 100 Ед/мл пенициллина 100 Ед/мл стрептомицина, 2 мМ глутамина. МСК культивировали до 5 пассажа. Проводили тестирование полученной клеточной суспензии (оценивали количество, иммунофенотип и жизнеспособность). Забор КС МСК проводили в стерильные пробирки на 3–5 пассаже при достижении 80–90 % конfluenceности. Для получения КС использовали лабораторную систему фильтрации в тангенциальном потоке LabScale, разработанную для концентрирования, диафильтрации и микрофильтрации. КС помещали в систему фильтрации в тангенциальном потоке и осуществляли ее концентрирование в 10 раз с установкой входного давления 40–52 psi (фунтов на дюйм квадратный) и выходного давления 8–12 psi. Полученный объем пропускали через нейлоновый шприцевой фильтр с размером пор 0,22 мкм (Corning, США). Для клинического применения расчет дозы введения КС проводили с учетом концентрации клеток.

Иммунологическая характеристика МСК

Имунофенотип МСК определяли до 5-го пассажа с помощью проточной цитофлуориметрии. Экспрессию поверхностных маркеров оценивали с помощью меченых флуорохромами антител против CD34, CD45, CD90, CD105, CD73, HLA-DR (BD Biosciences и Becton Coulter, США) на проточном цитофлуориметре FACSCanto II (Becton Dickinson CA, США) в соответствии с инструкцией производителя.

Жизнеспособность МСК

Жизнеспособность оценивали с помощью красителя 7-ADD, проникающего через цитоплазматическую мембрану клетки и связывающегося с ДНК. Определяли количество 7-ADD позитивных клеток на проточном цитофлуориметре FACS Canto II (Becton Dickinson CA, США) в соответствии с инструкцией производителя.

Планиметрический анализ

Фотографии с МЛП кожи лабораторных животных анализировали в программе ImageTool. Для расчета площади выделенного повреждения МЛП кожи животного задавали необходимый масштаб изображения в программе.

Гистологическое исследование

Материал иссеченных образцов пораженных участков кожи (область раневого дефекта с прилегающей кожей и подлежащими мышцами) фиксировали в 10 %-м нейтральном формалине. Дальнейшая обработка производилась по стандартной общепринятой унифицированной методике. Гистологическое исследование биоптатов проводили с применением стандартной окраски гематоксилин-эозином. Исследование гистологических препаратов проводилось в световом микроскопе при увеличениях от ×40 до ×400.

Иммуногистохимическое исследование

Анализировали следующие маркеры: антиген CD31 – маркер тромбоцитарно-эндотелиальной молекулы адгезии, антиген CD68 – маркер гистиоцитов (макрофагов) и VEGF – маркер эндотелия кровеносных сосудов,

Таблица 1

Динамика заживления МЛП у лабораторных животных, в см²
Dynamics of LRI healing in laboratory animals, in cm²

Сутки	14	21	42	56	77	91	112
К	6,59±0,27	3,91±0,19	1,90±0,28	3,07±0,51	3,91±0,91	2,98±0,78	2,15±0,51
КС	5,19±0,32(*)	3,05±0,14(*)	0,55±0,16(*)	0,41±0,17(*)	0,94±0,58*	0,93±0,58	1,04±0,61
ДЧ	7,16±0,31(**)	4,00±0,19(**)	1,85±0,32(**)	1,39±0,43**/*	1,74±0,69	2,02±1,05	0,93±0,74
ДЧКС	7,06±0,30(**)	3,76±0,22(**)	1,90±0,36(**)	1,29±0,57*	0,97±0,47*	1,08±0,53	1,01±0,50
ДК	7,31±0,37	5,30±0,23	2,45±0,26	2,03±0,54	3,00±1,13	2,69±0,53	2,91±0,71
ДККС	6,96±0,18	5,11±0,18	1,62±0,30	1,25±0,55	1,43±0,65	1,75±0,63	3,45±0,92

Примечание: * – достоверные различия по сравнению с контролем (К) ($p \leq 0,05$),
** – достоверные различия по сравнению с группой КС ($p \leq 0,05$),
(*) – достоверные различия по сравнению с контролем (К) ($p \leq 0,01$),
(**) – достоверные различия по сравнению с группой КС ($p \leq 0,01$)

антиген PGP 9.5 – маркер повреждения нервов, MMP 2,9 – матриксные металлопротеиназы, разрушающие белки (преимущественно коллаген) внеклеточного матрикса, уровень коллагена 1, входящего в состав соединительной ткани и кожи, антиген TIMP 2 – тканевой ингибитор металлопротеиназ (Roche, Франция). Экспрессия VEGF, PGP 9.5, MMP 2,9, Collag 1, TIMP 2 оценивалась в эндотелиальных клетках сосудов и клетках стромы, в т.ч. воспалительных, в области дна раны полуколичественно в баллах от 0 до 3, где 0 – отсутствие экспрессии, а 3 – выраженная экспрессия.

Статистический анализ результатов проводили с помощью программного обеспечения Microsoft Office Excel 2007, Statistica 6, ImageTool.

Результаты Оценка МСК

При анализе иммунофенотипа МСК на 4 пассаже с помощью проточной цитометрии во всех культурах клеток выявлялась высокая экспрессия маркеров МСК (CD73, CD90, CD105), маркеры гемопоэтического и лимфоцитарного происхождения отсутствовали (CD34, CD45, HLA-DR). Иммунофенотип соответствовал требованиям Международной организации клеточной терапии, предъявляемым к МСК человека [9]. При дальнейших пассажах клетки в течение нескольких часов прикреплялись к пластиковой поверхности культуральных флаконов и сохраняли высокую пролиферативную активность и жизнеспособность (98±1,2 % 7-ADD) на протяжении всего периода культивирования.

Планиметрический анализ

На 3-и сут наблюдения после облучения у животных появлялась первичная эритема, сопровождающаяся нарушением нормального тонуса кожи.

На 7-е сут у животных всех групп прослеживались признаки появления демаркационной линии, у 24,25 % из них отмечалось развитие сухого дерматита в области облучения. При планиметрической оценке измененной кожи животных на 7-е сут в группах ДЧКС и ДККС площадь была достоверно больше по сравнению с остальными группами К, КС, ДЧ, ДК ($p \leq 0,05$) (табл. 1).

На 14-е сут у всех животных отмечалось появление влажного дерматита, а также увеличение размеров области пораженной кожи с формированием открытой раневой поверхности, покрытой плотным струпом. Вокруг раны определялась зона перифокального воспаления, некротический эпидермис ограничивался демаркационной линией. В группе КС площадь открытой раневой поверхности была достоверно меньше по сравнению с другими группами К, ДЧ, ДЧКС, ДК, ДККС ($p \leq 0,05$) (табл. 1).

На 21-е сут у всех животных зарегистрировано появление отслоившегося некротизированного эпидермиса (язва), покрывающего раневую поверхность кожи. В группе КС площадь язвы была достоверно меньше по сравнению со всеми группами К, ДЧ, ДЧКС, ДКС, ДККС ($p \leq 0,05$) (табл. 1).

До 42-х сут исследования во всех группах отмечалась динамика уменьшения площади язвы кожи животных. Площадь язвы кожи была меньше в группе КС при сравнении с остальными группами ($p \leq 0,05$).

С 91-х сут и до конца наблюдения (112-е сут) статистически достоверных различий по общей площади измененной кожи и площади язвы во всех группах отсутствовали (табл. 1).

На 112-е сут полное заживление язвы кожи в группе КС отмечалось у 40 %, в группе ДЧ – у 60 %, в группе ДЧКС – лишь у 20 % животных, в группе ДККС – 20 %, а в группах К и ДК не было ни одного животного с затянувшейся раневой дефектом (табл.1, рис. 1, 2).

Гистологические исследования

В группе К при гистологическом исследовании иссеченных образцов пораженных участков кожи у всех лабораторных животных отмечались гнойно-геморрагические изменения с участками краевой эпителизации на протяжении всего наблюдения. Воспаление дермы с признаками инфильтрации сохранялось на протяжении всего исследования, при этом фиброз дермы всех образцов отмечался с 42-х сут. Зачатки волосяных фолликулов присутствовали у 66 % животных в 28 и 42-е сут исследования, в последующие сут не выявлялись. Во все сутки наблюдения у животных наблюдали краевое утолщение эпидермиса с явлениями дистрофии эпителиоцитов, иногда с явлениями акантоза и дегенеративными изменениями кератиноцитов. Подкожная мышца в период всего наблюдения была с признаками лимфоцитарной инфильтрации, а начиная с 42-х сут регистрировался фиброз. Слабую пролиферацию сосудов на протяжении эксперимента наблюдали в 61 % образцов (рис. 3).

В группе КС до 56-х сут исследования отмечалось уменьшение гнойно-геморрагической поверхности, покрытой темно-коричневой корочкой. До 70-х сут площадь эпителизированной поверхности не изменялась, а затем в некоторых случаях наблюдались рецидивы (уменьшение площади эпителизации и увеличение гнойно-геморрагических поверхностей). Воспаление дермы с признаками инфильтрации сохранялось на протяжении всего исследования. Волосяные фолликулы и их зачатки (1–3 фолликула в поле зрения) начинали активно появляться с 56-х сут и последующие сут наблюдения. В подкожно-жировой клетчатке и подкожной мышце явления отека и инфильтрации (до 70-х сут) сменялись фиброзированием

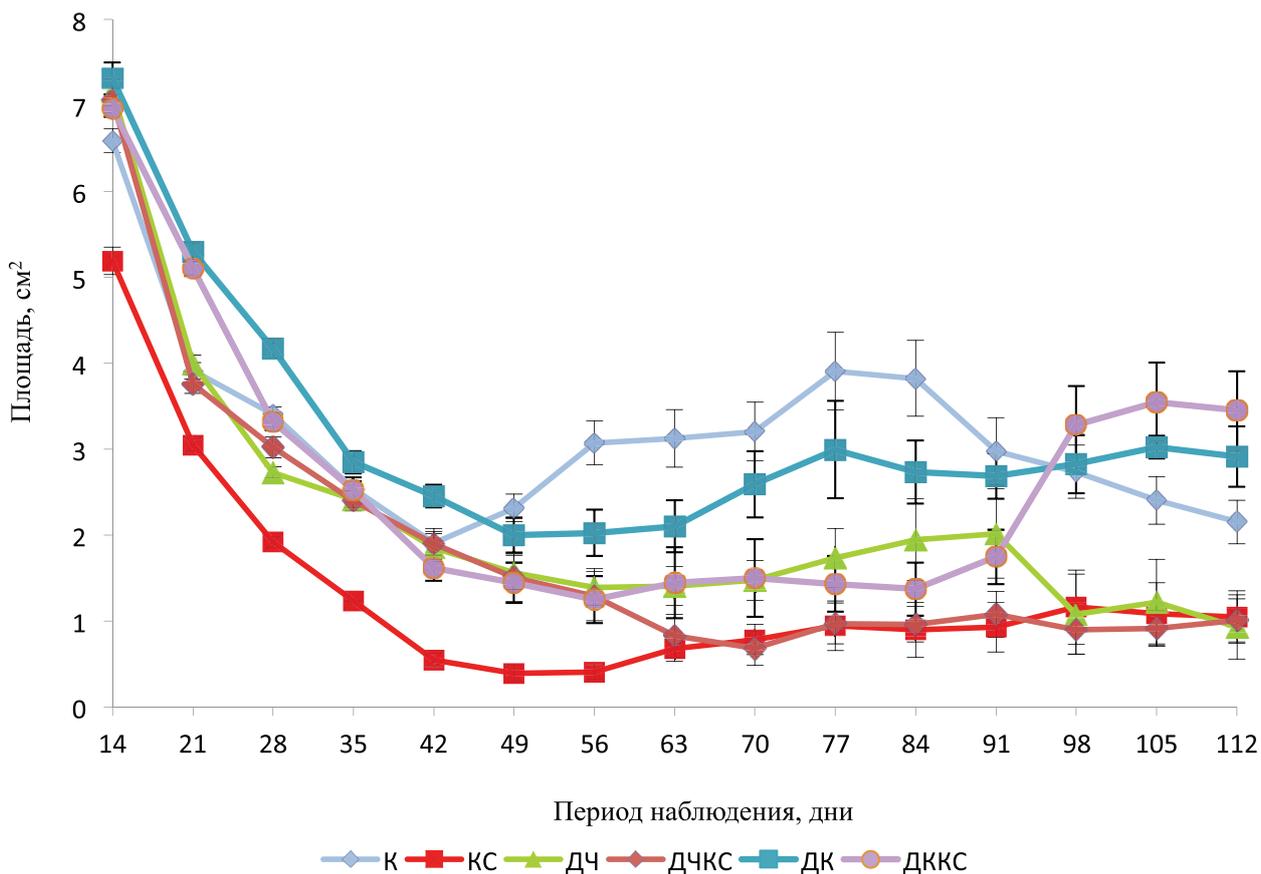


Рис. 1. Динамика заживления МЛП у лабораторных животных
Fig 1. Dynamics of LRI healing in laboratory animals

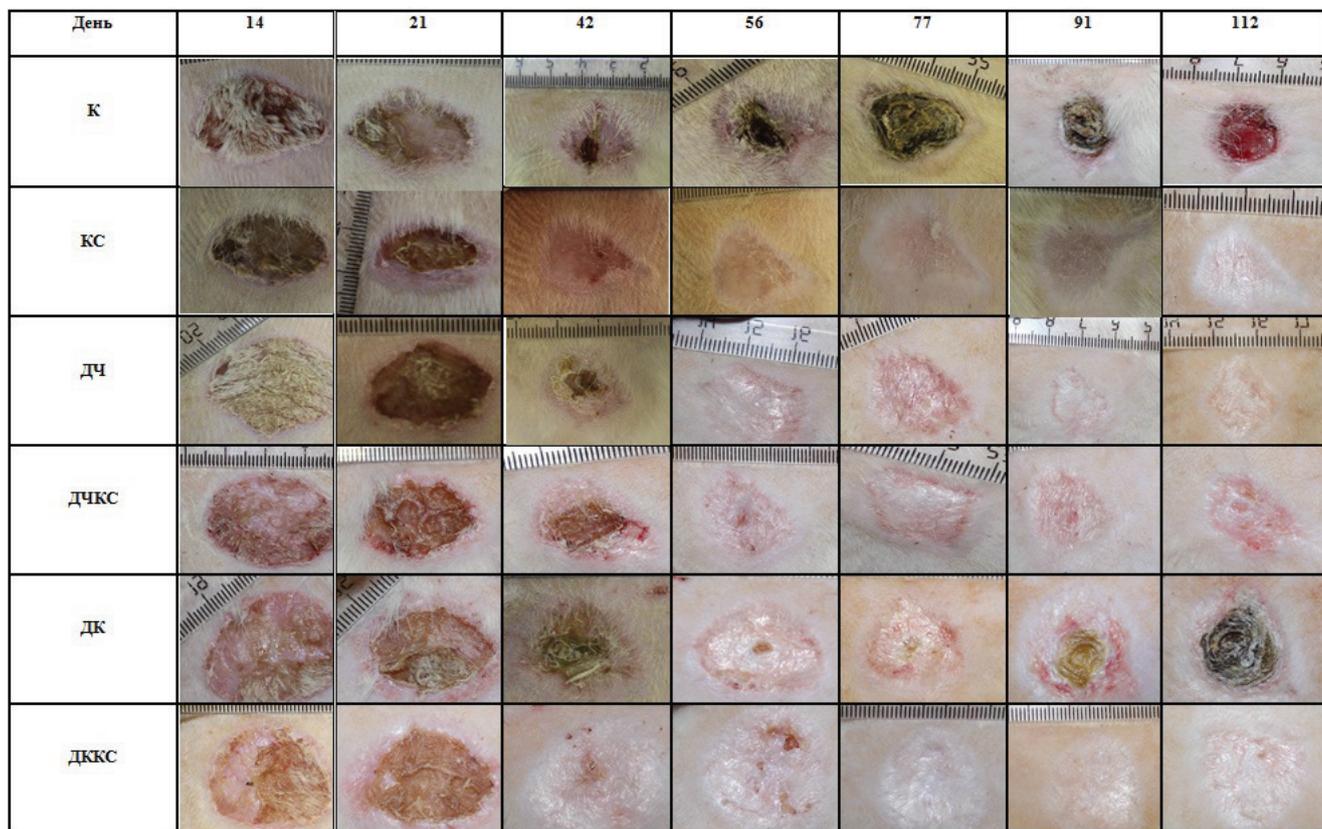


Рис. 2. Динамика заживления МЛП у лабораторных животных
Fig. 2. Dynamics of LRI healing in laboratory animals

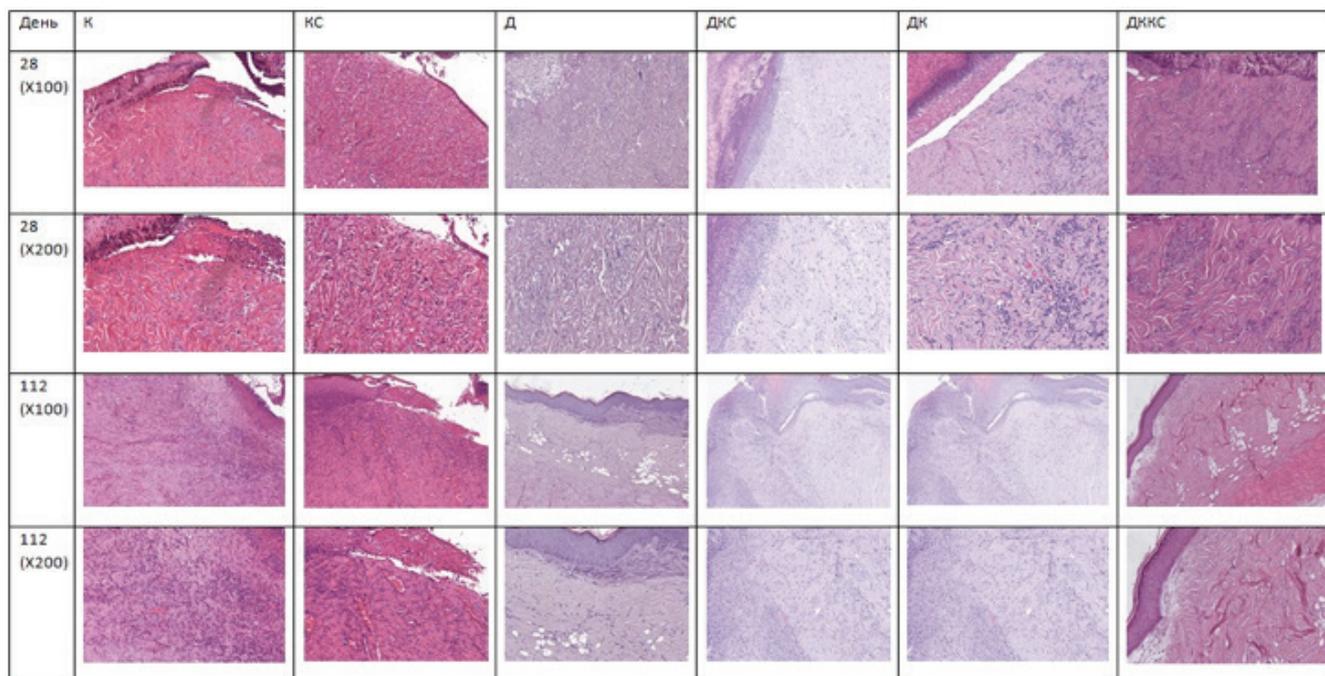


Рис. 3. Морфологические изменения в биоптате кожи с МЛП. Увеличение $\times 100$ и $\times 200$, окраска гематоксилин-эозин
 Fig. 3. Morphological changes in skin biopsy from LRI. Magnification $\times 100$ and $\times 200$, staining with hematoxylin-eosin

(с 91-х сут). Краевое утолщение эпидермиса и дистрофия эпителиоцитов отмечались во всех образцах иссеченной ткани в 28 и 42-е сут и у 33 % образцов в период с 70 по 112-е сут наблюдения (рис. 3).

В группе ДЧ на протяжении всего исследования сохранялось гнойно-геморрагическое повреждение кожи, уменьшение или отсутствие его с увеличением площади эпителизированной поверхности отмечалось только в 112-е сут наблюдения. В подлежащей дерме до 56-х сут наблюдали процессы лимфо-плазмочитарной инфильтрации, наличие некрозов и отеков, с 70-х сут отмечали уменьшение этих процессов и фиброз дермы. Воспаление с инфильтрацией и отеком в подкожно-жировой клетчатке и подкожной мышце в исследуемых образцах сохранялось до 70-х сут с последующим очаговым разрастанием соединительной ткани. Отмечались увеличение количества зачатков волосяных фолликулов с 56-х сут и до конца наблюдения. Краевое утолщение эпидермиса с вакуольной дистрофией наблюдали на 28, 56, 70 и 91-е сут. Увеличение количества сосудов микроциркуляторного русла отмечали с 70-х суток и до конца наблюдения (рис. 3).

В группе ДЧКС с 28 до 56-х сут наблюдалось гнойно-геморрагическое повреждение кожи. На 70-е сут язвы были полностью эпителизованы, а на 91 и 112-е сут снова наблюдалось формирование язвенных поверхностей. Процессы краевой эпителизации были выявлены на 28-е сут и сохранялись на протяжении всего исследования. Подлежащая дерма во все сут наблюдения была с признаками фиброза, лимфоцитарной инфильтрации, а также с грануляциями и некрозом. В 28, 42, 56-е сут гистологического исследования в подкожно-жировой клетчатке и подкожной мышце обнаружены инфильтрации и отеки, а в 112-й день они не выявлены. Волосяные фолликулы обнаружены на 91 и 112 дни наблюдения у 66 % животных. С 70 дня у всех животных развивалось краевое утолщение эпидермиса и гиперкератоз (рис. 3).

В группе ДК на протяжении всего исследования сохранялось гнойно-геморрагическое повреждение кожи, уменьшение или отсутствие его с увеличением площади эпителизированной поверхности отмечалось только в

112-е сут наблюдения. В подлежащей дерме до 56-х сут наблюдали процессы лимфо-плазмочитарной инфильтрации, наличие некрозов и отеков, с 91-х суток отмечали уменьшение этих процессов и фиброз дермы. Воспаление с инфильтрацией и отеком в подкожно-жировой клетчатке и подкожной мышце в исследуемых образцах сохранялось до 91-х сут с последующим очаговым разрастанием соединительной ткани. Краевое утолщение эпидермиса с вакуольной дистрофией наблюдали на 28, 42, 56, 70 и 91-е сут. На 112-е сут отмечался обширный дефект кожи, покрытой гнойно-некротической корочкой, дно дефекта с некротизированными дермой, большой подкожной мышцей, подкожной жировой клетчаткой, по периферии некротизированной ткани – «ободок» из скоплений нейтрофилов, скоплений колоний микроорганизмов, соединительная ткань с участками фиброобразования, с отеком, выраженной лимфо-гистиоцитарной с примесью нейтрофилов инфильтрацией, грануляциями с выраженной пролиферацией микрососудов. Прилежащий к раневому дефекту эпидермис утолщен (до 10–12 слоев клеток) с дегенеративными изменениями кератиноцитов с немногочисленными (до 4–5 клеток в 1 поле зрения) внутри-эпидермальными лимфоцитами.

В группе ДККС с 28 до 56-х сут наблюдалось гнойно-геморрагическое повреждение кожи. На 70-е сут язвы были полностью эпителизованы, а на 91 и 112-е сут снова наблюдалось формирование язвенных поверхностей. Процессы краевой эпителизации были выявлены на 28-е сут и сохранялись на протяжении всего исследования. Подлежащая дерма во все сут наблюдения была с признаками фиброза, лимфоцитарной инфильтрации, а также грануляциями и некрозом. В 28, 42, 56-е сут гистологического исследования в подкожно-жировой клетчатке и подкожной мышце обнаружены инфильтрации и отеки, а в 91 и 112 дни они не выявлены. Волосяные фолликулы обнаружены на 70, 91 и 112 дни наблюдения у 66 % животных. С 70 дня у всех животных развивалось краевое утолщение эпидермиса и гиперкератоз. На 112-е сут отмечался обширный дефект кожи, достигающий подкожно-жировой клетчатки, покрытый гнойно-некрот-

Таблица 2

**Экспрессия маркеров в биоптате кожи с МЛП (иммуногистохимическое исследование)
Expression of markers in skin biopsy with LRP (immunohistochemical study)**

Маркер	День	К	КС	ДЧ	ДЧКС	ДК	ДККС
Cd31	28	13,97±2,0	15,87±1,1	6,00±1,2	19,10±1,1	5,53±0,9	12,2±1,6
	112	17,47±1,3	13,1±1,8	12,75±2,1(*)	28,67±2,7(*)	17,87±1,8(*)	12,53±2,4
Cd68	28	11,7±1,4	22,2±1,6	7,7±0,9	24,0±1,7	16,6±2,3	11,4±1,5
	112	24,7±2,4(*)	13,1±1,8(*)	9,8±1,6	20,9±2,5	31,1±3,9(*)	25,7±3,9
PGP 9.5	28	1,97±0,3	1,97±0,3	1,87±0,4	2,03±0,4	2,6±0,4	1,83±0,3
	112	6,47±1,1(*)	5,7±1,0(*)	4,40±0,9	3,03±0,8	2,7±0,5	2,6±0,4
VEGF (эндотелий)	28	2,67±0,3	2,33±0,3	1,67±0,3	2,67±0,3	2,33±0,67	2,0±0,0
	112	2±0,3	1,33±0,3	2,33±0,3	2,67±0,3	2,67±0,33	2,33±0,33
VEGF (стромы)	28	2,33±0,3	2,0±0	1,0±0,0	2,67±0,3	1,67±0,33	1,33±0,33
	112	1,33±0,3	1,0±0	1,67±0,3	2,0±0,3	2,33±0,67	2,67±0,33
MMP 2	28	3,0±0	3,0±0	2,0±0	3,0±0,0	2,33±0,33	2,67±0,33
	112	2,33±0,3	2,0±0	2,33±0,3	1,33±0,33	2,67±0,33	3,00±0,00
MMP 9	28	3,0±0	2,33±0,3	2,0±0,58	3,0±0	2,67±0,33	3,00±0,00
	112	1,67±0,7	1,0±0	1,33±0,3	1,67±0,67	1,67±0,33	1,67±0,33
Collag 1	28	1,0±0	1,33±0,3	1,0±0	2,0±0	1,33±0,33	1,33±0,33
	112	2,0±0	2,0±0	2,0±0	2,33±0,3	2,67±0,00	2,33±0,33
TIMP 2	28	1,0±0	1,33±0,3	1,67±0,3	1,33±0,3	1,67±0,33	2,00±0,00
	112	2,33±0	2,0±0	2,33±0,3	2,0±0,58	2,67±0,33	2,00±0,58

Примечание: (*) – $p \leq 0,05$

тической корочкой, дно и края его представлены соединительной тканью и поперечно-полосатой мышечной тканью с фиброзированием, грануляциями, выраженной пролиферацией сосудов микроциркуляторного русла, выраженной лимфоплазмозитарной с примесью нейтрофилов инфильтрацией. Прилежащий эпидермис был утолщен до 6–7 слоев клеток, с признаками выраженной дистрофии с немногочисленными (до 3 клеток в 1 поле зрения) внутриэпидермальными лимфоцитами (рис. 3).

Таким образом, моделированное МЛП у лабораторных животных контрольной группы (К), группе с МСК десны крысы (группа ДК) и группе с концентратом кондиционированной среды МСК десны крысы (группа ДККС) протекало по типу неполной регенерации с образованием рубцовой ткани, и на протяжении почти всех сроков наблюдения сохранялась полиморфноклеточная воспалительная инфильтрация. Применение МСК слизистой ткани десны человека (группа ДЧ) и также концентрата кондиционированной среды МСК десны человека (ДЧКС) приводило к ускорению образования грануляционной ткани и ускорению сроков заживления.

Иммуногистохимическое исследование

Также при иммуногистохимическом исследовании определяли маркер макрофагов CD68. Статистически значимое увеличение количества макрофагов выявлено в контрольной группе (К) и группе ДК с 28 по 112-е сут – 11,7±1,4 и 24,73±2,4, ($p \leq 0,05$) и, 16,6±2,3 и 31,1±3,9, ($p \leq 0,05$) соответственно, а в группе КС уменьшение – 22,1±1,6 и 13,07±1,8 ($p \leq 0,05$). (табл. 2).

В ходе исследования отмечено значительное увеличение количества новообразованных сосудов по данным антигена CD31: на 28-е сут в группе ДЧ среднее количество сосудов в поле зрения составило 6,0±1,2, а на 112-е сут – 12,75±2,1 ($p \leq 0,05$), в группе ДЧКС – 19,10±1,1 и 28,6±2,7 ($p \leq 0,05$), в группе ДК – 5,53±0,9 и 17,87±1,8 ($p \leq 0,05$) соответственно.

Уровень маркера ранней дифференциации нейронов PGP 9.5 повышался в контрольных группах (К, КС) практически в 3 раза (с 28 по 112-е сут, $p \leq 0,05$).

Положительная экспрессия маркера VEGF в эндотелиальных клетках и клетках стромы отмечалась при иммуногистохимическом исследовании иссеченных образцов пораженных участков кожи во всех групп животных, а выраженная экспрессия (3 балла) – в группах К и КС на 28-е сут и в группах опытных группах (ДЧ, ДЧКС, ДК, ДККС) на 112-е сут (табл. 2).

Было отмечено снижение экспрессии маркера MMP 2 во всех группах, что возможно свидетельствует о повреждении тканей и воспалительных процессах на протяжении всего процесса регенерации.

Во всех группах отмечалось снижение экспрессии маркера MMP 9.

Увеличение количества коллагена 1 наблюдалось во всех группах, что свидетельствует о процессах регенерации кожи.

Уровень маркера TIMP 2 во всех группах повышался с 28 до 112-х сут, кроме группы ДККС, в которой его уровень оставался неизменным, что демонстрирует подавление пролиферации эндотелиальных клеток (за счет ингибирования MMP) во всех группах, кроме ДККС.

Обсуждение

Местные лучевые поражения, впервые описанные еще в 1895 г., являются самым первым выявленным видом радиационных поражений человека. Поэтому на протяжении многих десятилетий проблема лечения МЛП, связанная с радиационно-индуцированными кожными реакциями, находится в центре внимания врачей и радиобиологов.

Применение клеточной терапии направлено на восстановление погибших базальных клеток, волосяных фолликулов и фибробластов, снижение воспалительных процессов в дерме, привлечение собственных клеток организма в очаг поражения для регенерации поврежденной ткани за счет цитокинов МСК [2, 10].

Статистически значимая разница в площадях ожоговых ран отмечалась на 42–56 сут. Наибольшее количество случаев полного заживления язвы кожи животных к концу периода наблюдения (112-е сут.) было выявлено в группе

ДЧ (60 %) и отмечалось в группах КС, ДЧКС и ДККС (40, 20 и 20 % соответственно), но не в группе К и ДК (рис. 2).

На сегодняшний день имеются единичные публикации, касающиеся сравнения регенеративного потенциала МСК крысы и человека [11, 12]. Известно, что МСК человека продуцируют широкий спектр цитокинов [13], но исследования по качественному составу продуцируемых МСК крыс паракринных факторов на сегодняшний день отсутствуют.

По результатам гистологического исследования отмечали уменьшение воспалительных процессов и фиброза дермы, увеличение количества зачатков волосяных фолликулов и количества сосудов микроциркуляторного русла в группе ДЧ в отличие от других групп, в которых эти изменения были не столь заметны. Одновременно с этим, в группах ДЧ, ДК и ДЧКС отмечалась выраженная экспрессия маркера VEGF в эндотелиальных клетках и клетках стромы. Более того, при оценке маркера CD31 в нашем исследовании показано увеличение абсолютного количества сосудов микроциркуляторного русла в группах Д, ДК и ДКС. Во всех группах отмечалась выраженная экспрессия коллагена I-го типа и увеличение уровня белка PGP 9.5. Все эти данные могут свидетельствовать об интенсивных регенеративных процессах и успешном

заживлении ран после применения клеток и концентрата их кондиционированной среды.

В группах лабораторных животных К, ДК и ДККС в ходе исследования отмечалось увеличение экспрессии макрофагов CD68 с 28-го дня до 112-е сут ($p \leq 0,05$), тогда как в группах КС, ДЧ и ДЧКС отмечали снижение экспрессии макрофагов CD68 с 28-го дня до 112-х сут, и также во всех группах отмечалось увеличение уровня MMP 2, что согласуется с нашими результатами планиметрического анализа воспаления в очаге поражения, что может быть связано со снижением воспалительного процесса (табл. 2).

Заключение

Таким образом, все использованные методы лечения (введение МСК, концентратов культуральной и кондиционированных сред в дозе 2 млн на 1 кг) были эффективны при МЛП кожи и приводили к сокращению площади поражения, ускоренному заживлению язвы, улучшению регенеративных процессов. Кроме того, применение мезенхимальных стромальных клеток слизистой ткани десны человека приводило к улучшению васкуляризации и уменьшению воспалительных процессов в очаге лучевого поражения в большей степени, чем аналогичных клеток, полученных от лабораторных животных (крысы).

Comparison of the Therapeutic Potential of Rat and Human Mesenchymal Stromal Cells and Their Conditioned Media in Local Radiation Lesions

A.A. Rastorgueva, T.A. Astrelina, V.A. Brunchukov, D.Yu. Usupzhanova, I.V. Kobzeva, V.A. Nikitina, S.V. Lischuk, E.A. Dubova, K.A. Pavlov, V.A. Brumberg, A.S. Samoilov

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

Contact person: Tatiana Alexandrovna Astrelina: t_astrelina@mail.ru

ABSTRACT

Background: To compare the results of the use of mesenchymal stromal cells (MSCs) of human gingival mucosa and MSCs of rat gingival mucosa, their conditioned media, and to evaluate their effect on tissue regeneration in local radiation injury (LRI).

Material and methods: The study included 120 white male Wistar rats weighing 210 ± 30 g at the age of 8–12 weeks, randomized into 6 groups (20 animals each): control (C), animals did not receive therapy; control with the introduction of culture medium concentrate (CM) three times for 1, 14, 21 days; administration of human gingival mucosa MSCs (HM) at a dose of 2 million per 1 kg three times for 1, 14, 21 days; administration of human gingival mucosa MSCS conditioned medium concentrate (HMCM) at a calculated dose of 2 million cells per 1 kg three times for 1, 14, 21 days; administration of rat gingival mucosal MSCs (RM) at a dose of 2 million cells per 1 kg three times for 1, 14, 21 days; administration of rat gingival mucosal MSCS (RMCM) conditioned medium concentrate at a calculated dose of 2 million cells per 1 kg three times for 1, 14, 21 days. Each laboratory animal was observed 17 times: on 1, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91, 98, 105, 112 day after the burn simulation. Histological (hematoxylin-eosin staining) and immunohistochemical (CD31, CD68, VEGF, PGP 9.5, MMP2,9, Collag 1, TIMP 2) studies were performed. LRI was modeled on an X-ray machine at a dose of 110 Gy. MSCs were cultured according to the standard method up to 3–5 passages, the conditioned medium was taken and concentrated 10 times. The immunophenotype of MSCs (CD34, CD45, CD90, CD105, CD73, HLA-DR) and viability (7-ADD) were determined by flow cytometry.

Results: In a comparative analysis with the control group (C), starting from the 42nd day of the study, a tendency to reduce the area of skin ulcers in animals in all groups was observed, despite the fact that not all days had statistically significant differences. On day 112th, complete healing of skin ulcers in the CM group was observed in 40 % of animals in the HM group – in 60 %, in the HMCM group – in 20 % of animals, in the RMCM group – 20 %, and in the C and RM groups there were no animals with a prolonged wound defect.

Positive expression of the VEGF marker was observed in groups C and CM on the 28th day and in experimental groups (HM, HMCM, RM, RMCM) on the 112th day. A statistically significant increase in the CD68 marker was observed in groups C, RM, and RMCM, while the remaining groups showed a decrease in the number of macrophages.

Conclusion: Thus, all the treatment methods used, including the administration of MSCs, culture concentrates and conditioned media at a dose of 2 million per 1 kg, were effective in treating skin LRI and led to a reduction in the lesion area, accelerated ulcer healing, and improved regenerative processes. In addition, the use of mesenchymal stromal cells of the human gum mucosa led to an improvement in vascularization and a decrease in inflammatory processes in the focus of radiation damage to a greater extent than similar cells obtained from a rat.

Key words: mesenchymal stromal cells, local radiation lesions, conditioned medium, cell technologies, X-ray radiation, skin

For citation: Rastorgueva AA, Astrelina TA, Brunchukov VA, Usupzhanova DYu, Kobzeva IV, Nikitina VA, Lischuk SV, Dubova EA, Pavlov KA, Brumberg VA, Samoilov AS. Comparison of the Therapeutic Potential of Rat and Human Mesenchymal Stromal Cells and Their Conditioned Media in Local Radiation Lesions. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):5–12.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-5-12

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.03.2021. Принята к публикации: 21.04.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.03.2021. Accepted for publication: 21.04.2021.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брунчуков В.А., Астрелина Т.А., Никитина В.А., Кобзева И.В., Сучкова Ю.Б., Усупжанова Д.Ю., и др. Применение мезенхимальных стромальных клеток плаценты при местных лучевых поражениях кожи. Гены и клетки. 2019, Т. 14, Приложение 41 с.
2. Еремин П.С., Деев Р.В., Бозо И.Я., Дешевой Ю.Б., Лебедев В.Г., Еремин И.И., и др. Заживление тканей в области тяжелого местного лучевого поражения кожи при генноопосредованной индукции ангиогенеза препаратом «Неоваскулген» // Журнал анатомии и гистопатологии. 2020. Т. 9, № 2. С. 26–34. DOI: 10.18499/2225-7357-2020-9-2-26-34
3. Котенко К.В., Еремин И.И., Мороз Б.Б., Бушманов А.Ю., Надежина Н.М., Галстян И.А., Гринаковская О.С., Аксиненко А.В., Дешевой Ю.Б., Лебедев В.Г., Свободина Т.С., Жгутув Ю.А., Лаук-Дубицкий С.Е., Еремин П.С. Клеточные технологии в лечении радиационных ожогов: опыт ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. // Клеточная трансплантология и тканевая инженерия. 2012, Т. 7, № 2, С. 97–102.
4. Zheng K, Wu W, Yang S, Huang L, Chen J, Gong C et al. Bone Marrow Mesenchymal Stem Cell Implantation for the Treatment of Radioactivity Induced Acute Skin Damage in Rats. // Mol. Med. Rep. 2015, V. 12, № 5. P. 7065–7071.
5. Da Silva Meirelles L, Caplan A, Nardi N. In Search of the In Vivo Identity of Mesenchymal Stem Cells. // Stem Cells. 2008; Vol. 26, № 9, P 2287–2299. DOI:10.1634/Stemcells. 2007-1122.
6. Расторгуева А.А., Астрелина Т.А., Брунчуков В.А., и др. Оценка терапевтического потенциала кондиционированной среды мезенхимальных стволовых клеток при химических ожогах у лабораторных животных. // Гены и клетки. 2019, Т. 14, Приложение, С.192–193.
7. Темнов А.А., Астрелина Т.А., Рогов К.А., и др. Исследование влияния факторов кондиционированной среды, полученной при культивировании мезенхимальных стромальных клеток костного мозга, на течение тяжелых местных лучевых поражений кожи у крыс // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018, Т. 63, № 1. С. 35–39.
8. Брунчуков В.А., Астрелина Т.А., Никитина В.А., Кобзева И.В., Сучкова Ю.Б., Усупжанова Д.Ю., Расторгуева А.А., Карасева Т.В., Гордеев А.В., Максимова О.А., Наумова Л.А., Лишук С.В., Дубова Е.А., Павлов К.А., Брумберг В.А., Махова А.Е., Ломоносова Е.Е., Добровольская Е.И., Барабаш И.М., Бушманов А.Ю., Самойлов А.С. Экспериментальное лечение местных лучевых поражений мезенхимальными стволовыми клетками и их кондиционированной средой. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(1):5-12. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-5-12
9. Xu S, Liu C, Ji H. Concise Review: Therapeutic Potential of the Mesenchymal Stem Cell Derived Secretome and Extracellular Vesicles for Radiation-Induced Lung Injury: Progress and Hypotheses. // Stem Cells Transl Med. 2019; Vol. 8, № 4, P. 344–354. DOI:10.1002/scrm.18-0038.
10. Zuo R, Liu M, Wang Y et al. Correction to: BM-MSC-Derived Exosomes Alleviate Radiation-Induced Bone Loss by Restoring the Function of Recipient BM-MSCs and Activating Wnt/ β -catenin Signaling. // Stem Cell Res Ther. 2020. V. 11, № 1 DOI:10.1186/s13287-020-1553-x.
11. Scuteri A, Donzelli E, Foudah D et al. Mesengenic Differentiation: Comparison of Human and Rat Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells. Int J // Stem Cells. 2014; Vol. 7; № 2, P. 127–134. DOI:10.15283/ijsc.2014.7.2.127.
12. Orbay H, Devi K, Williams P, Dehghani T, Silva E, Sahar D. Comparison of Endothelial Differentiation Capacities of Human and Rat Adipose-Derived Stem Cells. // Plast Reconstr Surg. 2016, Vol. 138, № 6, P. 1231–1241. DOI:10.1097/prs.0000000000002791.
13. Iacovelli N, Torrente Y, Ciuffreda A et al. Topical Treatment of Radiation-Induced Dermatitis: Current Issues and Potential Solutions. // Drugs Context. 2020. Vol. 9. P. 1–13. DOI:10.7573/dic.2020-4-7

REFERENCES

1. Brunchukov VA, Astrelina TA, Nikitina VA, Kobzeva IV, Suchkova YuB, Usupzhanova DYU, et. al. The use of Placental Mesenchymal Stromal Cells in Local Radiation Skin Lesions. Genes and Cells. 2019, V. 14, Appendix 41p. (In Russian).
2. Eremin P. S., Deev R. V., Bozo I. Ya., Deshoy Yu. B., Lebedev V. G., Eremin I. I., et al. Healing of Tissues in the Area of Severe Local Radiation Damage to the Skin During Gene-mediated Induction of Angiogenesis with Neovascugen. Journal of Anatomy and Histopathology. 2020; 9(2) 26–34 DOI: 10.18499/2225-7357-2020-9-2-26-34 (In Russian).
3. Kotenko KV, Eremin II, Moroz BB, Bushmanov AYU, Nadezhina NM, Galstyan IA, Grinakovskaya OS, Aksinenko AV, Deshoy YuB, Lebedev VG., Svobodina TS, Zhgutov YuA, Lauk-Dubitsky SE, Eremin PS. Cell Technologies in the Treatment of Radiation Burns: the Experience of the Burnazyan Federal Medical Center. Cell Transplantation and Tissue Engineering. 2012, 7(2) P. 97–102 (In Russian).
4. Zheng K, Wu W, Yang S, Huang L, Chen J, Gong C et al. Bone Marrow Mesenchymal Stem Cell Implantation for the Treatment of Radioactivity Induced Acute Skin Damage in Rats. Mol Med Rep. 2015. 12(5). P. 7065–7071.
5. Da Silva Meirelles L, Caplan A, Nardi N. In Search of the In Vivo Identity of Mesenchymal Stem Cells. Stem Cells. 2008. 26(9) 2287–2299. DOI:10.1634/Stemcells. 2007-1122.
6. Rastorgueva AA, Astrelina TA, Brunchukov VA, et al. Evaluation of the Therapeutic Potential of the Conditioned Media of Mesenchymal Stem Cells in Chemical Burns in Laboratory Animals. Genes and Cells. 2019. 14. Appendix: 192–193 (In Russian).
7. Temnov AA, Astrelina TA, Rogov KA, et al. To Study the Influence of Factors of Conditioned Environment Obtained During the Cultivation of Bone Marrow Mesenchymal Stromal Cells on the Course of Severe Local Radiation Skin Lesions in Rats. Medical Radiology and Radiation safety. 2018;63(1):35–39. (In Russian).
8. Brunchukov VA, Astrelina TA, Nikitina VA, Kobzeva IV, Suchkova YuB, Usupzhanova DYU, Rastorgueva AA, Karaseva TV, Gordeev TV, Maxsimova OA, Naumova LA, Lischuk SV, Dubova EA, Pavlov KA, Brumberg VA, Makhova AE, Lomonosova EE, Dobrovolskaya EI, Barabash IM, Bushmanov AYU, Samoilov AS. Experimental Treatment of Radiation Skin Lesions with Mesenchymal Stem Cells and Their Conditioned Media. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(1):5-12. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-5-12 (In Russian).
9. Xu S, Liu C, Ji H. Concise Review: Therapeutic Potential of the Mesenchymal Stem Cell Derived Secretome and Extracellular Vesicles for Radiation-Induced Lung Injury: Progress and Hypotheses. Stem Cells Transl Med. 2019; 8(4):344–354. DOI:10.1002/scrm.18-0038.
10. Zuo R, Liu M, Wang Y et al. Correction to: BM-MSC-Derived Exosomes Alleviate Radiation-Induced Bone Loss by Restoring the Function of Recipient BM-MSCs and Activating Wnt/ β -catenin Signaling. Stem Cell Res Ther. 2020; 11(1) DOI:10.1186/s13287-020-1553-x.
11. Scuteri A, Donzelli E, Foudah D et al. Mesengenic Differentiation: Comparison of Human and Rat Bone Marrow Mesenchymal Stem Cells. Int J Stem Cells. 2014; 7(2):127–134. DOI:10.15283/ijsc.2014.7.2.127.
12. Orbay H, Devi K, Williams P, Dehghani T, Silva E, Sahar D. Comparison of Endothelial Differentiation Capacities of Human and Rat Adipose-Derived Stem Cells. Plast Reconstr Surg. 2016; 138(6):1231–1241. DOI:10.1097/prs.0000000000002791.
13. Iacovelli N, Torrente Y, Ciuffreda A et al. Topical Treatment of Radiation-Induced Dermatitis: Current Issues and Potential Solutions. Drugs Context. 2020; 9 : 1-13. DOI:10.7573/dic.2020-4-7

Н.И. Лисина, К.Ю. Романова, Л.П. Сычева, Л.М. Рождественский

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОТИВОЛУЧЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФЛАГЕЛЛИНА ПО ВЫЖИВАЕМОСТИ И МИКРОЯДЕРНОМУ ТЕСТУ

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

Контактное лицо: Нина Ивановна Лисина: ni-lisina@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Сравнительная оценка эффективности отечественного препарата флагеллин (разработка ГНИИ особо чистых биопрепаратов, СПб) в расширенном диапазоне сроков введения препарата до и после облучения, а также оценка возможности использования микроядерного теста в качестве биомаркера его эффективности.

Материал и методы: Работа выполнена на мышах самцах ICR CD1 массой 20–22 г. Радиозащитную эффективность флагеллина оценивали по 30-суточной выживаемости подопытных животных в сравнении с контрольными группами. Цитогенетический эффект оценивали микроядерным тестом в полихроматофильных эритроцитах (МЯ-ПХЭ) костного мозга мышей. Облучение проводили на рентгеновской установке РУСТ М1 при мощности дозы 1,1 Гр/мин в интервале доз от 7 до 10 Гр при оценке выживаемости и в дозе 1 Гр для микроядерного теста. Флагеллин вводили внутрибрюшинно по 0,2 мг/кг за 18 ч и 30 мин до облучения, через 10 и 30 мин после облучения. Животным контрольных групп в те же сроки и в том же объеме вводили растворитель – фосфатно-альбуминовый буфер.

Результаты: Наиболее эффективным оказалось применение флагеллина за 30 мин и через 10 мин по отношению к облучению (выживаемость при 8,5 Гр 92 % и 78 %, при 9 Гр 81 % и 55 % соответственно) при выживаемости в контроле 29 % и 0. При наиболее исследованном варианте введения флагеллина за 30 мин до облучения значения фактора изменения дозы на уровне общепринятых оценок LD₁₆, LD₅₀, LD₈₄, составили 1,3, 1,2 и 1,2 соответственно.

Выводы: Целесообразно еще больше расширить временной диапазон применения флагеллина, особенно после облучения. Использование метода оценки доли полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в костном мозге позволило выявить оптимальные сроки введения препарата намного быстрее, чем по выживаемости (МЯ-ПХЭ тест осуществляли через 24 ч после облучения). Показатель МЯ-ПХЭ может рассматриваться как потенциальный биомаркер медикаментозно повышенной радиорезистентности (ранее это было показано в наших исследованиях в отношении беталейкина, индралина и рибоксина).

Ключевые слова: *противолучевые препараты, флагеллин, рентгеновское излучение, мышцы, радиозащитная эффективность, микроядерный тест, полихроматофильные эритроциты*

Для цитирования: Лисина Н.И., Романова К.Ю., Сычева Л.П., Рождественский Л.М. Сравнительная оценка противолучевой эффективности флагеллина по выживаемости и микроядерному тесту // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.13–17.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-13-17

Введение

Способность флагеллина защищать подопытных животных при введении его в относительно малых дозах за короткое время до и после облучения в летальных дозах и даже в дозах, превышающих минимальную абсолютно летальную дозу, была отмечена рядом зарубежных и отечественных авторов. В настоящее время в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна проводятся исследования противолучевой эффективности флагеллина в разных схемах – при профилактическом и лечебном его применении.

Целью данной работы является сравнительная оценка противолучевой эффективности отечественного препарата флагеллин, разработанного в ГНИИ особо чистых биопрепаратов (ОЧБ) в расширенном диапазоне сроков введения препарата до и после лучевого воздействия, а также оценка возможности использования доли ПХЭ с микроядрами (МЯ-ПХЭ) в костном мозге мышей в качестве биомаркера его эффективности.

Материал и методы

Работа выполнена на 250 мышах-самцах ICR CD1 массой 20–22 г, полученных из питомника лабораторных животных «Пушино». При работе с экспериментальными животными соблюдали требования и условия, изложенные в нормативных и правовых документах о порядке проведения экспериментальных работ с применением животных [1].

Мышей содержали в поликарбонатных клетках на установке ИВК (индивидуальная вентиляция клеток) с подачей стерильного воздуха. (Фармбиолайн, Финлян-

дия). Животные содержались на стандартном рационе вивария при свободном доступе к воде и пище. Случайным отбором формировали опытные и контрольные группы по 8 – 10 животных.

В нашей работе была использована делетированная форма рекомбинантного флагеллина (производство ГосНИИ ОЧБ, С-Пб). Лиофилизат флагеллина растворяли в фосфатно-альбуминовом буфере. Препарат в дозе 0,2 мг/кг вводили мышам опытных групп однократно внутрибрюшинно за 18 ч и 30 мин до начала облучения и через 10 и 30 мин после него. Животным контрольных групп в то же время и в тех же объемах вводили растворитель. Острое рентгеновское облучение осуществляли на установке РУСТ М1 при напряжении 200 кВп, токе на трубке 2,5 мА, алюминиевом фильтре 1,5 мм. Мощность дозы облучения составляла 1,1 Гр/мин. Поглощенные дозы облучения находились в интервале 7–9,5 Гр при оценке выживаемости облученных животных. Для оценки дозовой зависимости были сформированы группы мышей, которых облучали дополнительно в дозах 1, 3, 5 Гр. Антимутагенную активность флагеллина оценивали только при воздействии дозы излучения 1 Гр.

Радиозащитную эффективность флагеллина оценивали по 30-суточной выживаемости подопытных животных и по средней продолжительности жизни (СПЖ) павших мышей в сравнении с контрольными группами. Цитогенетический эффект оценивали микроядерным тестом в полихроматофильных эритроцитах (МЯ-ПХЭ) костного мозга мышей. Препараты клеток

Таблица 1

Выживаемость облученных мышей в контрольных и защищенных флагеллином группах
Survival of irradiated mice in control and flagellin-protected groups

№ п/п	Доза, Гр	Выживаемость в различных экспериментальных группах, %				
		Контроль	Флагеллин			
			За 18 ч	За 30 мин	Через 10–15 мин	Через 30 мин
1.	10	0		12,5		
2.	9,5	0		62,5		0
3.	9	0	40	81	55	17
4.	8,5	29	78	92	78	60
5.	8	60		100		
6.	7,5	87,5		100		

Таблица 2

Выживаемость мышей в контрольных и опытных группах при введении флагеллина до и после облучения на разных уровнях оценок ФИД по показателю выживаемости в пробитах
Survival of mice in the control and experimental groups with the introduction of flagellin before and after irradiation at different levels of DCF estimates in terms of survival in probit

	Условия опытов	Уравнение регрессии	Оценка ФИД по показателю выживаемости					
			пробит 5		пробит 4		пробит 6	
			Гр	ФИД	Гр	ФИД	Гр	ФИД
1	Контроль	$y=17,8-1,6x$	8	1,0	8,6	1,0	7,4	1,0
2	Фл за 18 ч	$y=20,6-1,75x$	8,9	1,1	9,5	1,1	8,3	1,1
3	Фл за 30 мин	$y=14,9-1,0x$	9,9	1,2	10,9	1,3	8,9	1,2
4	Фл через 10–15 мин	$y=15,4-1,13x$	9,2	1,15	10,1	1,2	8,3	1,1
5	Фл через 30 мин	$y=23,4-2,13x$	8,6	1,07	9,1	1,1	8,2	1,1

костного мозга для учета микроядер были приготовлены общепринятым способом в соответствии с методическими рекомендациями [2–5]. Анализировали по 1000 полихроматофильных эритроцитов (ПХЭ) от каждого животного для учета ПХЭ с микроядрами. Долю ПХЭ от суммы ПХЭ и нормохромных эритроцитов определяли при дополнительном подсчете 200 эритроцитов.

Результаты опытов подвергали статистической обработке по программе Statistica for Windows, версия 6. Статистическую обработку результатов по учету микроядер, а также сравнение доли ПХЭ от суммы всех эритроцитов в контрольных и опытных группах проводили с помощью критерия Манна–Уитни при уровне значимости для каждого из сравнений 0,05. Критерием являлось статистически значимое изменение исследуемого показателя, по крайней мере, в одной из опытных групп по сравнению с контрольной. Для определения дозовой зависимости проводили регрессионный анализ.

Результаты и обсуждение

Данные о выживаемости мышей контрольной и защищенных флагеллином групп представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наиболее эффективным оказалось применение флагеллина за 30 мин и через 10 мин по отношению к облучению (выживаемость при 8,5 Гр – 92 % и 78 %; при 9 Гр – 81 % и 55 % соответственно) при выживаемости в контроле 29 % и 0. Противолучевая эффективность флагеллина, примененного за 30 мин до облучения, сохраняется и при воздействии доз излучения, превышающих в данных условиях эксперимента минимальную абсолютно летальную дозу ЛД_{95/30} (9,5 – 10 Гр).

Анализ данных по СПЖ показывает, что почти все мыши, и опытные и контрольные, погибали в период костномозгового синдрома острой лучевой болезни – от 10 до 16 сут. Для количественного анализа эффективности флагеллина по критерию фактора изменения дозы (ФИД) были построены кривые выживаемости (рис. 1).

Для представленных на рис. 1 кривых доза–эффект в контроле и опыте были рассчитаны их аналитические выражения:

Контроль: $y = 17,8 - 1,6x$
 Фл за 18 ч $y = 20,6 - 1,75x$
 Фл за 30 мин: $y = 14,9 - 1,0x$
 Фл через 10 мин: $y = 15,4 - 1,13x$
 Фл через 30 мин : $y = 23,4 - 2,13x$,

где: y – 30-суточная выживаемость (пробит), x – доза облучения (Гр).

На рис. 1 и в табл. 2 видно, что все значения эффекта для всех рассчитанных кривых доза–эффект и в контроле и в опыте находятся в пределах пробитов 6 – 4, что позволяет оценить значения ФИД для опытных групп на уровне общепринятых оценок ЛД₈₄, ЛД₅₀ и ЛД₁₆. Так, ФИД для групп наиболее эффективного применения флагеллина за 30 мин до и через 10 мин после лучевого воздействия составляет 1,3; 1,2; 1,2 и 1,2; 1,15; 1,1 соответственно.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что флагеллин оказывает наиболее выраженное противолучевое действие при профилактическом

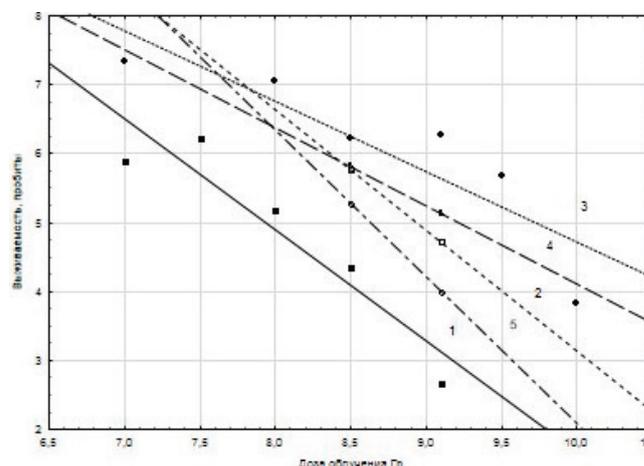


Рис. 1. Кривые выживаемости облученных мышей в опыте и контроле
 1 – Контроль; 2 – Фл за 18 ч; 3 – Фл за 30 мин;
 4 – Фл через 10–15 мин; 5 – Фл через 30 мин
 Fig. 1. Survival curves of irradiated mice in experiment and control
 1 – Control; 2 – Fl for 18 hours; 3 – Fl in 30 min;
 4 – Fl in 10–15 min; 5 – Fl in 30 min

Таблица 3

Зависимость выхода МЯ-ПХЭ от сроков введения флагеллина до и после облучения в дозе 1 Гр
Dependence of the yield of MN-PCE on the timing of flagellin administration before and after irradiation at a dose of 1 Gy

	Условия опыта	Средняя частота ПХЭ с микроядрами после облучения в дозе 1 Гр на 1000 ПХЭ	Равноэффективная доза в контроле по количеству МЯ-ПХЭ в группах с флагеллином (x)	ФИД по МЯ-ПХЭ
1	Фл за 18 ч	16±4,2	1,92	0,5
2	Фл за 30 мин	5,7±3,0	0,25	4
3	Фл через 10–15 мин	5,5±1,8	0,28	3,6
4	Фл через 30 мин	8,8±1,6	0,77	1,29

и лечебном его применении за короткое время (за 30 мин и через 10 мин) по отношению к облучению.

В опытах по оценке противолучевой эффективности флагеллина микроядерным методом МЯ-ПХЭ в костном мозге мышей при остром лучевом воздействии в дозе 1 Гр выявлено статистически значимое снижение частоты МЯ-ПХЭ по отношению к контролю в большинстве вариантов применения флагеллина за исключением срока 18 ч до облучения (табл. 3).

При изучении антимутагенной активности препарата по микроядерному тесту защитный эффект обнаружен при вариантах введения препарата за 30 мин и через 10 и 30 мин после облучения в дозе 1 Гр и в целом коррелировал с оценками по выживаемости. Для расчета ФИД по микроядерному тесту использовали дозовую зависимость выхода МЯ-ПХЭ в контроле в диапазоне доз облучения 0 – 5 Гр (рис. 2, табл. 3). Была проведена оценка противолучевого эффекта по тесту МЯ-ПХЭ только для одной дозы облучения 1 Гр.

Для представленной на рис. 2 кривой доза–эффект была рассчитана регрессионная зависимость: $y = 3,9 + 6,3x$, где y – выход МЯ-ПХЭ (на 1000 эритроцитов); x – доза облучения (Гр). При расчете ФИД по показателю МЯ-ПХЭ вставляли значения показателя при разных сроках введения флагеллина в качестве переменной y . Затем рассчитывали переменную x , получая расчетную равноэффективную дозу в контроле. Разделив отпущенную дозу 1 Гр на расчетную равноэффективную дозу в контроле, получали значения ФИД (табл. 3).

При этом значения ФИД оказались значительно выше, чем по интегральному показателю выживаемости (4 при сроке введения за 30 мин и 3,6 через 10 мин после облучения). Это может быть связано с отличием доз облучения, при которых оценивалась эффективность противолучевых

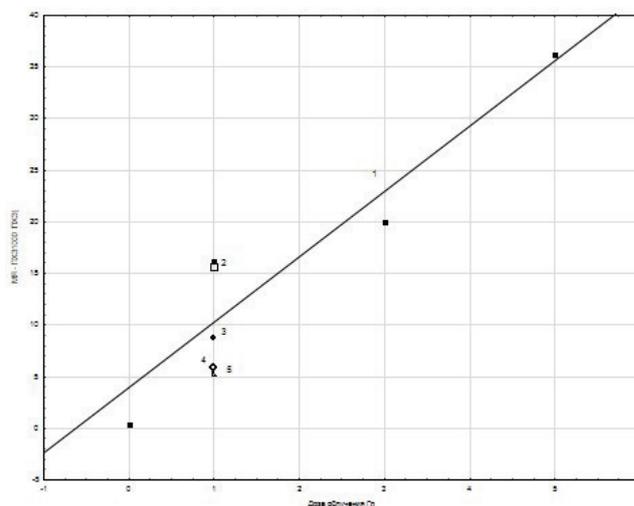


Рис. 2. Зависимость выхода МЯ-ПХЭ в контроле в диапазоне 0–5 Гр и в вариантах различных сроков введения флагеллина при дозе облучения 1 Гр
 1 – Контроль, 2 – Фл за 18 ч, 3 – Фл через 30 мин, 4 – Фл за 30 мин, 5 – Фл через 15 мин

Fig. 2. Dependence of the yield of MN-PCE in the control in range 0–5 Gy and in variants of different terms of flagellin administration at an irradiation dose of 1 Gy
 1 – Control, 2 – Fl in 18 h, 3 – Fl in 30 min, 4 – Fl in 30 min, 5 – Fl in 15 min

препаратов по двум указанным тестам.

Из табл. 2, 3 и рис. 3 видно, что частота выхода полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в костном мозге мышей при использовании флагеллина, примененного в разные сроки до и после облучения в дозе 1 Гр, в целом коррелировала с оценками по выживаемости

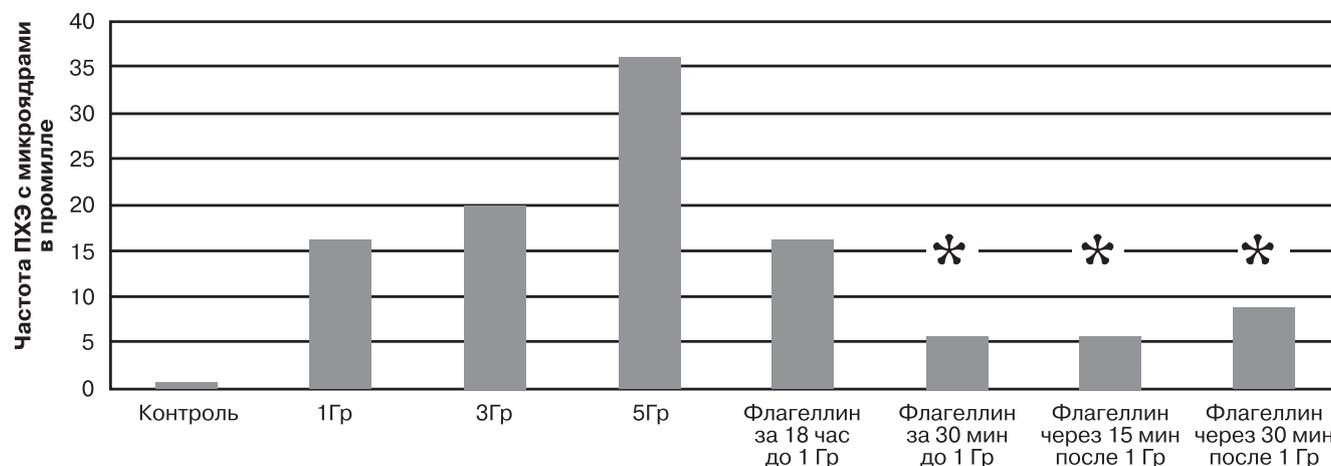


Рис. 3 Частота МЯ-ПХЭ в костном мозге мышей при действии ионизирующей радиации и флагеллина (* – отличие от группы 1 Гр в контроле по критерию Манна–Уитни)

Fig. 3 Frequency of MN – PCE in the bone marrow of mice under the action of ionizing radiation and flagellin (* - difference from group 1 Gy in control according to the Mann – Whitney test)

Таблица 3

Сопоставление эффектов различных вариантов применения флагеллина по тестам выживаемости и ПХЭ с микроядрами

Comparison of the effects of different variants of flagellin use by survival tests and PCE with micronuclei

Условия опыта	ФИД	
	Выживаемость (пробит 5)	МЯ-ПХЭ (на 1000 ПХЭ)
Фл за 30 мин	1,2	4,0
Фл через 10–15 мин	1,15	3,6
Фл через 30 мин	1,07	1,3
Фл за 18 ч	1,1	0,5

мышей в тех же условиях экспериментов. Наибольшее понижение частоты появления МЯ-ПХЭ наблюдалось при применении флагеллина за те же сроки до и после облучения в дозе 1 Гр (за 30 мин до и через 10–15 мин после), как и при изучении выживаемости животных в опытах с теми же условиями введения флагеллина.

В табл. 4 представлены данные сравнения оценок эффектов выживаемости и выхода МЯ-ПХЭ по критерию ФИД при различных вариантах применения флагеллина. Хотя ФИДы по количественному выражению расходятся, но порядок убывания вариантов применения флагеллина по эффективности в целом сохраняется. Так, флагеллин оказывает наиболее выраженное противолучевое действие при профилактическом и лечебном его применении за короткое время (за 30 мин и через 10–15 мин) по отношению к облучению на уровне пробита 5 – значения ФИД самые высокие (1,2 и 1,15); то же самое и для частоты МЯ-ПХЭ – значения ФИД самые высокие (4 и 3,6). Различия между сравниваемыми значениями ФИД применения флагеллина через 30 мин и за 18 ч по критерию Стьюдента оказались недостоверными.

Способность флагеллина при введении его за короткое время до облучения летальными дозами защищать подопытных животных была отмечена ранее рядом зарубежных и отечественных авторов [6–14].

На основании результатов, полученных нами в опытах на мышах ICR СД1, можно сделать вывод, что наиболее эффективным оказалось применение флагеллина за 30 мин до и через 10 мин после облучения: так при 8,5 Гр выживаемость составила 92 % и 78 %, при 9 Гр – 81 % и 55 % соответственно при выживаемости в контрольной группе – 29 % и 0.

В работах отечественных авторов большое внимание также было уделено изучению радиозащитной эффективности флагеллина в опытах на белых беспородных мышах при его применении за 15–30 мин до облучения в смертельных дозах 7–8,5 Гр [8–14]. В этих опытах выживало от 39 до 87 % подопытных животных при выживаемости 20 % в контроле в зависимости от дозы препарата.

Не выявлено значимых различий между опытными группами в условиях лечебного применения флагеллина в большом диапазоне доз препарата от 2 до 1000 мкг/кг, примененного через 15–30 мин после облучения в дозе 7 Гр. В условиях этих экспериментов выжило от 39 до 50 % мышей в разных группах [13].

В наших предыдущих опытах в более широких границах доз облучения (7–10 Гр) к 30-м суткам выжило 62 % (9,5 Гр) и 12% (10 Гр) облученных мышей при полной гибели мышей в контрольной группе [14].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.03.2021. Принята к публикации: 21.04.2021.

При наиболее исследованном нами варианте введения флагеллина профилактически за 30 мин до облучения значения ФИД на уровне общепринятых оценок LD₁₆, LD₅₀ и LD₈₄ составили 1,3; 1,2 и 1,2 соответственно.

При изучении антимуутагенной активности препарата по микроядерному тесту защитный эффект обнаружен при вариантах введения препарата за 30 мин и через 10 и 30 мин после облучения в дозе 1 Гр, и в целом он коррелировал с оценками по выживаемости. При этом значения ФИД оказались значительно выше, чем по интегральному показателю выживаемости (2,3 и 3,6 при сроках введения за 30 мин и через 10 мин после облучения). Это может быть связано с отличием доз облучения, при которых оценивалась эффективность флагеллина по указанным показателям.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения противолучевого действия отечественного препарата флагеллина. Представляет интерес еще больше расширить временной диапазон применения препарата, особенно после облучения. Использование метода оценки доли МЯ-ПХЭ в костном мозге мышей позволило выявить оптимальные сроки введения препарата намного быстрее, чем по выживаемости, так как ответ по МЯ-ПХЭ получили раньше (тест МЯ-ПХЭ осуществляли через 24 ч после облучения). Показатель МЯ-ПХЭ может рассматриваться как потенциальный биомаркер медикаментозно повышенной радиорезистентности (ранее это было показано в наших исследованиях в отношении беталейкина, индралина, рибоксина и флагеллина) [5,16].

Другим перспективным методом оценки антимуутагенного действия противолучевых препаратов является микроядерный метод на лимфоцитах периферической крови лабораторных животных. Этот метод более трудоемок, чем МЯ-тест на ПХЭ, так как требует культивирования клеток и стимуляции их к делениям. Однако его преимуществом является возможность анализа эффекта в более широком диапазоне доз и оценки эффекта в отдаленные сроки после лучевого воздействия, а также возможность анализа эффекта в клетках крови на нескольких сроках (без забоя животных).

Заключение

На основании полученных данных можно сделать заключение о том, что флагеллин оказывает защитное действие в разных схемах экспериментов – при профилактическом и лечебном его применении за короткое время (за 30 мин и через 10 мин) по отношению к облучению. При наиболее исследованном варианте введения флагеллина за 30 мин до облучения значения ФИД на уровне общепринятых оценок LD₁₆, LD₅₀ и LD₈₄ составили 1,2; 1,3 и 1,2 соответственно.

Использование метода оценки доли полихроматофильных эритроцитов с микроядрами в костном мозге позволило выявить оптимальные сроки введения препарата намного быстрее, чем по выживаемости (МЯ-ПХЭ тест осуществляли через 24 ч после облучения). Показатель МЯ-ПХЭ может рассматриваться как потенциальный биомаркер медикаментозно повышенной радиорезистентности (ранее это было показано в наших исследованиях в отношении беталейкина, индралина и рибоксина).

Выявлен антимуутагенный эффект флагеллина при его введении за 30 мин до воздействия, а также через 10 и 30 мин после воздействия ионизирующей радиации.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.03.2021. Accepted for publication: 21.04.2021.

Comparative Evaluation of the Anti-Radiation Efficacy of Flagellin by Survival and Micronucleus Test

N.I. Lisina, K.Yu. Romanova, L.P. Sycheva, L.M. Rozhdestvensky

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

Contact person: Nina Ivanovna Lisina: ni-lisina@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: Comparative evaluation of the effectiveness of the domestic drug flagellin (development of the State Research Institute of High-Purity Biological Products, St. Petersburg) in an extended range of drug administration periods before and after irradiation, as well as evaluation of the possibility of using the micronucleus test as a biomarker of its effectiveness.

Material and methods: The work was performed on male ICR CD1 mice weighing 20–22g. The radioprotective effectiveness of flagellin was evaluated by the 30-day survival rate of experimental animals in comparison with control groups. The cytogenetic effect was evaluated by a micronucleus test in polychromatophilic erythrocytes (MJ-PCE) of mouse bone marrow. Irradiation was performed on the RUST M1 X-unit at a dose rate of 1.1 Gy/min in the dose range from 7 to 10 Gy for survival assessment and at a dose of 1 Gy for the micronucleus test. Flagellin was administered intraperitoneally at 0.2 mg/kg for 18 h and 30 min before irradiation, 10 and 30 min after irradiation. The animals of the control groups were injected with a solvent – phosphate-albumin buffer at the same time and in the same volume.

Results: The most effective was the use of flagellin for 30 min and 10 min in relation to radiation (survival at 8.5 Gy 92 % and 78 %, at 9 Gy 81 % and 55 %, respectively) with survival in the control 29 % and 0. In the most studied version of the introduction of flagellin 30 minutes before exposure, the FID values at the level of generally accepted estimates LD₁₆, LD₅₀, LD₈₄, were 1.3; 1.2 and 1.2, respectively.

Conclusions: It is of interest to further expand the time range of the use of flagellin, especially after irradiation. The use of the method of estimating the proportion of polychromatophilic erythrocytes with micronuclei in the bone marrow allowed us to identify the optimal timing of drug administration much faster than in terms of survival (MJ-PCR test was performed 24 hours after irradiation). The MJ-PHE indicator can be considered as a potential biomarker of drug-induced increased radioresistance (this was previously shown in our studies for betaleukin, indralin, and riboxin).

Key words: anti-radiation drugs, flagellin, X-radiation, mice, radioprotective efficacy, micronucleus test, polychromatophilic erythrocytes

For citation: Lisina NI, Romanova KYu, Sycheva LP, Rozhdestvensky LM. Comparative Evaluation of the Anti-Radiation Efficacy of Flagellin by Survival and Micronucleus Test. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):13-17.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-13-17

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Директива 2010/63/EU Европейского парламента и Совета европейского союза по охране животных, используемых в научных целях. СПб: Rus-Lasa «НП объединение специалистов по работе с лабораторными животными» 2012, 48 с.
2. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. Часть первая. М.: Гриф и К. 2012. 944 с.
3. Heddle J.A., Cimino M.C., Hayashi M. et al. Micronuclei as an index of cytogenetic damage: past, present, and future // Environmental and Molecular Mutagenesis. 1991. Vol. 18. P. 277–291.
4. OECD Guideline for the testing of chemicals № 474. Mammalian Erythrocyte Micronucleus Test. Adopted 21st July 1997. 10 p.
5. Сычева Л.П., Лисина Н.И., Щеголева Р.А., Рождественский Л.М. Антимутагенное действие противолучевых препаратов в эксперименте на мышах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 4. С.388–393.
6. Burdelya L.G., Krivokrysenko V.I., Tallant T.C., et al. An Agonist of Toll-lair Receptor 5 has Radioprotective Activity in Mouse and Primate models // Science 2008. V. 320. No. 5873. P. 226–230.
7. Krivokrysenko VN, Shakhov AN, Gudkov AV, Feinstein E. Identification of G-CSF and IL-6 as Candidate Biomarkers of GBLB502 Efficacy as a Medical Radiation Countermeasure // JPET Fast Forward. 2012 as DOI: 0.1124/jpet.112.196071. P. 1–46.
8. Гребенюк А.Н., Аксенов Н.В., Петров А.В. и др. Получение различных вариантов рекомбинантного флагеллина и оценка их радиозащитной эффективности // Медицинский Академический Журнал. 2017. Т. 43. № 3. С.75–80.
9. Мурзина Е.В., Софронов Г.А., Аксенов Н.В. и др. Противолучевые свойства бактериального флагеллина // Известия Российской Военно-Медицинской Академии 2017, Т. 36, № 2, Прил.1, С. 242–243.
10. Мурзина Е.В., Софронов Г.А., Симбирцев А.С. и др. Оценка радиозащитных свойств рекомбинантного флагеллина при применении раздельно или в комбинации с ИЛ-1бета // Медицинский Академический Журнал. 2018. Т. 18. № 3. С. 77–84.
11. Мурзина Е.В., Софронов Г.А., Аксенов Н.В. и др. Экспериментальная оценка противолучевой эффективности рекомбинантного флагеллина // Вестник Российской Военно-Медицинской Академии. 2018. № 3. С.122–128.
12. Мурзина Е.В., Софронов Г.А., Аксенов Н.В. и др. Перспективные для разработки новых противолучевых средств биотехнологические препараты // Вестник Российской Военно-Медицинской Академии. 2017. № 3. С.133–136.
13. Сапожников Р.Ю., Халимов Ю.Ш., Легева В.И. и др. Профилактическая и лечебная эффективность рекомбинантного флагеллина при остром радиационном поражении // Вестник Рос. Военно-мед. акад., 2019. Т. 3, №. 67. С. 141–144.
14. Лисина Н.И., Щеголева Р.А., Шлякова Т.Г., Зорин В.В., Шкаев А.Э., Рождественский Л. М. Противолучевая эффективность флагеллина в опытах на мышах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т.59. №3. С.1–5.
15. Оценка мутагенной активности факторов окружающей среды в клетках разных органов млекопитающих микродермным методом. Методические рекомендации. Изд. Официальное. М., Межведомственный научный совет по экологии и гигиене окружающей среды РФ. 2001. 21с.
16. Сычева Л.П., Рождественский Л.М., Лисина Н.И. и др. Антимутагенная активность и гепатопротекторное действие противолучевых препаратов // Медицинская генетика. 2020. Т. 19. № 9 (218). С.81–82.

REFERENCES

1. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of the European Union on the protection of animals used for scientific purposes. Saint Petersburg: Rus-Lasa "NP association of specialists in working with laboratory animals" 2012, 48 p. (In Russian)
2. Guidelines for conducting preclinical studies of medicines. Part 1. M.: Grif and K. 2012. 944 p. (In Russian)
3. Heddle JA, Cimino MC, Hayashi M, et al. Micronuclei as an index of cytogenetic damage: past, present, and future. Environmental and Molecular Mutagenesis. 1991; 18: 277–291.
4. OECD Guideline for the testing of chemicals №474. Mammalian Erythrocyte Micronucleus Test. Adopted 21st July 1997. 10 p.
5. Sycheva LP, Lisina NI, Shchegoleva RA, Rozhdestvensky LM. Antimutagenic effect of anti-radiation drugs in an experiment on mice. Radiation biology. Radioecology.2019; 59(4):388–393. (In Russian)
6. Burdelya LG, Krivokrysenko VI, Tallant TC, et al. An agonist of toll-lair receiver 5 has radioprotective activity in mouse and primate models. Scieps 2008; 320. (5873): 226–230. (In Russian)
7. Krivokrysenko VN, Shakhov AN, Gudkov AV, Feinstein E. Identification of G-CSF and IL-6 as candidate biomarkers of GBLB502 efficacy as a medical radiation countermeasure. JPET Fast Forward. 2012 P. 1–46. DOI: 0.1124/jpet.112.196071. (In Russian)
8. Grebenyuk AN, Aksenov KV, Petrov AV, etc. Obtaining various variants of recombinant flagellin and evaluating their radioprotective effectiveness. Medical Academic. Journal. 2017; 43(3):75–80. (In Russian)
9. Murzina EV, Sofronov GA, Aksenova NV, etc. Anti-radiation properties of bacterial flagellin. Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2017; 36(2). Suppl 1: 242–243. (In Russian)
10. Murzina EV, Sofronov GA, Simbirsev AS, et al. Evaluation of the radioprotective properties of recombinant flagellin when used separately or in combination with IL-1beta. Medical. Academic. Journal. 2018; 18(3):77–84. (In Russian)
11. Murzina EV, Sofronov GA, Aksenova NV, et al. Experimental evaluation of the anti-radiation efficacy of recombinant flagellin. Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2018; 3: 122–128. (In Russian)
12. Murzina EV, Sofronov GA, Aksenova NV, et al. Biotechnological preparations promising for the development of new anti-radiation agents. The Messenger Grew. Bulletin of the Russian Military Medical Academy. 2017; 3: 133–136. (In Russian)
13. Sapozhnikov RYu, Khalimov Yu Sh, Legeva VI, etc. Preventive and curative efficacy of recombinant flagellin in acute radiation damage. Bulletin of the Russian Military Medical Academy, 2019; 67(3):141–144. (In Russian)
14. Lisina NI, Shchegoleva RA, Shlyakova TG, Zorin VV, Shkaev AE, Rozhdestvensky LM. Anti-radiation efficacy of flagellin in experiments on mie. Radiation biology. Radioecology.2019; 59(3):1–5. (In Russian)
15. Evaluation of the mutagenic activity of environmental factors in the cells of different mammalian organs by the micronucleus method. Methodological recommendations. Ed. Official. M., Interdepartmental Scientific Council for Ecology and Environmental Hygiene of the Russian Federation. 2001. p. 21.
16. Sycheva LP, Rozhdestvensky LM, Lisina NI, et al. Antimutagenic activity and hepatoprotective effect of anti-radiation drugs. Medical Genetics. 2020; 19(9): 81–82.

И.Б. Ушаков, В.П. Федоров

ИЗМЕНЕНИЯ НЕЙРОНОВ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ ОДНОКРАТНОМ И ФРАКЦИОНИРОВАННОМ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ

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

Контактное лицо: Владимир Петрович Федоров: fedor.vp@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Сравнительная оценка радиационно-индуцированных изменений нейронов коры головного мозга после однократного и фракционированного воздействия ионизирующего излучения в дозах от 0,1 до 1,0 Гр.

Материал и методы. Исследование с соблюдением правил биоэтики выполнено на 180 белых беспородных крысах-самцах в возрасте 4 мес к началу эксперимента, подвергшихся однократному или фракционированному воздействию γ -квантами ^{60}Co в суммарных дозах 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 Гр. Нейроморфологическими и гистохимическими методиками оценивали морфометрические и тинкториальные показатели нервных клеток, а также изменения содержания белка и нуклеиновых кислот в нейронах в ранние и отдаленные сроки пострadiационного периода. С помощью однофакторного дисперсионного анализа дана сравнительная оценка нейроморфологических показателей при различных режимах радиационного воздействия.

Результаты. У контрольных и облученных животных на протяжении всей жизни наблюдаются волнообразные изменения показателей состояния нейронов головного мозга с постепенным снижением их к окончанию эксперимента. Несмотря на ряд особенностей динамики нейроморфологических показателей, данные режимы облучения не вызывают в нейронах коры функционально значимых изменений. Однако в некоторые сроки пострadiационного периода изменения при изученных режимах облучения были разнонаправленные и не всегда соответствовали возрастному контролю. Существенных различий реакции нейронов на данные режимы радиационного воздействия в сенсорной и моторной зонах коры головного мозга не установлено.

Заключение: Функционально-значимых радиационно-индуцированных изменений нейронов как при однократном, так и фракционированном облучении не выявлено. При этом различные режимы облучения в целом вызвали однотипные изменения нейронов. Однако в отдельные сроки наблюдения изменения нейроморфологических показателей при изученных режимах облучения были не однонаправленные и отличались от возрастного контроля, что свидетельствует о возможном риске возникновения нарушений функционирования нервной системы на фоне других вредных и опасных факторов.

Ключевые слова: малые дозы радиации, облучение, головной мозг, изменения нейронов, крысы

Для цитирования: Ушаков И.Б., Федоров В.П. Изменения нейронов коры головного мозга при однократном и фракционированном гамма-облучении // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.18–24.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-18-24

Введение

В связи с рядом радиационных инцидентов и аварий, повлекших за собой повышение радиационного фона, внимание радиобиологов и клиницистов в последнее время все больше стали привлекать малые дозы ионизирующего излучения. Это обусловлено прежде всего заметным ростом у подвергшегося облучению населения и ликвидаторов последствий радиационных аварий различных заболеваний, среди которых значительное место занимают нарушения психоневрологического статуса [1–4]. Отчетливо это продемонстрировано у летного состава вертолетной авиации, выполнявшего в первые дни аварии на Чернобыльской АЭС поставленные задачи и получившего регламентированные дозы облучения [5–7]. Так, уже через 5 лет у летчиков стал наблюдаться ежегодный рост заболеваемости, а через 10 лет уже 38 % ликвидаторов имели различные хронические болезни. Примечательно, что среди получивших дозу облучения ликвидаторов более 250 мЗв заболеваемость встречалась у половины обследованных. Среди этих лиц у 70 % основное заболевание впервые выявлено после работ на Чернобыльской АЭС, и за 17 лет среднее число диагнозов на 1 ликвидатора выросло с 1,4 до 7,2 [8]. При этом психические и неврологические заболевания превышают данные контрольной группы более чем в 5 раз [9]. Вместе с тем, сведений о патогенезе заболеваний нервной системы у ликвидаторов явно недостаточно для корректной оценки роли в этом радиационного фактора. В ряде случаев органические изменения нервной системы трактуются как функциональные и наоборот, а жалобы ликвидаторов могут расцениваться специалистами как проявление установки на получение льгот или отражение радиобоязни [1].

Приводимые нейроморфологами сведения не демонстрируют явной радиационной патологии в головном мозге при экспериментальном облучении животных в дозах, сопоставимых с полученными ликвидаторами последствий аварии на ЧАЭС. Проведенные исследования показывают, что нервная система обладает высокой функциональной чувствительностью к радиационному фактору, но в то же время и высокой пластичностью. Выявленные изменения при облучении в малых дозах неспецифичны, протекают волнообразно и не имеют линейной дозовой или временной зависимости. В пострadiационном периоде преобладают пограничные изменения, отражающие различные варианты физиологической нормы нейронов. Такие изменения обратимы, и в определенных условиях на их основе могут возникать различные формы альтеративных или адаптационных изменений. Все изменения встречаются как в контрольных, так и экспериментальных группах, отличаясь лишь процентным соотношением [10–13]. Наряду с этим в пострadiационном периоде отмечается увеличение количества деструктивных нейронов, которые расположены изолированно и не образуют патологических скоплений. При этом у облученных животных не установлено статистически значимого снижения количества нервных клеток по сравнению с возрастным контролем [7, 14]. В то же время реакция нервной системы на однократное и пролонгированное радиационное воздействие в одной и той же суммарной дозе остается практически не изученной [7, 10]. Известно, что время, за которое получена доза облучения, является одним из лимитирующих факторов пребывания ликвидаторов в очагах радиационного загрязнения, в связи с чем эта проблема имеет не только теоретическое, но и практическое значение.

В связи с вышеизложенным, целью работы явилась сравнительная оценка радиационно-индуцированных изменений нейронов коры головного мозга после однократного и фракционированного воздействия ионизирующего излучения в дозах от 0,1 до 1,0 Гр.

Материал и методы

Исследование выполнено на 180 беспородных крысах-самцах в возрасте 4 мес (к началу эксперимента), которых подвергали внешнему однократному и фракционированному (равными порциями в течение 5 дней) облучению γ -квантами ^{60}Co на установке «Хизатрон» в суммарных дозах 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0 Гр с мощностью дозы облучения 0,5 Гр/ч. Доза, режим облучения и временные параметры проведения эксперимента соответствовали данным о лучевой нагрузке у летного состава при ликвидации аварии на ЧАЭС [10]. Материал забирали через 1 сут (это время, соответствующее возможной первичной реакции на облучение), 6 мес (возраст пребывания вертолетчиков на военной службе), 12 мес (пределный возраст для военнослужащих) и 18 мес пострадиационного периода. Каждой группе соответствовал адекватный возрастной контроль.

Протокол эксперимента составлен в соответствии с Приказом МЗ РФ № 267 от 19.06.2003 об утверждении правил лабораторной практики. Объектом исследования являлись кора теменной (поле PA_s) и лобной (поле FP_a) долей больших полушарий головного мозга. При исследовании оценивали количество функциональных (нормохромные, гипохромные и гиперхромные) и альтеративных (пикноморфные и клеточные тени) типов нейронов, содержание в них белка и нуклеиновых кислот, а также активность основных окислительно-восстановительных ферментов (СДГ, ЛДГ, Г-6ФДГ) [15]. Определяли площадь сечения нейронов, их цитоплазмы, ядер и ядрышек с последующим расчетом соответствующих индексов. Количественную оценку содержания в нейронах белка, нуклеиновых кислот и активность ферментов определяли по величине оптической плотности конечных продуктов гистохимических реакций в видимой части спектра с помощью компьютерной программы Image J. 36 b Wayne Rasband National Institutes of Health, USA. Количество нейронов у каждого животного (в группе n=6), необходимых для определения нейроморфологических показателей, определяемое методом аккумуляции средних, составляло от 400 до 500.

При этом рассматриваемые показатели имели распределения, близкие к нормальным, поскольку среднее арифметическое, геометрическое и гармоническое значения

незначительно отличались друг от друга, а также с модой и медианой; минимальные и максимальные значения были примерно равноудалены от среднего значения, а стандартизированные коэффициенты асимметрии и эксцесса по абсолютной величине меньше 2. При незначительном коэффициенте вариации показателей в данном случае возможно использование параметрических методов обработки результатов. Описательную статистику с вычислением средних и доверительные интервалы осуществляли с помощью пакетов программ Statistica 6.1, MS Excel 2007 при уровне значимости 95 % с последующим математическим моделированием нейроморфологических показателей и определением прогноза их развития. В качестве инструмента сравнения нейроморфологических показателей при однократном и фракционированном радиационном воздействии использовали однофакторный дисперсионный анализ. Алгоритм проведения эксперимента, забора, обработки и исследования материала достаточно подробно представлен нами ранее [7, 10].

Результаты

Возрастные и радиационно-индуцированные морфофункциональные изменения нейронов головного мозга при различных режимах внешнего облучения достаточно подробно описаны нами ранее [5, 10–12]. В данной работе приведенные данные уточняются и дается сравнительная оценка динамики изменений нейроморфологических показателей при однократном и фракционированном гамма-облучении в ранние и отдаленные сроки пострадиационного периода. Алгоритм анализа показан на примере интегрального оценочного критерия радиационно-индуцированных изменений в головном мозге – количества нейронов с альтеративными (деструктивными, необратимыми) изменениями.

Из табл. 1 следует, что в слое V лобной коры (большие пирамидные нейроны) через сутки после радиационного воздействия в дозе 0,5 Гр количество нейронов с альтеративными изменениями достоверно зависело от всех рассматриваемых режимов облучения ($p < 0,05$). При этом фракционированное воздействие повышало показатель, а однократное – снижало. Влияние воздействия облучения на динамику изменений количества нейронов с альтеративными изменениями высокое: уровень значимости модели составляет менее 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,70$ и сильной связи эффекта с фактором $r = 0,84$ (табл. 2).

Количество нормохромных больших пирамидных нейронов достоверно зависело от фракционированного облучения, тогда как однократное облучение не оказы-

Таблица 1

**Зависимость количества деструктивных нейронов от режима облучения
Dependence of the number of destructive neurons on the irradiation regime**

Фактор	Коэффициент <i>B</i>	Критерий Стьюдента <i>t</i>	Уровень значимости <i>p</i>	β^2
Константа	14,9	18,9	$< 1 \times 10^{-19}$	
Однократное облучение	-6,6	-6,0	0,000026	-0,97
Фракционированное облучение	3,7	3,3	0,004480	0,54

Таблица 2

**Оценка влияния смены режима облучения на деструктивные нейроны
Assessment of the influence of changing factors of influence on destructive neurons**

Параметр	Коэффициент корреляции <i>r</i>	Коэффициент детерминации R^2	Сумма квадратов отклонений <i>SS</i>	Степени свободы <i>df</i>	Средние квадраты отклонений <i>MS</i>	<i>F</i> статистика	Коэффициент достоверности <i>p</i>
Модель	0,84	0,7	396,6	2	198,3	17,87	0,00010
Остаток			166,5	15	198,3		
Корректировка		0,66					

вало на них статистически значимого влияния. В то же время эффект воздействия облучения на динамику количества нормохромных нейронов (НН) слабый: уровень значимости модели составляет более 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2=0,29$ и средней силы корреляции эффекта с рассматриваемым аргументом ($r=0,53$).

Количество больших пирамидных нейронов с функциональными изменениями (РН) достоверно зависело от однократного облучения ($p<0,05$), тогда как при фракционированном воздействии статистически значимой зависимости не отмечалось. Влияние воздействия облучения на изменение функциональной активности нейронов при однократном воздействии высокое: уровень значимости модели составляет менее 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2=0,76$ и сильной корреляционной связи ($r=0,87$) эффекта с рассматриваемым аргументом.

Визуальная оценка влияния режимов облучения на рассматриваемые типы клеток пятого слоя (большие пирамидные нейроны) лобной коры представлена на рис. 1. Из графика видно, что однократное облучение имеет большее влияние на увеличение количества нейронов с измененной функциональной активностью, чем фракционированное. И однократное, и фракционированное воздействие оказывают примерно равное, но с противоположным знаком, влияние на количество нейронов с деструктивными изменениями (ДН). При однократном облучении показатель имеет тенденцию к снижению, а при фракционированном – к повышению.

Из других показателей морфофункционального состояния нейронов высшего центра пирамидной системы рассмотрены следующие: содержание белка в нейронах, РНК в цитоплазме, ДНК в ядрах, РНК в ядрышках, площадь цитоплазмы и ядра нервных клеток слоя V лобной коры (большие пирамидные нейроны).

Площадь цитоплазмы больших пирамидных нейронов практически не зависела от режима облучения. Влияние воздействия облучения на изменение рассматриваемого показателя низкое: уровень значимости модели составляет более 0,05 при коэффициенте детерминации менее $R^2=0,09$ и слабой корреляции ($r=0,3$) эффекта с рассматриваемыми аргументами (рис. 2). При этом содержание РНК в цитоплазме нейронов достоверно зависело от рассматриваемых режимов облучения, но наибольшее влияние на показатель оказывало фракционированное (примерно в 2 раза больше) по сравнению с однократным воздействием. Эффект воздействия облучения на изменение содержания

цитоплазматической РНК средний: уровень значимости модели составляет менее 0,001 при коэффициенте детерминации $R^2=0,69$ и высокой корреляции аргументов ($r=0,83$).

Площадь сечения ядер нейронов достоверно зависела от рассматриваемых режимов облучения, но наибольшее влияние оказывало однократное облучение по сравнению с фракционированным. Влияние воздействия облучения на изменение площади ядер достаточно высокое: уровень значимости модели составляет менее 0,0001 при коэффициенте детерминации $R^2=0,75$ и высокой корреляции аргументов $r=0,87$ (рис. 2). При этом содержание ДНК в ядрах нейронов также зависело от рассматриваемых режимов облучения, но наибольшее влияние на изменение содержания ДНК оказывало фракционированное облучение по сравнению с однократным. Влияние воздействия облучения на изменение содержания ядерной ДНК довольно высок: уровень значимости модели составляет менее 1×10^{-19} при коэффициенте детерминации $R^2=0,91$ и сильной связи аргументов $r=0,96$ (рис. 2).

Содержание РНК в ядрышках нейронов достоверно зависело только от фракционированного облучения. Влияние воздействия облучения на изменение содержания ядрышковой РНК достаточно высокое: уровень значимости модели составляет менее 1×10^{-19} при коэффициенте детерминации $R^2=0,87$ и сильной корреляции аргументов ($r=0,94$).

Содержание белка в нейронах зависело от однократного облучения, тогда как фракционированное облучение не оказывало значимого влияния на его содержание. Влияние воздействия облучения на изменение содержания белка в нервных клетках низкое: уровень значимости модели более 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2=0,32$ и средней корреляционной связи ($r=0,56$) между эффектом и рассматриваем фактором (рис.2).

Из графика рис. 2 видно, что фракционированное воздействие имеет большее влияние на изменение содержания РНК в цитоплазме и ДНК в ядрах нейронов, а однократное облучение имеет большее влияние на размер ядер. Если принимать уровень значимости, отличный от 0,05, равный 0,3, то однократное воздействие также имеет большее влияние на изменение содержания белка, чем фракционированное. Уровень значимости остальных показателей (РНК ядрышка, размер цитоплазмы) превышает значение 0,05 и даже 0,3, поэтому их сравнение будет статистически недостоверным.

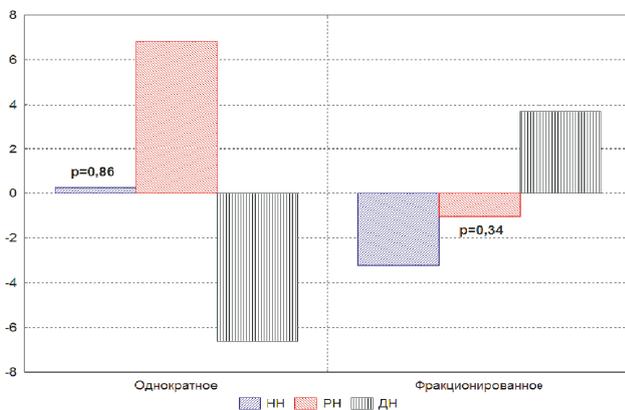


Рис. 1. Оценка влияния режима облучения на типы клеток слоя V (большие пирамидные нейроны) лобной коры через сутки после воздействия
 Fig. 1. Evaluation of the effect of the irradiation regime on the cell types of layer V (large pyramidal neurons) of the frontal cortex one day after exposure

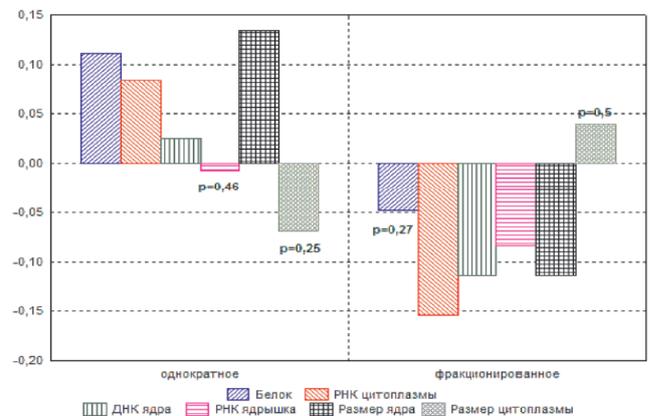


Рис. 2. Оценка влияния режима облучения на различные нейроморфологические показатели через сутки пострadiационного периода
 Fig. 2. Assessment of the effect of the irradiation regime on various neuromorphological parameters in a day after the post-radiation period

Таблица 3

Зависимость количества деструктивных нейронов от режима облучения
Dependence of the number of destructive neurons on the irradiation regime

Фактор	Коэффициент <i>B</i>	Критерий Стьюдента <i>t</i>	Уровень значимости <i>p</i>	β^2
Константа	18,6	45,7	$<1 \cdot 10^{-19}$	
Однократное облучение	3,47	6,03	0,000023	0,94
Фракционированное облучение	-0,76	-1,32	0,20	-0,20

Таблица 4

Оценка влияния смены режима облучения на деструктивные нейроны
Assessment of the effect of changing the irradiation regime on destructive neurons

Параметр	Коэффициент корреляции <i>r</i>	Коэффициент детерминации R^2	Сумма квадратов отклонений <i>SS</i>	Степени свободы <i>df</i>	Средние квадраты отклонений <i>MS</i>	<i>F</i> -статистика	Коэффициент достоверности <i>p</i>
Модель	0,85	0,73	119,5	2	59,7	20,1	0,00006
Остаток			44,6	15	2,97		
Корректировка		0,69					

Из табл. 3 следует, что через 18 мес пострадиационного периода количество нейронов с необратимыми изменениями достоверно зависело от однократного облучения ($p < 0,05$), причем однократное воздействие оказывает более сильное влияние на изменение данного типа клеток (в 4,4 раза) по сравнению с фракционированным. Влияние воздействия облучения на изменение нейронов с альтерацией высокое: уровень значимости модели составляет менее 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,73$ и сильной корреляции аргументов $r = 0,85$ (табл. 4).

Количество нормохромных нервных клеток достоверно зависело от всех режимов облучения, но однократное воздействие имело более сильное влияние на изменение данного типа клеток (в 1,6 раза) по сравнению с фракционированным. Влияние воздействия облучения на изменение показателя нормохромных нейронов высокое: уровень значимости модели составляет менее 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,83$ и сильной корреляции аргументов $r = 0,91$.

Количество нейронов с функциональными изменениями достоверно зависело от фракционированного облучения, тогда как при однократном облучении изменения были статистически не значимыми. Фракционированное облучение оказывало более сильное влияние на изменение данного типа клеток по сравнению с однократным облучением. Влияние воздействия облучения на показатель среднее: уровень значимости модели составляет

менее 0,05 при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,63$ и сильной корреляции аргументов $r = 0,80$. Визуальная оценка влияния режимов облучения на рассматриваемые типы нейронов представлена на рис. 3. Из графика следует, что однократное облучение имеет большее влияние на изменение количества нормохромных нейронов, увеличивая их количество. На изменение функциональной активности нейронов также большее влияние оказывает однократное воздействие, уменьшая их количество. На изменение динамики деструктивных нейронов большее влияние оказывает фракционированное облучение, увеличивая их количество.

Из всех сравниваемых типов клеток наиболее значимым является сравнение нейронов с необратимыми (деструктивными) изменениями, а нейроны с функциональными изменениями (нормо-, гипо- и гиперхромные) являются вариантами нормы и свидетельствуют о их функциональном состоянии (возбуждение, покой или торможение), которое может быстро изменяться.

Площадь цитоплазмы нейронов зависела от однократного облучения, но если рассматривать уровень значимости 0,3, то рассматриваемый показатель достоверно зависел от всех режимов облучения. Влияние воздействия облучения на изменение площади цитоплазмы среднее: уровень значимости модели составляет менее 0,01 при коэффициенте детерминации менее $R^2 = 0,47$ и средней корреляции аргументов $r = 0,68$ (рис. 4). При этом содержание РНК в цитоплазме нейронов достоверно

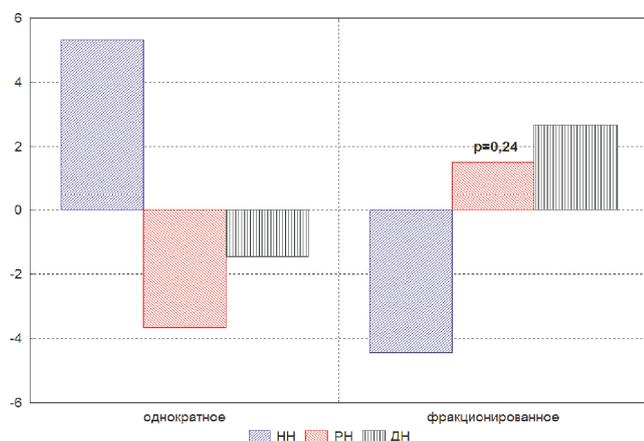


Рис. 3. Оценка влияния режима облучения на типы нервных клеток слоя V лобной коры (большие пирамидные нейроны) через 18 мес пострадиационного периода
Fig. 3. Evaluation of the effect of the irradiation regime on the types of nerve cells in the layer V of the frontal cortex (large pyramidal neurons) after 18 months post-radiation period

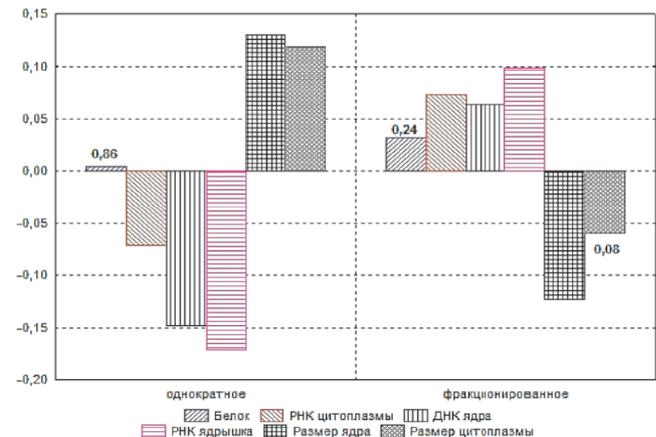


Рис. 4. Оценка влияния режима облучения на различные нейроморфологические показатели лобной коры через 18 мес пострадиационного периода
Fig. 4. Evaluation of the effect of the irradiation regime on various neuro-morphological parameters of the frontal cortex after 18 months post-radiation period

зависело от всех режимов облучения. Оба вида облучения имеют примерно равное влияние на динамику изменения содержания цитоплазматической РНК. Влияние воздействия облучения на изменение содержания РНК в цитоплазме среднее: уровень значимости модели составляет менее 0,001 при коэффициенте детерминации $R^2=0,69$ и сильной корреляции аргументов $r=0,83$. Визуальная оценка влияния режимов облучения на рассматриваемые показатели представлена на рис. 4.

Размер ядер нейронов достоверно зависел от всех рассматриваемых режимов облучения. Оба воздействия имели примерно одинаковое (коэффициент B равен 0,13 и $-0,12$), но противоположное влияние на изменение размера ядер. Влияние воздействия облучения на изменение размера ядер среднее: уровень значимости модели составляет менее 0,01 при коэффициенте детерминации $R^2=0,48$ и корреляции аргументов $r=0,69$ (рис. 4). При этом показатель содержания ядерной ДНК достоверно зависел от всех режимов облучения, но большее влияние на его изменение оказывало однократное облучение по сравнению с фракционированным. Влияние воздействия облучения на изменение содержания ядерной ДНК довольно высокое: уровень значимости модели составляет менее 0,00001 при коэффициенте детерминации $R^2=0,81$ и сильной корреляции аргументов $r=0,90$.

Содержание белка в нейронах достоверно зависело от фракционированного облучения, тогда как однократное не оказывало значимого влияния на его содержание. Влияние воздействия облучения на динамику содержания белка в нейронах низкое: значимость модели более 0,3 при коэффициенте детерминации $R^2=0,14$ и корреляции аргументов $r=0,37$ (рис. 4).

Содержание РНК в ядрышках зависело от всех режимов облучения, но большее влияние на содержание ядрышковой РНК оказывало однократное воздействие по сравнению с фракционированным. Эффект воздействия фактора облучения на изменение содержания РНК в ядрышках нейронов довольно высок: уровень значимости модели составляет менее 1×10^{-19} при коэффициенте детерминации $R^2=0,92$ и корреляции аргументов $r=0,96$.

Из графика (рис. 4) видно, что в отдаленные сроки пострадиационного периода однократное облучение имеет большее влияние на изменения содержания ДНК в ядрах, РНК в ядрышках и площади цитоплазмы (при уровне значимости менее 0,08). А фракционированное облучение имеет либо меньшее влияние на рассматриваемые показатели, либо примерно равное влияние по сравнению с однократным. Уровень значимости таких показателей, как содержание белка в нейронах и площадь цитоплазмы, превышает значение 0,05, поэтому сравнение этих параметров не будет статистически достоверным.

Для сравнения влияния режима облучения на морфофункциональное состояние нейронов теменной коры животные подвергались однократному или фракционированному облучению в суммарных дозах 10, 20 и 100 сГр, и в пострадиационном периоде (1 сут, 6, 12 и 18 мес) подсчитывали процент нейронов каждого типа от всей нейронной популяции. График средних значений типов нейронов при различных режимах облучения представлен на рис. 5.

Из графика следует, что в пострадиационном периоде в теменной коре больших полушарий головного мозга независимо от режима облучения преобладают нормохромные нейроны. Другие рассматриваемые типы нервных клеток также сравнимы между собой при различных режимах облучения. Несколько отличаются от других нейроны, находящиеся в состоянии повышенной функциональной активности (гипохромные). Это может сви-

детельствовать о большей их активности при однократном облучении, чем при фракционированном. Остальные же типы нервных клеток имеют примерно равные средние значения показателей. Таким образом, облучение при исследуемых параметрах мало влияло на структурно-функциональную организацию нейронов теменной коры.

В табл. 5 представлены обобщенные данные показателей состояния нейронов теменной коры через 18 мес после общего однократного и фракционированного гамма-облучения в суммарных дозах 0,1; 0,2 и 1,0 Гр по отношению к аналогичным показателям в возрастном контроле.

Из табл. 5 следует, что в отдаленном периоде после облучения большинство нейроморфологических показателей как при однократном, так и фракционированном воздействии соответствуют возрастному контролю, но ряд показателей имел существенные отличия. Среди функционально значимых показателей, не соответствующих контролю, следует отметить увеличение количества нейронов с альтерацией. Однако такие нейроны располагаются на площади среза коры изолированно, не формируют очагов дегенерации и статистически значимо не обедняют нейронную популяцию теменной коры. Кроме того, нервно-клеточный индекс, характеризующий количество клеток на площади, снижен только при дозах облучения 0,1 и 0,2 Гр, а при дозе 1,0 Гр необъяснимо соответствует контролю. Вероятно, изменения этого показателя имеют случайный характер, но при увеличении дозы облучения могут принять более однонаправленный характер. Что касается несоответствия контролю нейронов, находящихся в различном функциональном состоянии (нормохромные, гипохромные и гиперхромные), то они, являясь вариантами функциональной нормы, отражают преходящие процессы возбуждения, торможения и покоя.

Из других функционально значимых показателей следует отметить не соответствующие контролю ядерно-цитоплазматический и ядрышко-ядерный индексы, характеризующие соотношение между собой основных внутриклеточных структур. При этом при однократном воздействии наблюдается тенденция к увеличению, а при фракционированном – к снижению индекса. В обоих случаях это свидетельствует о определенной нестабильности структурно-функциональной организации нервных клеток и напряженности их функционирования, что на фоне воздействия других вредных и опасных факторов может служить фоном для развития патологического процесса в нервной системе.

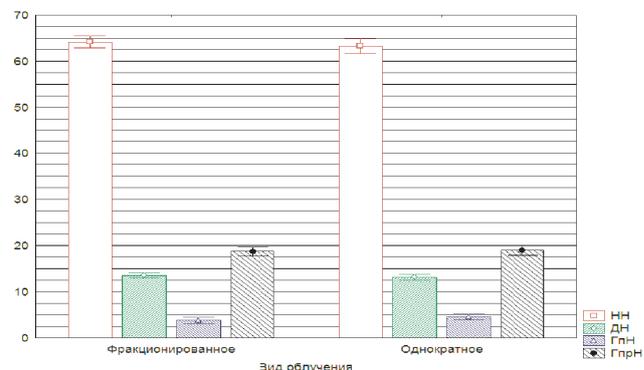


Рис. 5. График средних значений типов нейронов теменной коры при однократном и фракционированном гамма облучении в суммарных дозах 0,1; 0,2 и 1,0 Гр
НН–нормохромные, ДН–деструктивные, ГпН–гипохромные, ГпрН–гиперхромные нейроны

Fig. 5. Graph of the average values of the types of neurons in the parietal cortex with single and fractionated gamma irradiation in total doses of 0.1; 0.2 and 1.0 Gy.

Note: NN–normochromic, DN–destructive, HPN–hypochromic, HPN–hyperchromic neurons

Таблица 5

Нейроморфологические показатели нейронов теменной коры через 18 мес пострadiационного периода
Neuromorphological parameters of neurons in the parietal cortex after 18 months postradiation period

Показатель	Однократное облучение		Фракционированное облучение	
	соответствует контролю	не соответствует контролю	соответствует контролю	не соответствует контролю
Количество НН		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↓		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↓
Количество ГпрН		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↑	0,1; 0,2 Гр	100 сГр ↑
Количество ГпН	0,2 Гр	0,1; 1,0 Гр ↑	0,1; 0,2; 1,0 Гр	
Количество ПмН		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↑		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↑
Количество КТ		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↑		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↑
НКИ		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↓	1,0 Гр	0,1; 0,2 Гр ↓
Площадь нейрона	0,1; 0,2 Гр	100 сГр ↓	0,1; 0,2; 1,0 Гр	
Общий белок	0,1; 0,2; 1,0 Гр		1,0 Гр	0,1; 0,2 Гр ↓
Площ. цитоплазмы	0,1; 0,2 Гр	1,0 Гр ↓	0,1; 0,2 Гр	1,0 Гр ↓
РНК цитоплазмы	0,1; 0,2; 1,0 Гр		0,1; 0,2; 1,0 Гр	
Площадь ядра	0,1; 0,2 Гр	1,0 Гр ↓	0,1 Гр	0,2; 1,0 Гр ↑
ДНК ядра	0,1; 0,2; 1,0 Гр		0,1; 0,2; 1,0 Гр	
Площ. ядрышка	0,2; 1,0 Гр	0,2 Гр ↑		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↓
РНК ядрышка	0,1; 0,2; 1,0 Гр		0,1; 0,2; 1,0 Гр	
ЯЦИ	0,1 Гр	0,2; 1,0 Гр ↑		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↓
яЯИ	0,2 Гр	0,1; 1,0 Гр ↑		0,1; 0,2; 1,0 Гр ↓
ЛДГ	0,1; 0,2; 1,0 Гр		0,1; 0,2; 1,0 Гр	
СДГ	0,1; 0,2; 1,0 Гр		0,1; 0,2; 1,0 Гр	
Г-6-ФДГ	0,1; 0,2; 1,0 Гр		0,1; 0,2; 1,0 Гр	

Примечание: НКИ – нервно-клеточный индекс; НН – нормохромные нейроны; ГпН – гипохромные нейроны; ГпрН – гиперхромные нейроны; ПмН – пикноморфные нейроны; КТ – клеточные тени; ЯЦИ – ядерно-цитоплазматический индекс; яЯИ – ядрышко-ядерный индекс; ↑ – выше контроля; ↓ – ниже контроля.

Note: NCI – neurocellular index; NN – normochromic neurons; HPN – hypochromic neurons; HPRN – hyperchromic neurons; PMN – pyknomorphic neurons; CT – cell shadows; NACI – nuclear-cytoplasmic index; NNR – nucleolus-nuclear index; ↑ – above control; ↓ – below control.

Закключение

Проведенные нами ранее исследования крыс, подвергнутых ложному облучению, показали, что возрастная перестройка нейронов головного мозга заключается в изменении соотношения функциональных типов нейронов, изменении их размеров, цитоплазмы, ядра и ядрышка, в увеличении количества деструктивно измененных нервных клеток, а также волнообразных изменениях содержания в нейронах белка и нуклеиновых кислот [5, 10, 14, 15]. Структурно-функциональные изменения нейронов на различных возрастных этапах постнатального онтогенеза необходимо учитывать при оценке радиационно-индуцированных эффектов в головном мозге и сопоставлять результаты исследования облученных и контрольных животных по равнозначным временным параметрам.

Данное исследование показало, что у животных, облученных как однократно, так и фракционировано в одних и тех же суммарных дозах, на протяжении всего пострadiационного периода преобладают нейроны, находя-

щиеся в состоянии покоя (нормохромные), когда процессы возбуждения и торможения уравновешены. Некоторое увеличение количества деструктивных нейронов при всех режимах облучения не приводит к статистически значимому снижению количества нервных клеток в коре головного мозга. При этом существенных различий в зависимости от режима облучения не установлено. Динамика изменений размеров структур нейронов (цитоплазма, ядро, ядрышко) и содержания в них нуклеиновых кислот при радиационных воздействиях колеблется вокруг нормы как правило в пределах 10–20 % и скорее имеет характер случайных флуктуаций.

Однако в ряде случаев изменения содержания нуклеиновых кислот и белка являются пограничными, когда это уже не норма, но еще и не патология [10, 15]. Вероятно, что при увеличении дозы или мощности дозы облучения, а также на фоне других вредных и опасных факторов изменения уровня нуклеиновых кислот и белка приобретут более однонаправленный характер.

Changes in the Cortex Neurons in Single and Fractional Gamma Radiation

I.B. Ushakov, V.P. Fyodorov

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

Contact person: Vladimir Petrovich Fyodorov: fedor.vp@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: Comparative assessment of radiation-induced changes in neurons of the cerebral cortex after a single and fractionated exposure to ionizing radiation in doses of 0.1 – 1.0 Gy.

Material and methods: The study was carried out in compliance with the rules of bioethics on 180 white outbred male rats at the age of 4 months. by the beginning of the experiment, exposed to a single or fractionated exposure to γ -quanta of ^{60}Co in total doses of 0.1; 0.2; 0.5 and 1.0 Gy. Neuromorphological and histochemical methods were used to assess morphometric and tinctorial parameters of nerve cells, as well as changes in the content of protein and nucleic acids in neurons in the early and late periods of the post-radiation period. Using one-way analysis of variance, a comparative assessment of neuromorphological indicators under various modes of radiation exposure is given.

Results: In the control and irradiated animals throughout their life, undulating changes in the indicators of the state of the neurons of the brain occur with a gradual decrease by the end of the experiment. Despite a number of features of the dynamics of neuromorphological parameters, these irradiation regimes do not cause functionally significant changes in the neurons of the cortex. However, in some periods of the post-radiation period, the changes under the studied irradiation regimes were multidirectional and did not always correspond to age

control. Significant differences in the response of neurons to these modes of radiation exposure in the sensory and motor areas of the cerebral cortex have not been established.

Conclusion: No functionally significant radiation-induced changes in neurons were found either with single or fractionated irradiation. At the same time, different modes of irradiation in general caused the same type of changes in neurons. However, in some periods of observation, changes in neuromorphological parameters under the studied irradiation regimes were not unidirectional and differed from age control, which indicates a possible risk of disturbances in the functioning of the nervous system against the background of other harmful and dangerous factors.

Keywords: *low doses of radiation, irradiation, brain, changes in neurons, rats*

For citation: Ushakov IB, Fyodorov VP. Changes in the Cortex Neurons in Single and Fractional Gamma Radiation. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(4):18-24.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-18-24

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гуськова А.К. Радиация и мозг человека. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2001. Т. 46, № 5. С. 47-55.
- 2 Легеца В.И., Резник В.М., Пимбурский В.Ф. К вопросу об особенностях многолетней динамики уровней болезней системы кровообращения у военнослужащих-ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС. // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2016. Т.1, С. 34-40.
- 3 Никифоров А.М., Алексанин С.С., Чугунова Л.Н. Особенности психологического статуса и медико-психологическая реабилитация участников аварийно-восстановительных работ на ЧАЭС. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2002. Т. 47, № 5. С. 43-50.
- 4 Торубаров Ф.С., Кулешова М.В., Лукьянова С.Н., Зверева З.В. Спектрально-корреляционный анализ ЭЭГ у ликвидаторов аварии на ЧАЭС с неврологическими нарушениями. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, №. 3. С. 40-45.
- 5 Ушаков И.Б., Федоров В.П., Гундарова О.П. Нейроморфологические корреляты малых радиационных воздействий. // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2016. № 1. С. 71-78.
- 6 Шамрей В.К., Чистякова Е.И., Матышина Е.Н. и др. Радиационная психосоматическая болезнь у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС. // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2016. № 1. С. 21-33.
- 7 Федоров В.П., Ушаков И.Б., Федоров Н.В. Церебральные эффекты у ликвидаторов Чернобыльской аварии. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 390 с.
- 8 Алексанин С.С. Патогенетические закономерности формирования соматической патологии после радиационных аварий в отдаленном периоде // Вестн. Рос. Воен.-Мед. Акад. 2008. Т. 23, № 3. С. 10-13.
- 9 Бузунов В.А. Основные итоги и задачи эпидемиологических исследований медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС (результаты 4-лети наблюдения) // Вестн. АМН СССР. 1991. №. 11. С. 36-39.
- 10 Ушаков И.Б., Федоров В.П. Малые радиационные воздействия и мозг. Воронеж: Научная книга, 2015, 536 с.
- 11 Ушаков И.Б., Федоров В.П. Нейроморфологические корреляты пролонгированных радиационных воздействий. // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2018. №. 3. С. 86-97.
- 12 Ушаков И.Б., Федоров В.П., Сгибнева Н.В. Нейроморфологические корреляты мощности дозы радиационного воздействия. // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2019. №. 4. С. 59-69.
- 13 Сгибнева Н.В., Федоров В.П. Морфофункциональное состояние сенсорной коры после малых радиационных воздействий. Воронеж: Науч. книга, 2013, 256 с.
- 14 Сгибнева Н.В., Федоров В.П., Гундарова О.П., Маслов Н.В. Пластичность нейронов сенсорной коры в условиях повышенного радиационного фона. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2017. Т. 61. № 1. С. 20-26.
- 15 Федоров В.П., Петров А.В., Степанян Н.А. Экологическая нейроморфология. Классификация типовых форм морфологической изменчивости ЦНС при действии антропогенных факторов. // Журнал теоретической и практической медицины. 2003. № 1. С. 62-66.

REFERENCES

- 1 Guskova AK Radiation and the Human Brain. Honey. *Radiology and Radiation Safety*. 2001. 46(5): 47-55. (In Russian).
- 2 Legeza VI, Reznik VM, Pimburskiy VF. On the Peculiarities of the Long-term Dynamics of the Levels of Diseases of the Circulatory System in Servicemen who Liquidate the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Med.-biol. and Social Psychology. Probl. Safety in Emergency Situations*. 2016. V.1. P.34-40. (In Russian).
- 3 Nikiforov AM, Aleksanin SS, Chugunova LN Features of the Psychological Status and Medical and Psychological Rehabilitation of Participants in Emergency Recovery Work at the Chernobyl NPP. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2002.47(5): 43-50. (In Russian).
- 4 Torubarov FS, Kuleshova MV, Lukyanova SN, Zvereva ZV Spectral Correlation Analysis of EEG in Liquidators of the Chernobyl Accident with Neurological Disorders. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019. 64(3): 40-45. (In Russian).
- 5 Ushakov IB, Fedorov VP, Gundarova OP Neuromorphological Correlates of Minor Radiation Effects. *Med.-biol. and Social Psychology. Probl. safety in Emergency Situations*. 2016. 1: 71-78. (In Russian).
- 6 Shamrey VK, Chistyakova EI, Matyshina EN et al. Radiation Psychosomatic Illness Among Liquidators of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant. *Med.-biol. and Social Psychology. Probl. Safety in Emergency Situations*. 2016. 1: 21-33. (In Russian).
- 7 Fedorov VP, Ushakov IB, Fedorov NV Cerebral Effects in the Liquidators of the Chernobyl Accident. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, Moscow, Publ, 2016. 390 c. (In Russian).
- 8 Aleksanin SS Pathogenetic Laws of the Formation of Somatic Pathology After Radiation Accidents in the Remote Period. *Bull. Grew up. Military Medical Acad*. 2008. 23(3): 10-13. (In Russian).
- 9 Buzunov VA The Main Results and Tasks of Epidemiological Studies of the Medical Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant (Results of 4-year Observations). *Vestn. Academy of Medical Sciences of the USSR*. 1991. 11: 36-39. (In Russian).
- 10 Ushakov IB, Fyodorov VP. Low Radiation Impacts and Brain. *Voronezh: Nauchnayakniga*. Moscow, Publ, 2015. 536 P. (In Russian).
- 11 Ushakov IB, Fedorov VP Neuromorphological Correlates of Prolonged Radiation Exposure. *Med.-biol. and social Psychology. Probl. Safety in Emergency Situations*. 2018. 3: 86-97. (In Russian).
- 12 Ushakov IB, Fyodorov VP, Sgibneva NV. The neuromorphological Correlation of Radiation Dose Rate. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2019. 4: 59-69. (In Russian).
- 13 Radiation Effects. *Voronezh: Scientific. book*. Moscow, Publ, 2013. 256. (In Russian).
- 14 Sgibneva NV, Fyodorov VP, Gundarova OP, Maslov NV. Plasticity of Sensorimotor Cortex Neurons in Conditions of High Radiation Background. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2017. 61(1): 20-26. (In Russian).
- 15 Fyodorov VP, Petrov AV, Stepanyan NA. Ecological Geomorphology. Classification of Typical Forms of Morphological Variability of the Central Nervous System Under the Action of Anthropogenic Factors. *Journal of Theoretical and Practical Medicine*. 2003. 1: 62-66. (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.03.2021. **Принята к публикации:** 21.04.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.03.2021. **Accepted for publication:** 21.04.2021.

Н.К. Шандала, И.П. Коренков, А.М. Лягинская, С.М. Киселев, Ю.Е. Квачева,
Е.Г. Метляев, О.В. Паринов, А.В. Титов, М.П. Семенова, Ю.Н. Зозуль, Н.В. Зиновьева

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ: ОПЫТ И ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

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

Контактное лицо: Наталия Константиновна Шандала: shandala-fmbc@bk.ru

РЕФЕРАТ

Описаны основные с результаты деятельности отдела радиационной безопасности населения ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, начиная с основания Центра и по настоящее время.

Приоритетом деятельности, созданного в 1946 г. Института биофизики СССР, являлась разработка вопросов обеспечения радиационной безопасности персонала и населения при реализации атомного проекта. Базовое научное направление «Радиационная безопасность населения» сформировалось в самостоятельную единицу к 1955 г. Сегодня отдел радиационной безопасности населения ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России является научно-практическим и методическим подразделением по вопросам обеспечения радиационной и химической безопасности с оценкой здоровья населения, проживающего в районах объектов атомной отрасли России. Основные приоритетные направления деятельности:

- 1) радиационно-гигиенический мониторинг и гигиеническое нормирование;
- 2) мониторинг состояния здоровья населения;
- 3) экспертная деятельность по медицинской ядерной криминалистике.

Научные исследования в области обеспечения безопасности и совершенствования государственного санэпиднадзора охватывают население, проживающее в районах предприятий, обслуживаемых ФМБА России, в том числе объекты атомного судостроения, ядерного и уранового наследия России и Центральной Азии, атомные станции, космодромы и др.

Подводя итог 75-летней деятельности в области обеспечения радиационной безопасности населения, в целом можно констатировать следующее. За прошедшие годы выполнен комплекс гигиенических работ на объектах атомной отрасли, разработана методология проведения радиационно-гигиенического мониторинга совместно с мониторингом здоровья населения, разработаны и внедрены в практическую деятельность методики определения техногенных и природных радионуклидов в продуктах питания и объектах окружающей среды. Реализация наших новых научных разработок и дальнейшие перспективы будут направлены на уменьшение груза медицинских проблем, связанных с эксплуатацией различных радиационно-опасных объектов и обращением с наследием; повышение уровня и качества жизни соответствующих контингентов населения России, а также создание необходимых условий для успешного развития атомной энергетики в Российской Федерации.

Ключевые слова: население, радиационная безопасность, радиационно-гигиенический мониторинг, гигиеническое нормирование, авария на Чернобыльской АЭС, защитные меры

Для цитирования: Шандала Н.К., Коренков И.П., Лягинская А.М., Киселев С.М., Квачева Ю.Е., Метляев Е.Г., Паринов О.В., Титов А.В., Семенова М.П., Зозуль Ю.Н., Зиновьева Н.В. Радиационная безопасность населения: опыт и пути совершенствования // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.25–32.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-25-32

Исторические аспекты

Исторические корни направления «радиационная безопасность и радиационная защита населения» напрямую связаны с развитием атомного проекта в СССР, одной из важнейших задач которого стала организация санитарно-гигиенического обеспечения создаваемой атомной и оборонной промышленности. Так, с конца 40-х – начала 50-х годов XX века впервые в нашей стране были организованы радиационно-гигиенические исследования по обоснованию безопасности для работников атомной промышленности и населения, проживающего в районах функционирования радиационно-опасных объектов.

История отдела радиационной безопасности населения ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России как самостоятельного научного подразделения, началась в 1955 г., когда был осуществлен переход на работу в Институт биофизики МЗ СССР большого отдела из Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР под руководством академика А.А. Летавета. В результате такого слияния была образована первая лаборатория радиационной коммунальной гигиены под руководством д.м.н., проф. А.Н. Маррея, главнейшей задачей которой являлась разработка методологии санитарного надзора за радиационной обстановкой в районах размещения предприятий атомной энергетики и промышленности. Пионерскими исследованиями в этот период стали радиационно-гигиенические работы, связанные с проведением испытательных ядерных взрывов на атомных полигонах СССР, при пуске атомных ледоколов, атомных

подводных лодок и работы по снятию «нулевого фона» практически на всех первых строящихся АЭС в СССР. В дальнейшем, на базе первой лаборатории сформировались новые научные подразделения, занимающиеся вопросами оценки радиационной обстановки вокруг предприятий и на загрязненных территориях (руководитель к.м.н. А.С. Зыкова), изучающие последствия воздействия на окружающую среду атмосферных выпадений радиоактивных продуктов ядерных взрывов и проводившие оценки доз облучения населения практически за счёт всех источников ионизирующего излучения (руководитель д.м.н., проф. В.А. Книжников). В те годы отдел радиационной безопасности населения был ведущим в стране по вопросам сбора информации о радиологическом состоянии окружающей среды от всех региональных и областных санитарно-эпидемиологических станций Советского Союза. Кроме того, велось активное научно-методическое сотрудничество с Международным референсным центром ВОЗ, ведущим контроль радиационного состояния окружающей среды по всему миру.

В те же 50-е годы в отдел радиационной безопасности населения влились лаборатория патологической морфологии под руководством академика АМН СССР Н.А. Краевского и лаборатории, изучавшие радиотоксикологию инкорпорированных радионуклидов, а также проводившие экспериментальные и теоретические исследования влияния радиации как на функцию воспроизводства, так и на здоровье населения в целом.

Опубликованные научные и методические труды периода становления радиационной безопасности населения являются и по сей день настольными книгами ученых в области радиационной безопасности и радиационной патологии [1–7].

Методология решения проблемы обеспечения радиационной безопасности и защиты населения, проживающего в районах радиационно-опасных объектов, начала формироваться на этапе становления атомной отрасли, когда возникла необходимость иметь оперативные сведения о динамике радиационной обстановки как в отдельных пунктах (регионах) так и в масштабах всей страны (рис. 1). Решение этой задачи на протяжении почти четырех десятилетий обеспечивалось путем непрерывного накопления сведений об основных параметрах радиоактивности на местах, в практических учреждениях (СЭС). В этот период времени техногенное облучение населения было связано, в основном, с глобальными выпадениями радионуклидов.

Контроль и мониторинг радиационной обстановки после Чернобыльской аварии, с 1986 г., строился практически на тех же позициях и теми же силами, что и глобальный, когда кроме исследования радиоактивности среды обитания человека, серьезной задачей стало определение доз облучения. Таким образом, к концу XX столетия существовала хорошо налаженная система текущего контроля за выполнением отечественного санитарного законодательства в области радиационной коммунальной гигиены и исследовательского контроля (мониторинга), осуществляемых органами Государственного санитарного надзора и научными центрами. Сложившаяся система позволяла с достаточной степенью точности выявлять закономерности формирования радиационной обстановки, обусловленной как глобальными, так и аварийными выпадениями.

С 1998 г. в Российской Федерации проводится радиационно-гигиеническая паспортизация организаций и территорий, результаты которой отражаются в десяти разделах радиационно-гигиенического паспорта, содер-

жащего сведения, характеризующие радиационную обстановку на территории каждого субъекта Российской Федерации. Исходной единицей наблюдения является уже не населенный пункт, как ранее при изучении глобальных и аварийных выпадений, а административный район. После 2000 г. основной технологией работы органов государственного санитарно-эпидемиологического надзора стал социально-гигиенический мониторинг, когда стало возможным и необходимым увязывать гигиенические исследования с оценкой состояния здоровья населения.

Для определения характера и степени воздействия на здоровье населения и окружающую среду радиационно-опасных объектов при их длительной эксплуатации, а также в случае реабилитации территории таких объектов или при выводе их из эксплуатации, необходимо получение возможно более полной структурированной радиационно-гигиенической информации, т.е. проведение радиационно-гигиенического мониторинга (РГМ), понятие которого было введено в практику обеспечения радиационной безопасности в 2000 г. [8].

Современная методология РГМ, используемая в исследованиях по обеспечению радиационной безопасности населения, охватывает объекты и территории всех звеньев ядерно-топливного цикла России (рис. 2). При этом РГМ включает в себя оценку окружающей среды и оценку здоровья населения [9–11]. Для оценки радиоактивности окружающей среды решаются задачи получения в динамике достаточной и достоверной информации об уровнях ионизирующего излучения на территориях и о содержании радионуклидов в различных объектах окружающей среды, а также в местных пищевых продуктах и питьевой воде. Используются методы: радиационно-гигиенический в натуральных исследованиях, радиометрический, спектрометрический, радиохимический, санитарно-эпидемиологический надзор, включая разработку регулирующих документов системы санитарно-эпидемиологического надзора и нормирования. В Испытательном лабораторном центре «Гигиенический мониторинг», функционирующем на базе отдела радиационной безопасности населе-

Основоположники



Бурназян А.И.



Летавет А.А.



Краевский Н.А.



Марей А.Н.



Зыкова А.С.



Книжников В.А.



Исторические вехи

1946

Атомный проект

1955

Мониторинг вокруг радиационно-опасных объектов

1960

Мониторинг глобальных выпадений

1986

Чернобыльский мониторинг

1998

Радиационно-гигиеническая паспортизация

2000

Комплексный мониторинг окружающей среды и здоровья населения

2002

Социально-гигиенический мониторинг

Рис. 1. Становление системы обеспечения радиационной безопасности населения
Fig. 1. Formation of the system for ensuring the radiation safety of the population



Рис. 2. Современная методология обеспечения радиационной безопасности населения
 Fig. 2. Modern methodology for ensuring radiation safety of the population

ния ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (аттестат аккредитации RA.RU.21BY01 от 17.08.2015 г.), аккредитованы следующие виды работ:

- определение активности различных радионуклидов в объектах окружающей среды (вода, почва, растительность, гидробионты, воздух, атмосферные осадки), продуктах, стройматериалах и др.;
- измерение мощности дозы и амбиентного эквивалента дозы на территориях промплощадок, санитарно-защитной зоны, зоны наблюдения, производственной зоны и жилой застройки.

В 2020 г. Федеральная служба по аккредитации выдала Органу инспекции ФМБЦ им. А.И. Бурназяна аттестат аккредитации № RA.RU.710340, согласно которому подтверждены компетенции в экспертизе по широкому спектру направлений в области санитарно-эпидемиологического благополучия, использования атомной энергии, радиационной безопасности.

Для оценки здоровья населения используются два подхода: эпидемиологический, основанный на оценке состояния здоровья по данным отчетной медицинской статистики; клинический, включающий оценки здоровья по данным углубленных обследований. Медико-демографическая характеристика базируется на показателях рождаемости, младенческой и общей смертности. Заболеваемость используется как количественный и качественный показатель популяционного здоровья. Особое внимание обращается на частоту и динамику заболеваемости злокачественными новообразованиями, а также хроническими соматическими и наследственными болезнями.

На основании полученных результатов, характеризующих состояние окружающей среды и показатели здоровья населения, рекомендуются соответствующие защитные мероприятия. Важным условием в ходе проведения РГМ являются общественные слушания и информирование населения о реально складывающейся ситуации в зонах наблюдения радиационно-опасных объектов и/или на реабилитируемых от радиоактивного загрязнения территориях [12].

Радиационно-гигиеническое нормирование и контроль после аварии на Чернобыльской АЭС

Масштабы аварии и сложность радиационной обстановки потребовали оперативной разработки дополнительных конкретных нормативов и правил для их реализации. Специалистами Института биофизики МЗ СССР (ныне ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России) в кратчайшие сроки было разработано более 30 нормативно-методических документов, устанавливающих конкретные нормативы и правила проведения работ по ликвидации последствий в условиях масштабной радиационной аварии и осложненной радиационной обстановки, после аварии на Чернобыльской АЭС среди первых регулирующих документов были:

- Временное допустимое содержание йода-131 в питьевой воде и продуктах питания (№ 4104-86 от 06.05.1986 г.);
- Временные допустимые уровни содержания радиоактивных веществ в продуктах питания, питьевой воде, лекарственных травах по суммарной бета-активности (№ 129-252 от 30.05.1986 г.);
- Временные санитарные требования безопасности при выполнении работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (№ 32-1771, 12.07.1987 г.).

В острый и в последующие периоды Чернобыльской аварии была разработана и внедрена методология временных допустимых уровней содержания радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде. Так, установленный в первые дни после аварии временный допустимый уровень активности ^{131}I в молоке $3700 \text{ Бк} \times \text{л}^{-1}$, 6 мая 1986 г. был дополнен допустимым уровнем содержания ^{131}I в питьевой воде, молокопродуктах, рыбе, столовой зелени. В дальнейшем [13]:

- разработаны временно допустимые уровни долгоживущих радионуклидов ^{134}Cs , ^{137}Cs и ^{90}Sr ;
- определены дозовые квоты на внутреннее и внешнее облучение населения с учетом радиэкологических особенностей Украинско-Белорусского Полесья, типового рациона питания жителей этих загрязненных регионов;
- определена номенклатура основных пищевых продуктов, подлежащих радиометрическому контролю;

– в последующем разработаны нормативы допустимой удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в более чем 140 видах пищевой продукции, потребляемой населением России, вошедшие в «СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы».

Опыт проведения йодной профилактики при аварии на Чернобыльской АЭС был использован для оптимизации схемы йодной профилактики при авариях на ядерных установках; в связи с этим было разработано новое «Руководство по йодной профилактике в случае возникновения радиационной аварии» [14].

В настоящее время в рамках дальнейшего совершенствования медико-санитарного обеспечения персонала АЭС и населения, проживающего в зоне наблюдения, ФМБА России считает приоритетным проведение комплексного мониторинга состояния окружающей среды и здоровья. Получаемая в ходе наших исследований информация необходима для определения масштабов возможных последствий влияния многолетней эксплуатации атомных объектов на окружающую среду и здоровье населения [15, 16].

Анализ и осмысление опыта преодоления медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС и других аварий, а также дальнейшее совершенствование мероприятий по радиационной безопасности невозможны без тщательного изучения биологических материалов пострадавших людей. В этих целях нашими учеными одними из первых в мире была предложена методология биобанкинга случаев радиационных поражений человека (рис. 3). Изучение указанных материалов с применением современных высокотехнологичных методик молекулярно-генетического анализа позволило нам детально усовершенствовать схемы патогенеза и терапии ведущих клинических синдромов острой лучевой болезни и местных лучевых поражений. На основе полученных уникальных данных разработаны также инновационные ди-

агностические подходы, такие, как диагностика тяжести костномозгового синдрома *in situ* по антигенам стволовых клеток гемопоэза [17].

Радиационная безопасность населения и радиационная коммунальная гигиена сегодня

Исследовательские гигиенические работы нацелены на совершенствование эколого-гигиенических основ радиационной защиты и безопасности населения, проживающего на территориях, обслуживаемых ФМБА России. На протяжении последних лет проводился комплекс радиационно-гигиенических, радиоэкологических исследований с последующей разработкой рекомендаций и оценкой состояния здоровья населения, проживающего вблизи действующих радиационно-опасных объектов и на территориях ядерного и уранового наследия России (рис. 4):

- Дальний Восток – Фокино, пос. Дунай; Камчатка – ЗАТО Виллючинск;
- «30 СРЗ» (Приморье) и «10 СРЗ» (Полярный Мурманской обл.);
- Губа Андреева на Кольском полуострове;
- Пос. Октябрьский в Забайкалье и город Лермонтов Ставропольского края;
- Территории государств Центральной Азии (Киргизия и Таджикистан), подвергшиеся воздействию уранодобывающих производств.

Результаты, достигнутые при проведении комплексного РГМ окружающей среды и состояния здоровья населения, позволяют укрепить основы и принципы решения проблем регулирования радиационной безопасности на территориях и объектах ядерного и уранового наследия Российской Федерации.

В ходе исследования радиационно-гигиенической обстановки на выведенном из эксплуатации ПО «Алмаз» в г. Лермонтове Ставропольского края получена информация о радиоактивном загрязнении всех объектов окружающей среды, источников водоснабжения, местных пи-



Впервые в мировой практике

- **Разработана** методология формирования **банков биологических материалов** прижизненной и постмортальной диагностики острой лучевой болезни
- **Усовершенствованы** **схемы патогенеза** костномозгового, кишечного, орофарингеального, инфекционного, острого респираторного синдромов острой лучевой болезни

Инновационное направление

технологии иммуноморфологической диагностики костномозгового синдрома острой лучевой болезни *in situ* по антигенам клональной дифференцировки **гемопоэтических стволовых клеток**



Рис. 3 – Исследование биологических материалов пострадавших в радиационных авариях
Fig. 3 - Investigation of biological materials of victims of radiation accidents

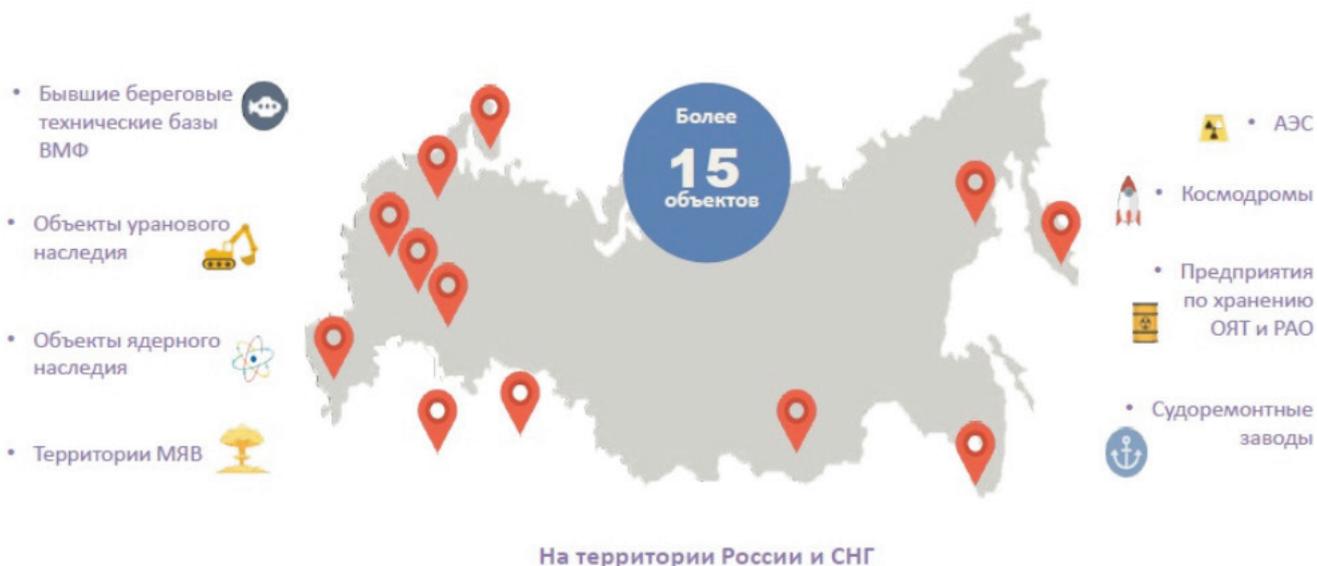


Рис.4. География работ по обеспечению радиационной безопасности населения
 Fig. 4. Geography of work to ensure radiation safety of the population

щевых продуктов. Кроме того, детально изучена ЭРОА радона, оценены дозы облучения населения за счет всех источников ионизирующего излучения. В результате обоснована необходимость проведения реабилитационных работ, особенно в районах многочисленных штолен на горах Кавказского хребта – Бештау и Бык [18].

Проведенные радиоэкологические исследования в районе расположения реабилитируемых территорий и объектов бывших береговых технических баз военно-морского флота РФ (а ныне пунктов временного хранения отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов) на Северо-Западе и Дальнем Востоке России, а также предприятий, осуществляющих утилизацию атомных подводных лодок, позволили оценить воздействие радиационно-опасных объектов на окружающую среду и разработать регулирующие требования в области повышения

экологической безопасности на этих территориях [19, 20].

В рамках сотрудничества с Норвежским Direktoratом радиационной защиты и ядерной безопасности (DSA) в 2020 г. продолжались радиационно-гигиенические исследования для оценки состояния радиационной обстановки и динамики ее изменения на территории расположения ПВХ РАО и ОЯТ СЗЦ «СевРАО» – филиала ФГУП «ФЭО» (отделение губа Андреева) [21], где сегодня идут масштабные работы по вывозу ОЯТ. Оценивая полученные результаты, можно сказать, что на текущий момент работы по выгрузке и вывозу кондиционного ОЯТ не привели к появлению новых очагов загрязнения окружающей среды на территории промплощадки. Распространения существующего загрязнения по территории санитарно-защитной зоны и за ее пределы не выявлено. В период пандемии исследования не прекращались (рис. 5).



Рис.5. Радиационно-гигиенические исследования, проводимые специалистами отдела радиационной безопасности населения в 2020–2021 гг.
 Fig. 5. Radiation-hygienic research carried out by specialists of the Department of Radiation Safety of the Population in 2020–2021.

Продолжается проведение комплексного мониторинга воздействия профессиональных факторов радиационной и нерадиационной природы на состояние здоровья и окружающую среду в районах размещения АЭС. В период 2018–2021 гг. оценено репродуктивное здоровье мужчин – персонала основных цехов Калининской, Курской, Смоленской и ряда других атомных электростанций России [22].

В ходе выполнения НИР «Разработка временных рекомендаций по проведению медицинских осмотров работников производства СНУП-топлива» (2020 г.), изучено состояние здоровья работников экспериментального производства нового СНУП-топлива, показан системный характер реакции организма на опасные факторы производства. Об этом свидетельствует высокий уровень заболеваемости работников и некоторые особенности структуры заболеваемости (высокая частота болезней органов дыхания, глаз, кожи и подкожной клетчатки, а также заболеваний эндокринной системы). Следующий этап работы позволит выявить связь заболеваемости работников с влиянием производственных факторов. Полученные выводы будут основываться не только на данных медицинской статистики, но также будут подкреплены основательными результатами клинических наблюдений.

Противодействие ядерному терроризму

Одними из наиболее актуальных и приоритетных вопросов обеспечения радиационной безопасности являются вопросы противодействия ядерному и радиологическому терроризму [23]. С 2015 г. ФМБА России участвует в работе Глобальной инициативы по борьбе с актами ядерного терроризма (ГИБАЯТ). На уровне экспертов налажено тесное сотрудничество с 88 государствами-партнерами и 6 официальными наблюдателями ГИБАЯТ. Нашими специалистами внесен весомый вклад в разработку практических пособий, руководств и рабочих документов Инициативы. Обобщение многолетнего опыта исследований позволило нам впервые в мире разработать уникальную методологию медико-биологических исследований по ядерной криминалистике, заложившую основы нового научного направления – медицинской ядерной криминалистики [24].

Разработка нормативно-правовых и методических документов

Выполняя функции регулирования радиационной безопасности населения, за последние годы наши специалисты выпустили в свет новые нормативно-методические документы, а также участвовали в разработке ряда международных регулирующих документов. Разработанные документы предназначены для организаций и учреждений ФМБА России и других заинтересованных министерств и ведомств. Они имеют большое практическое значение в нормативно-методическом обеспечении надзорных мероприятий и мониторинга вредных факторов среды обитания человека.

Перспективы

Научное развитие направления «радиационная безопасность населения» учитывает современное развитие ядерной индустрии России и напрямую связано с задачами, поставленными Президентом РФ в Основах государственной политики по обеспечению ядерной и радиационной безопасности.

Актуальной задачей является изучение воздействия факторов производственной среды на состояние здоровья персонала, участвующего в обращении с новыми

видами топлива (СНУП-, МОКС-, РЕМИКС-топливо, топливо для многоцелевого реактора на быстрых нейтронах (МБИР), интерметаллида, карбонитрида). В рамках комплексного развития данного направления планируется реализация исследований, направленных на медико-гигиеническую оценку влияния работ по обращению с новыми перспективными видами топлива на состояние окружающей среды и здоровье населения, проживающего в районах расположения предприятий, задействованных в промышленной наработке новых видов топлива.

В Основах государственной политики констатируется, что в Российской Федерации обеспечивается ядерная и радиационная безопасность не только функционирующих объектов использования атомной энергии, но и объектов ядерного наследия, то есть тех военных и гражданских объектов, которые были созданы до установления современных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности. В связи с этим важным направлением деятельности является совершенствование научных основ отечественной регулирующей базы обеспечения радиационной защиты населения с учетом международных рекомендаций, реализация программ комплексных гигиенических исследований и разработка информационно-аналитических систем для обеспечения деятельности государственного санитарно-эпидемиологического надзора ФМБА России на территориях расположения объектов ядерного наследия.

Наряду с обеспечением защиты населения в процессе эксплуатации объектов атомной отрасли, актуальным направлением является развитие подходов к формированию безопасной среды обитания населения («Территорий здоровья»), когда основной вклад в дозу облучения вносят природные источники. Эта деятельность по планированию и реализации мероприятий по оценке содержания природных источников облучения на объектах социально значимой инфраструктуры на территориях, обслуживаемых ФМБА России, ведется и планируется в дальнейшем.

В наши стратегические планы входит постепенный переход к профилактическому направлению в отношении выявления социально-значимых заболеваний. В современной медицинской науке всё большую роль играют омиксные технологии (OMICs technologies), объединяющие исследования генома, транскриптома, протеома и метаболома.

Перспективными представляются исследования в области метаболомики – качественного и количественного профилирования низкомолекулярных продуктов обмена веществ на основе масс-спектрометрии метаболитов в биологических образцах. В связи с этим должна развиваться биодозиметрия нового поколения (радиационная метаболомика) – выполняемые в сжатые сроки малоинвазивные исследования по выявлению ранних и отдаленных биомаркеров и дозовых параметров радиационного воздействия, позволяющие охватить значительные контингенты населения, например, при возможных аварийных ситуациях.

В связи с развитием ядерной медицины и медицинской радиологии в России, перспективным направлением является разработка специальных гигиенических требований по обеспечению радиационной безопасности загорания (кремации) умерших лиц, прижизненно подвергшихся внутритканевой лучевой терапии (брахитерапии) методом имплантации закрытых радионуклидных источников, включая методы проведения аутопсийных исследований, технологии извлечения источников и дальнейший регуляторный контроль.

Заключение

Подводя итог 75-летней деятельности в области обеспечения радиационной безопасности населения, в целом можно констатировать, что за прошедшие годы:

- выполнен комплекс гигиенических работ на самых разнообразных объектах: уранодобывающих и перерабатывающих предприятиях, в районах расположения атомных станций, предприятиях по хранению и обращению с отработанным ядерным топливом и радиоактивными отходами, в населенных пунктах на территориях, обслуживаемых ФМБА России;
- разработана уникальная методология проведения радиационно-гигиенического мониторинга совместно с мониторингом здоровья населения, позволяющая достоверно

выявлять тенденции в динамике состояния здоровья и своевременно принимать управленческие решения;

- разработаны и внедрены в практическую деятельность методики определения содержания техногенных и природных радионуклидов в продуктах питания и объектах окружающей среды.

Реализация наших новых научных разработок и дальнейшие перспективы будут направлены на уменьшение груза медицинских проблем, связанных с эксплуатацией различных радиационно-опасных объектов и обращением с ядерным наследием, на повышение уровня и качества жизни соответствующих контингентов населения России, а также на создание необходимых условий для успешного развития атомной энергетики в Российской Федерации.

Radiation Safety of Population: Experience and Ways of Improvement

N.K. Shandala, I.P. Korenkov, A.M. Lyaginskaya, S.M. Kiselev, Yu.E. Kvacheva, E.G. Metlyaev, O.V. Parinov, A.V. Titov, M.P. Semenova, Yu.N. Zozul, N.V. Zinovieva

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

Contact person: Natalia Kostantinovna Shandala: shandala-fmbc@bk.ru

ABSTRACT

The article describes the results of the activities of the department of radiation safety of the population of the A.I. Burnasyan FMBC of FMBA over the period from the foundation of the Center to the present.

Results: The priority in the activity of the Institute of Biophysics, created in 1946, was the development of issues of radiation safety of the personnel and the public during the implementation of a nuclear project. The basic scientific direction «radiation safety of the population» was formed as an independent unit by 1955. Today, the department of radiation safety of the population of FMBC is a scientific, practical and methodological unit which deals with radiation and chemical safety including an assessment of health of the population living in the vicinity of Russian nuclear facilities. The main priorities of activity include: radiation-health physics monitoring and health physics regulation; monitoring the health of the population; expert activity in medical nuclear forensics. Scientific research in the field of protection and safety and improving the state health and epidemiological supervision covers the population living in the areas of enterprises under FMBA's of Russia service, including nuclear shipbuilding facilities, nuclear and uranium legacy of Russia and Central Asia, nuclear power plants, cosmódromes, etc.

Conclusion: In general, summarizing the 75-year activity in the field of the public radiation protection and safety, the following can be stated. Over the past years, a set of health physics works has been carried out at nuclear facilities, a methodology for radiation and health physics monitoring has been developed in conjunction with monitoring the public health, methods for determining man-made and natural radionuclides in food and environmental media have been developed and introduced into practice. The implementation of our new scientific developments and future prospects will be aimed at reducing the burden of medical problems associated with the operation of various radiation hazardous facilities and legacy management; raising the level and quality of life of the relevant contingents of the Russian population; as well as the creation of the necessary conditions for the successful development of nuclear energy in the Russian Federation.

Key words: *population, radiation safety, health physics monitoring, health physics regulation, Chernobyl accident, protective measures*

For citation: Shandala NK, Korenkov IP, Lyaginskaya AM, Kiselev SM, Kvacheva YuE, Metlyaev EG, Parinov OV, Titov AV, Semenova MP, Zozul YuN, Zinovieva NV. Radiation Safety of Population: Experience and Ways of Improvement. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):25-32.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-25-32

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды. / Под ред. Мареев А.Н. и Зыковой А.С., М., 1974. 337 с.
2. Краевский Н.А. Очерки патологической анатомии лучевой болезни. М.: Медгиз, 1957. 230 с.
3. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Новикова Н.Я. Глобальные выпадения цезия-137 и человек. М.: Атомиздат, 1974. 168 с.
4. Марей А.Н., Бархударов Р.М., Книжников В.А. и др. Глобальные выпадения продуктов ядерных взрывов как фактор облучения человека. / Под ред. Мареев А.Н. М.: Атомиздат, 1980. 188 с.
5. Марей А.Н., Зыкова А.С., Сауров Ю.М. Радиационная коммунальная гигиена. М.: Энергоатомиздат. 1984. 176 с.
6. Федорова М.В., Краснополский В.И., Лягинская А.М. Репродуктивное здоровье женщины и потомство в регионах с радиоактивным загрязнением (последствия аварии на ЧАЭС) / Под ред. М.В. Федоровой. М.: Медицина, 1997. 393 с.
7. Шандала Н.К., Коренков И.П., Котенко К.В., Новикова Н.Я. Глобальные и аварийные выпадения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. М.: Медицина. 2009. 208 с.
8. Ильин Л.А., Шандала Н.К., Савкин М.Н. и др. Место и роль радиационно-гигиенического мониторинга в системе социально-гигиенического мониторинга // Гигиена и санитария, 2004. № 5. С. 9–15.
9. МУ 2.6.1.1868-04 Внедрение показателей радиационной безопасности о состоянии объектов окружающей среды, в т.ч. продовольственного сырья и пищевых продуктов, в систему социально-гигиенического мониторинга.
10. МУ 2.6.5.076-2015 Мониторинг состояния окружающей среды на этапах жизненного цикла АЭС.
11. МУ 2.6.5.032-2014 Экспертные и прогнозные оценки состояния здоровья населения в районах размещения атомных станций.
12. Шандала Н.К., Киселев С.М., Титов А.В. Научно-практический опыт надзорной деятельности в области обеспечения защиты населения и окружающей среды на объектах ядерного наследия России // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12. № 2 (спецвыпуск), С. 83–96.
13. Шандала Н.К., Титов А.В., Метляев Е.Г. Проблемы аварийного нормирования содержания радионуклидов в пищевых продуктах: переход от временно допустимых уровней к нормальной практике // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61. № 3. С. 98–102.
14. Метляев Е.Г., Богданова Л.С., Грачев М.И. и др. Международные и отечественные подходы к проведению йодной профилактики при аварии ядерного реактора. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 3. С. 66–72.
15. Волгодонская АЭС и здоровье населения / Под ред. Ильина Л.А. и Мурина М.Б. М.: ГНЦ-ИБФ. 2002. 62 с.

16. Шандала Н.К., Коренков И.П., Романов В.В. Состояние радиационно-гигиенической обстановки в районе размещения АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2015. Т. 60. № 2. С. 15–21.
17. Квачева Ю. Е., Глазунов А. Г. Особенности организации и производства судебно-медицинской экспертизы трупов лиц, погибших от острой лучевой болезни // Судебно-медицинская экспертиза. 2012. Том 55. № 2. С. 43–45.
18. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В. и др. Оценка радиационной опасности пребывания населения и ведения хозяйственной деятельности в районе расположения выработанного уранового месторождения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Том 65. № 2. С. 11–16.
19. Исаев Д.В., Шандала Н.К., Старинский В.Г. и др. Оценка радиационной обстановки в районе расположения судоремонтных предприятий Камчатского края // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Том 64. № 5. С. 9–14.
20. Лягинская А.М., Шандала Н.К., Киселев С.М. и др. 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. Т. 65. № 3. С. 31–39.
21. Шандала Н.К., Сневе М.К., Семенова М.П., Сегень К, Филонова А.А. О сотрудничестве ФГБУ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России с Государственным управлением Норвегии по радиационной и ядерной безопасности (DSA) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65. № 1. С. 72–78.
22. Петоян И. М., Лягинская А. М., Ермалицкий А. П. и др. Состояние репродуктивного здоровья персонала Курской АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64. №1. С.21–25.
23. Грачев М.И., Ильин Л.А., Квачева Ю. Е. и др. Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму / Под общей ред. Л.А. Ильина. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2018, ISBN 978-5-905926-57-0. 392 с.
24. Судебная медицина: национальное руководство / Под ред. Ю.И. Пиголькина. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2018. ISBN 978-5-9704-4236-4. 576 с.

REFERENCES

1. Guidelines for Sanitary Control Over the Content of Radioactive Substances in Environmental Objects / ed. Marey AN and Zykova AS, Moscow Publ, 1974. 337 p. (In Russian).
2. Kraevsky NA. Essays on the Pathological Anatomy of Radiation Sickness. Medgiz, Moscow Publ, 1957. 230 p. (In Russian).
3. Global Fallout of Cesium-137 and man / Marey AN, Barkhudarov RM Novikova NYa, Moscow Publ, Atomizdat, 1974, 168 p. (In Russian).
4. Marey AN, Zykova AS, Saurov YuM. Radiation Communal Hygiene. Moscow Publ, Energoatomizdat 1984.176 p. (In Russian).
5. Marey AN, Zykova AS, Saurov YuM. Radiation Communal Hygiene. Moscow, Energoatomizdat, Publ, 1984. 176 p. (In Russian).
6. Fedorova MV, Krasnopolsky VI, Lyaginskaya AM Reproductive Health of Women and Offspring in Regions with Radioactive Contamination (Consequences of the Chernobyl Accident) Monograph, ed. Fedorova MV. Moscow, Medicine, Publ, 1997. 393 p. (In Russian).
7. Shandala NK, Korenkov IP, Kotenko KV, Novikova NYa Global and Emergency Fallouts of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr. Moscow, Medicine, Publ, 2009. 208 p.
8. Ilyin LA, Shandala NK, Savkin MN et al. The place and Role of Radiation-hygienic Monitoring in the System of Social-hygienic Monitoring // Hygiene and Sanitation, Moscow Publ, 2004;(5):9–15 (In Russian).
9. MU 2.6.1.1868-04 Implementation of Radiation Safety Indicators on the State of Environmental Objects, incl. Food raw Materials and food Products, in the System of Social and Hygienic Monitoring. (In Russian).
10. MU 2.6.5.076-2015 Monitoring of the State of the Environment at the Stages of the NPP life Cycle. (In Russian).
11. MU 2.6.5.032-2014 Expert and Predictive Assessments of the Health Status of the Population in the Areas Where Nuclear Power Plants are located. (In Russian).
12. Shandala NK, Kiselev SM, Titov AV Scientific and Practical Experience of Supervisory Activities in the Field of Ensuring the Protection of the Population and the Environment at Nuclear Heritage sites in Russia. Radiation Hygiene. 2019.12(2) (special issue):83–96. p. (In Russian).
13. Shandala NK, Titov AV, Metlyaev EG. Problems of Emergency Regulation of the Content of Radionuclides in Food: the Transition From Temporarily Permissible levels to Normal practice. Medical Radiology and Radiation Safety. 2016.61(3):98–102(In Russian).
14. Metlyaev EG, Bogdanova LS, Grachev MI and Others. International and Domestic Approaches to Iodine Prophylaxis in the Event of a Nuclear Reactor Accident. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020.65(3):66–72.
15. Volgodonsk NPP and Public Health. Ed. Academician of the RAMS Ilyina LA and Ph.D. Murina MB. Moscow Publ, GNTs-IBF. 2002. 62 p. (In Russian).
16. Shandala NK, Korenkov IP, Romanov V.V. The State of the Radiation-hygienic Situation in the area of the NPP location. Medical Radiology and Radiation Safety. 2015.60(2):15–21. (In Russian).
17. Kvacheva YuE, Glazunov AG Features of the organization and production of forensic medical examination of corpses of persons who Died From Acute Radiation Sickness. Forensic Medical Examination. 2012. 55(2):43–45. (In Russian).
18. Titov AV, Shandala NK, Isaev DV and Others. Assessment of the Radiation Hazard of the stay of the Population and the Conduct of Economic Activity in the area of the location of a Depleted Uranium Deposit. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020.65(2):11–16.
19. Isaev DV, Shandala NK, Starinskiy VG et.al. Assessment of the Radiation Situation in the area of the location of the Ship Repair Enterprises of the Kamchatka Territory. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019.64(5):9–14 (In Russian).
20. Lyaginskaya AM, Shandala NK, Kiselev SM and Others. The State of Health of the Population in the Area of the location of the Shipyard "Nerpa", Carrying out Work on the Disposal of the nuclear legacy Object - the Floating Technical Base "Lepse". Medical Radiology and Radiation Safety. 2020.65(3):31–39. (In Russian).
21. Shandala NK, Sneve MK, Semenova MP, Segien K, Filonova AA. Cooperation Between State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency and Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020; 65(1):72–78. (In Russian).
22. Petoyan I.M., Lyaginskaya A.M., Ermalitsky A.P. et al. Reproductive Health Status of the Kursk NPP Personnel. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019.64(1):21–25. (In Russian).
23. Grachev MI, Ilyin LA, Kvacheva YuE et al. Medical Aspects of Countering Radiological and Nuclear Terrorism / Ed. L.A. Ilyin. Moscow, FGBU GNTs FMBC im. A.I. Burnazyana FMBA of Russia, 2018. 392 p. ISBN 978-5-905926-57-0.
24. Forensic Medicine: National leadership / Ed. YuI. Pigolkin. Moscow, GEOTAR-Media, 2018. 576 p. ISBN 978-5-9704-4236-4.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 16.03.2021. **Принята к публикации:** 21.04.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 16.03.2021. **Accepted for publication:** 21.04.2021.

В.И. Рубцов, А.Б. Требухин, А.Ю. Нефедов, Е.В. Клочкова, И.В. Оленина, В.П. Зиновьев, А.Н. Тимошенко, О.В. Исаев, М.С. Богданов, С.А. Богданов, Т.В. Егерев

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТНИКОВ РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВ СРЕДСТВАМИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ, СООТВЕТСТВУЮЩИМИ УСТАНОВЛЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ И УСЛОВИЯМ ТРУДА

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

Контактное лицо: Виктор Иванович Рубцов, e-mail: siz-fmbc@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Рассмотрена проблема организации индивидуальной защиты работников радиационно опасных производств. Специфика условий работы предприятий в области использования атомной энергии (ОИАЭ) связана с чрезвычайно высокой токсичностью радиоактивных веществ и отсутствием у человека органа чувств, способного идентифицировать опасные уровни радиационного воздействия. Насущной необходимостью является наличие обязательных требований, предъявляемых к производству, идентификации и верификации СИЗ в ОИАЭ, поскольку применение некачественных СИЗ и СИЗ, не соответствующих условиям труда, создает угрозу для здоровья работников. В статье приведены результаты анализа действующей и разрабатываемой нормативной базы, устанавливающей требования к СИЗ.

Результаты: Начиная с 2017 г. в Госкорпорации «Росатом» реализуются планы разработки серии отраслевых стандартов, устанавливающих требования к СИЗ в ОИАЭ и методы их испытаний. Более 25 межгосударственных и национальных стандартов по СИЗ внесены в Сводный перечень документов по стандартизации в ОИАЭ. СИЗ внесены в перечень продукции, которая подлежит обязательной сертификации и для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в ОИАЭ.

В ближайшее время планируется разработка отраслевых и национальных стандартов устанавливающих требования к СИЗ от трития, радиоактивных благородных газов, радиоактивного йода, высокотоксичных альфа-излучающих радионуклидов, а также стандартов на методы их испытаний.

Заключение: Созданная в настоящее время система стандартизации требований к СИЗ в ОИАЭ совместно с созданной системой сертификации СИЗ в ОИАЭ будет способствовать повышению эффективности индивидуальной защиты персонала радиационно опасных и химических объектов атомной отрасли.

Ключевые слова: средства индивидуальной защиты, радиационно опасные производства, система технического регулирования, стандартизация, сертификация, чрезвычайные ситуации

Для цитирования: Рубцов В.И., Требухин А.Б., Нефедов А.Ю., Клочкова, Е.В., Оленина И.В., Зиновьев В.П., Тимошенко А.Н., Исаев О.В., Богданов М.С., Богданов С.А., Егерев Т.В. Актуальные вопросы обеспечения работников радиационно-опасных производств средствами индивидуальной защиты, соответствующими установленным требованиям и условиям труда // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.33–36.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-33-36

Введение

Успешное развитие атомной отрасли, ядерной медицины, большой объем работ по ликвидации ядерного наследия, утилизации вооружения и военной техники, а также переработка и хранение радиоактивных отходов неизбежно приводят к необходимости привлечения достаточного большого контингента персонала к работам с открытыми радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. В тех случаях, когда организационными мероприятиями и применением коллективных средств защиты не удается нормализовать условия труда либо существует потенциальная вероятность радиационного воздействия, применяются средства индивидуальной защиты (СИЗ) [1–4].

Средства индивидуальной защиты – это последний барьер на пути вредного или опасного фактора, воздействующего на организм человека, когда все другие способы и средства обеспечения безопасности и защиты исчерпали свои возможности. Защищая человека, СИЗ как правило создают дополнительную нагрузку на физиологические системы организма, ухудшают визуальный обзор и доступность звуковой информации, затрудняют движение рук и ног, что в итоге приводит к снижению работоспособности человека. Применение СИЗ – это вынужденная мера, предусматривающая выбор СИЗ, с одной стороны – наиболее эффективных, и с другой стороны – оказывающих наименьшее негативное воздействие.

Применение некачественных СИЗ и СИЗ, не соответствующих установленным требованиям и условиям труда, создает угрозу для здоровья работника.

Конституция Российской Федерации (ст. 37 п. 3) гласит, что «каждый имеет право на труд в условиях, отвечающих требованиям безопасности и гигиены».

Вопросы обеспечения персонала средствами индивидуальной защиты (обязанности работодателя и работника) регулируются несколькими статьями Трудового кодекса РФ (209, 210, 212, 214, 215, 220, 221) [5].

В законе «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (ст. 25) [6] также установлено, что индивидуальные предприниматели и юридические лица обязаны осуществлять санитарно-противоэпидемические (профилактические) мероприятия по обеспечению безопасных для человека условий труда и выполнению требований санитарных правил и иных нормативных правовых актов Российской Федерации к производственным процессам и технологическому оборудованию, организации рабочих мест, коллективным и индивидуальным средствам защиты работников.

Основные минимально необходимые требования к СИЗ и к порядку подтверждения их соответствия установлены Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты» 019/2011 (ТР ТС 019/2011) [7].

Все вводимые в обращение на территории ЕврАзЭС СИЗ должны соответствовать требованиям ТР ТС 019/2011 и утвержденному одновременно с ним Перечню стандартов, применяемым на добровольной основе.

Вместе с тем, в соответствии с соглашением Сторон ЕврАзЭС от 25.01.2008 [8], все, что касается обеспечения

безопасности в области использования атомной энергии (ОИАЭ) регулируется на национальном уровне.

Система технического регулирования в ОИАЭ базируется на трех федеральных законах:

162-ФЗ «О стандартизации» [9] (ст. 6);

184-ФЗ «О техническом регулировании» [10] (ст. 5);

170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [11] (ст. 20)

Постановлениями Правительства Российской Федерации от 12.07.2016 № 669 [12], от 23.04.2013 № 362 [13], от 15.06.2016 № 544 [14], от 20.07.2013 № 612 [15] сформирована отраслевая (в рамках Госкорпорации «Росатом») система технического регулирования, аккредитации, стандартизации и оценки соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в ОИАЭ.

В ходе реализации постановлений Правительства Российской Федерации изданы приказы Госкорпорации «Росатом», Ростехнадзора, разработаны сотрудниками ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России и утверждены новые стандарты и другие нормативно-методические документы. В соответствии с Приказом Ростехнадзора от 04.12.2018 № 599 [16] в перечень продукции, которая подлежит обязательной сертификации и для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в ОИАЭ, введен по предложению ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России дополнительный раздел XII «Средства индивидуальной защиты», содержащий широкий круг СИЗ с указанием кодов Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности (ОКПД 2).

Следует отметить, что стандарты, устанавливающие требования к СИЗ, на основе которых обеспечивается соблюдение требований ТР ТС 019/2011 в соответствии с Решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 06.03.2018 № 37 [17], применяются на добровольной основе. В отличие от этого, Приказом Госкорпорации «Росатом» от 26.10.2017 № 1/1047-П установлены дополнения в Сводный перечень документов по стандартизации в ОИАЭ, в которые вошли 25 межгосударственных и национальных стандартов, устанавливающих обязательные требования к СИЗ, применяемым в атомной отрасли.

Обязательность требований к СИЗ в ОИАЭ обусловлена чрезвычайно высокой токсичностью радиоактивных веществ и отсутствием у человека органа чувств, способного идентифицировать опасные уровни ионизирующего излучения и радиоактивных веществ, которые в условиях аварийных и чрезвычайных ситуаций способны вызвать повреждение, несовместимые с жизнью.

Специфика СИЗ для персонала радиационно-опасных объектов заключается в том, что они должны быть либо дезактивируемыми, либо одноразовыми. СИЗ должны иметь высокую защитную эффективность по аэрозолям различной дисперсности и парам, они часто должны одновременно защищать от чрезвычайно токсичных веществ, присутствующих в воздухе практически в невоспых количествах, и одновременно от внешнего излучения, которое резко сокращает допустимое время выполнения работы.

Кроме перечисленной выше специфики требований к СИЗ, в атомной отрасли часто приходится работать с особыми веществами, обладающими уникальными свойствами и специфическими путями поступления и воздействия на организм человека.

Одним из таких веществ является тритий. Легче молекул трития только молекулы водорода и дейтерия. Поэтому тритий и его соединения быстро диффундируют через материалы и сочленения СИЗ и проникают в организм чело-

века через неповрежденную кожу так же легко, как и через органы дыхания. Особенно опасны органические соединения трития. А если атом трития входит в структуру ДНК или даже просто находится в ядре клетки, то бета-частица, образующаяся при его радиоактивном распаде, вызывает двунитиевые разрывы ДНК, которые могут привести к гибели клетки или к стохастическим эффектам.

При авариях на ядерных энергетических установках образуются выбросы радиоактивных благородных газов, которые опасны прежде всего как источник внешнего излучения, но, кроме того, после их распада они превращаются в мельчайшие твердые частицы (в наночастицы), которые трудно улавливаются обычными фильтрами.

Особым радиационным воздействием на человека отличается также радиоактивный йод, образующий сложную по составу нестабильную газопараэрозольную смесь, в которой присутствует, в частности, йодистый метил, для улавливания которого нужны специальные хемосорбционные фильтры, а не просто противоаэрозольные или противогазовые (сорбционные) фильтры.

Высокоокислительные альфа-излучающие радионуклиды (плутоний и полоний) за счет явления агрегатной отдачи образуют аэрозоли в нанометровом диапазоне.

В настоящее время нет межгосударственных и национальных стандартов, устанавливающих требования к СИЗ от этих веществ и методы их испытаний, хотя есть ГОСТ Р 54597-2011/ISO/TP 27628:2007 [18], устанавливающий жесткие требования к воздуху рабочей зоны.

Начиная с 2017 г., в Госкорпорации «Росатом» реализуются планы разработки серии отраслевых стандартов, устанавливающих требования к СИЗ в ОИАЭ и методы их испытаний. В дальнейшем эти стандарты должны быть включены в Сводный перечень обязательных к исполнению нормативных документов, утверждаемый приказом Госкорпорации «Росатом».

Эти стандарты будут использоваться:

- для оценки соответствия СИЗ требованиям, учитывающим особенности условий труда в ОИАЭ;
- для обоснования конкурсных требований по закупке СИЗ как по 44-ФЗ, так и по 223-ФЗ;
- для идентификации СИЗ;
- при проведении входного контроля (верификации) СИЗ, поставляемых в организации и на предприятия в ОИАЭ;
- при выставлении претензий и рекламаций поставщикам некачественных СИЗ и СИЗ, не соответствующих установленным требованиям.

С января 2018 г. на базе ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России функционирует Испытательный центр «Индивидуальная защита», аккредитованный Госкорпорацией «Росатом» на испытания СИЗ в ОИАЭ.

В 2020 г. разработаны, прошли все экспертизы и находятся на утверждении стандарты Госкорпорации «Росатом», устанавливающие правила оценки соответствия СИЗ в ОИАЭ, требования к изолирующим костюмам, дополнительной и основной спецодежде.

На всех этапах жизненного цикла СИЗ важное значение имеет их идентификация. Общие правила ее проведения установлены в ГОСТ Р 56541-2015 [19]. Верификация (входной контроль) закупленных СИЗ осуществляется в соответствии с ГОСТ 24297-2013 [20], а для СИЗ в ОИАЭ – согласно Единым отраслевым методическим указаниям, введенным в действие приказом Госкорпорации «Росатом» от 10.08.2017 № 1/766-П.

Периодически издаются каталоги-справочники по СИЗ в ОИАЭ, которые размещаются также на сайте Госкорпорации. В 2020 г. выпущено четвертое дополненное и переработанное издания каталога.

Таким образом, созданная при активном участии специалистов лаборатории «Средств индивидуальной защиты персонала опасных производств» система стандартизации требований к СИЗ в ОИАЭ совместно с созданной ранее также с участием специалистов лабора-

тории системой сертификации СИЗ в ОИАЭ, будут способствовать уменьшению количества фальсифицированной и контрафактной продукции, которая иногда попадает на радиационно-опасные и химические объекты атомной отрасли.

Medical Radiology and Radiation Safety. 2021. Vol. 66. № 4. P. 33–36

Radiation safety

Current Issues of Providing the Personnel of the Radiation Hazardous Facilities with Personal Protection Equipment Complying with the Requirements and Working Conditions

V.I. Rubtsov, A.B. Trebukhin, A.Yu. Nefedov, E.V. Klochkova,
I.V. Olenina, V.P. Zinoviev, A.N. Timoshenko, O.V. Isaev

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia
Contact person: Rubtsov V.I. E-mail: siz-fmbc@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: The article covers issues related to the providing personal protection for the personnel of radiation hazardous facilities. Specific character of working conditions at the enterprises in the field of atomic energy use is caused by extremely high toxic level of radioactive substances and the fact that there is no human sense organ which can identify dangerous levels of radiation exposure. Establishment of mandatory requirements for manufacturing, identification and verification of personal protection equipment (PPE) in the field of atomic energy use is needed because using of low-quality PPE and PPE not complying with working conditions poses a risk for the health of workers. The article provides results of analysis of the regulatory frameworks, both current and under development, which set the requirements for PPE.

Results: Since 2017 Rosatom is executing plans for development of series of industry standards specifying requirements for PPE in the field of atomic energy use and methods of their testing. More than 25 interstate and national standards on PPE were included in the Summary list of standardization documents in the field of atomic energy use. PPE was included in the list of products subject to mandatory certification and having requirements for safety assurance in the field of atomic energy use specified.

Industry and national standards establishing requirements for PPE protecting from tritium, radioactive noble gases, radioactive iodine, high-toxic alpha-emitting radionuclides, as well as standards on methods of their testing are planned to be developed soon.

Conclusion: The system of standardizing requirements for PPE in the field of atomic energy use created by, together with existing system of certification of PPE in the field of atomic energy use will help to increase effectiveness of personal protection of the personnel at radiation and chemical hazardous facilities in nuclear industry.

Key words: *personal protection equipment, radiation hazardous facilities, technical regulation system, standardization, certification, emergency situation*

For citation: Rubtsov VI, Trebukhin AB, Nefedov AYU, Klochkova EV, Olenina IV, Zinoviev VP, Timoshenko AN, Isaev OV. Current Issues of Providing the Personnel of the Radiation Hazardous Facilities with Personal Protection Equipment Complying with the Requirements and Working Conditions. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):33-36.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-33-36

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Радиационная медицина / Руководство для врачей-исследователей, организаторов здравоохранения и специалистов по радиационной безопасности / Под общей ред. Ильина Л.А. Радиационная гигиена. Т. 3.
2. Средства индивидуальной защиты персонала предприятий атомной промышленности и энергетики / Каталог-справочник. Авторы-соавтатели: Рубцов В.И., Клочков В.Н., Клочкова Е.В., Нefедов А.Ю., Оленина И.В., Суровцев Н.А., Требухин А.Б., Тюнеева Л.И., Тимошенко А.Н. и др. / Под общей редакцией Рубцова В.И. Одобрено к изданию Генеральной инспекцией Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (генеральный инспектор – Адамчик С.А.). 4-е изд., перераб. и дополн. – М.: МОУ «ИИФ», 2020. 252 с.
3. Рубцов В.И., Клочков В.Н. К шестидесятилетию лаборатории средств индивидуальной защиты персонала опасных производств. «Медицинская радиология и радиационная безопасность», 2013, № 5, с. 75-81.
4. Рубцов В.И., Клочков В.Н., Суровцев Н.А., Нefедов А.Ю., Клочкова Е.В., Требухин А.Б., Чибиков И.О. Совершенствование радиационной защиты медицинского персонала при проведении диагностических и лечебных процедур с использованием радионуклидов и источников ионизирующего излучения. Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2016, Т. 61, № 1. С. 17-21.
5. Федеральный закон от 30.12.2001 № 197-ФЗ. Трудовой кодекс Российской Федерации.
6. Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 № 52-ФЗ.
7. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты» ТР ТС 019/2011. Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 года № 878.
8. Соглашение от 25 января 2008 года «О проведении согласованной политики в области технического регулирования, санитарных и фитосанитарных мер» в ред. протокола от 19.05.2011 с изменениями, внесенными договором от 10.10.2014.
9. Федеральный закон «О стандартизации в Российской Федерации» от 29.06.2015 № 162-ФЗ.
10. Федеральный закон «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ.
11. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 № 170-ФЗ.
12. Постановление Правительства РФ от 12.07.2016 № 669 «Об утверждении Положения о стандартизации в отношении продукции (работ, услуг), для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов и иных объектов стандартизации, связанных с такой продукцией».
13. Постановление Правительства Российской Федерации от 23.04.2013 № 362 «Об особенностях технического регулирования в части разработки и установления государственных заказчиками, федеральными органами исполнительной власти, уполномоченными в области государственного управления использованием атомной энергии и государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии, и Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" обязательных требований в отношении продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции».
14. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.06.2016 № 544 «Об особенностях оценки соответствия продукции, для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, а также процессов ее проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения».
15. Постановление Правительства Российской Федерации от 20.07.2013 № 612 (ред. от 28.06.2017) «Об аккредитации в области использования атомной энергии».
16. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому

- и атомному надзору от 04.12.2018 № 599 «О внесении изменений в Перечень продукции, которая подлежит обязательной сертификации и для которой устанавливаются требования, связанные с обеспечением безопасности в области использования атомной энергии, утвержденный приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21 июля 2017 г. № 277».
17. Решение Коллегии Евразийской экономической комиссии от 06.03.2018 № 37 «О внесении изменений в Решение Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 878».
18. ГОСТ Р 54597-2011/ISO/TR 27628:2007 Воздух рабочей зоны. Ультрадисперсные аэрозоли, аэрозоли наночастиц и наноструктурированных частиц. Определение характеристик и оценка воздействия при вдыхании.
19. ГОСТ Р 56541-2015 Оценка соответствия. Общие правила идентификации продукции для целей оценки (подтверждения) соответствия требованиям технических регламентов Таможенного союза.
20. ГОСТ 24297-2013 Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля.

REFERENCES

- Radiation Medicine. Guidelines for Medical Researchers, Health Officials and Radiation Safety Professionals / Ed. Ilyin LA V. 3. Radiation Hygiene (In Russian).
- Rubtsov VI, Klochkov VN, Surovtsev NA et al. Personal Protection Equipment for the Personnel of Nuclear Industry and Energetics Enterprises Reference Manual / Ed. Rubtsov VI Approved for Publication by the General Inspectorate of Rosatom State Corporation. 4rd Edition, Revised. Moscow, MOU IIF, 2020, 252 p. (In Russian).
- Rubtsov VI, Klochkov VN In Celebration of the 60th Anniversary of the Laboratory of the Personal Protection Equipment for the Personnel of Hazardous Production Facilities. Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;58(5):75-81. (In Russian).
- Rubtsov VI, Klochkov VN, Surovtsev NA, et al. Improvement of Radiation Protection of the Medical Staff During Diagnostic and Treatment Procedures With use of Radionuclides and Sources of Ionizing Radiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2016;61(1):17-21. (In Russian).
- Federal Law of 30.12.2001 No. 197-FZ. Labour Code of the Russian Federation. (In Russian).
- Federal Law of 30.03.1999 No. 52-FZ "On Sanitary and Epidemiologic Well-Being of the Population". (In Russian).
- Technical Regulation of the Customs Union TRCU 019/2011 "On Safety of the Personal Protection Equipment". Approved by the Decision of the Customs Union Commission of 09.12.2011 No. 878. (In Russian).
- Agreement of 25.01.2008 "On following a consistent policy in the area of technical Regulation, Sanitary and Phytosanitary Measures", in Edition of the Protocol of 19.05.2011 Amended by the Agreement of 10.10.2014. (In Russian).
- Federal Law of 29.06.2015 No. 162-FZ "On Standardization in the Russian Federation". (In Russian).
- Federal Law of 27.12.2002 No. 184-FZ "On Technical Regulation". (In Russian).
- Federal Law of 21.11.1995 No. 170-FZ "On Atomic Energy Use". (In Russian).
- The RF Government Resolution of 12.07.2016 No. 669 "On approval of the Regulation on Standardization in Relation to Products (Works, Services) for Which Requirements are Established Related to Ensuring Safety in the Field of Atomic Energy use, as Well as Processes and Other Standardization Objects Associated With such Products". (In Russian).
- The RF Government Resolution of 23.04.2013 No. 362 "On specifics of Technical Regulation in Terms of the Development and Establishment by State Customers, Federal Executive Bodies Authorized in the Field of State Governance of the Atomic Energy use and State Regulation of Safety at the Atomic Energy use, and the State Atomic Energy Corporation "Rosatom" Mandatory Requirements for Products, for Which Requirements are Established Related to Ensuring Safety in the field of Atomic Energy use, as Well as Processes of Engineering (Including Research), Manufacturing, Construction, Installation, Commissioning, Operation, Storage, Transportation, Sale, Utilization and Disposal of these Products". (In Russian).
- The RF Government Resolution of 15.06.2016 No. 544 "On Specifics of Conformity Assessment for Products, for Which Requirements are Established Related to Ensuring Safety in the Field of Atomic Energy use, as Well as Processes of their Engineering (Including Research), Manufacturing, Construction, Installation, Commissioning, Operation, Storage, Transportation, Sale, Utilization and Disposal". (In Russian).
- The RF Government Resolution of 20.07.2013 No. 612 "On accreditation in the Field of Atomic Energy use". (In Russian).
- Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of 04.12.2018 No. 599 "On Amending the List of Products Which are Subject to Mandatory Certification and for which Requirements are Established Related to Ensuring Safety in the Field of Atomic Energy use, Approved by the Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of 21 July 2017 No. 277". (In Russian).
- Decision of the Board of the Eurasian Economic Commission of 06.03.2018 No. 37 "On Amending the Decision of the Customs Union Commission of 9 December 2011 No. 878". (In Russian).
- GOST R 54597-2011/ISO/TR 27628:2007. Workplace Atmospheres. Ultrafine Aerosols, Nanoparticle and Nano-Structured Aerosols. Inhalation Exposure Characterization and Assessment. (In Russian).
- GOST R 56541-2015. Conformity Assessment. General Rules for Product Identification for the Assessment (Confirmation) of Compliance with the Requirements of the Technical Regulations of the Customs Union. (In Russian).
- GOST 24297-2013. Verification of Purchased Products. Organization of Conducting and Control Methods. (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 23.12.2020. Принята к публикации: 20.01.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 23.12.2020. Accepted for publication: 20.01.2021.

А.В. Симаков¹, Д.В. Арефьева², Ю.В. Абрамов¹, Н.Л. Проскуракова¹, И.А. Кемский³, А.А. Шаяхметова²

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ КОРАБЛЕЙ С ЯДЕРНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ И СУДОВ АТОМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

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

²Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины ФМБА России, Санкт-Петербург,

³Межрегиональное управление № 120 ФМБА России, Мурманская обл., Снежногорск

Контактное лицо: Юрий Викторович Абрамов: abramov-1948@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ проблемы совершенствования нормативно-методического обеспечения радиационной безопасности при проведении работ по утилизации судов атомного флота.

Материалы и методы: Приведены сведения о разработанных нормативно-методических документах, содержащих санитарно-гигиенические и организационные требования по надзору за обеспечением радиационной безопасности при проведении работ по утилизации атомных подводных лодок, судов атомного технологического обслуживания и надводных кораблей с ядерной энергетической установкой, а также при хранении реакторных отсеков утилизируемых атомных подводных лодок и блок-упаковок судов атомного технологического обслуживания.

Результаты: На основании проведенных исследований была разработана комплексная система нормативно-методического, санитарно-гигиенического и медицинского обеспечения сохранения здоровья и снижения уровня заболеваемости персонала, участвующего в работах по выводу из эксплуатации и последующей утилизации атомных объектов морской техники.

Заключение: Разработанные документы направлены на дальнейшее совершенствование нормативно-правового и методического обеспечения прав граждан на безопасные условия труда, охрану здоровья и социальную защиту

Ключевые слова: атомные подводные лодки, надводные корабли с ядерными энергетическими установками, вывод из эксплуатации, утилизация, радиационная обстановка, нормативная документация

Для цитирования: Симаков А.В., Арефьева Д.В., Абрамов Ю.В., Проскуракова Н.Л., Кемский И.А., Шаяхметова А.А. Совершенствование нормативного обеспечения радиационной безопасности персонала при утилизации кораблей с ядерными энергетическими установками и судов атомного технологического обслуживания // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.37–41.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-37-41

Введение

Указом Президента Российской Федерации от 13 декабря 2018 г. № 585 «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» определено, что в Российской Федерации, наряду с другими объектами, обеспечивается ядерная и радиационная безопасность объектов, эксплуатация которых по функциональному назначению прекращена и которые находятся на стадиях вывода из эксплуатации, захоронения, утилизации. При этом одним из основных направлений реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности определено совершенствование нормативно-правовой базы.

В рамках реализации постановления Правительства РФ от 28.09.2011 № 801-26 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» разработана и реализована подпрограмма «Промышленная утилизация атомных подводных лодок, надводных кораблей с ядерной энергетической установкой, судов атомного технологического обслуживания и реабилитация радиационно-опасных объектов на 2011–2015 годы и на период до 2020 года», которая вошла в Федеральную целевую программу (ФЦП) «Промышленная утилизация вооружения и военной техники ядерного комплекса на 2011–2015 годы и на период до 2020 года», призванная решить задачи и проблемы, касающиеся ликвидации ядерного наследия, в частности вывода их эксплуатации и утилизации атомных подводных лодок (АПЛ), судов атомного технологического обслуживания (АТО), над-

водных кораблей (НК) с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ) и объектов обслуживающей инфраструктуры.

Спектр вопросов, возникших при реализации данной Программы, повлек за собой необходимость разработки нормативных и методических документов, регламентирующих требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при проведении работ по выводу из эксплуатации и утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО.

В связи с выработкой технического ресурса и необходимостью выполнения со стороны Российской Федерации обязательств по международным соглашениям в конце прошлого столетия начался вывод из эксплуатации АПЛ, НК с ЯЭУ, судов АТО, осуществляющих техническое обслуживание судов с ЯЭУ и обеспечивающих перезарядку реакторов, обращение с ядерным топливом и радиоактивными отходами.

В советский период было построено 249 атомных подводных лодок, 201 из них выведены из состава военно-морского флота (ВМФ). В 1998 г. Правительством РФ государственным заказчиком-координатором работ по комплексной утилизации АПЛ был определен Минатом России (в настоящий момент ГК «Росатом»). Минобороны России было освобождено от данных функций (постановление Правительства РФ от 28.05.98 г. № 518).

Основные проблемы, существующие при обеспечении радиационной безопасности процессов вывода из эксплуатации и утилизации кораблей с ядерными энергетическими установками и судов АТО, обусловлены:

– большим количеством выведенных из эксплуатации объектов (АПЛ – около 200 единиц);

- слабо развитой инфраструктурой для вывода надводных и подводных кораблей из эксплуатации;
- необходимостью приведения пунктов хранения ОЯТ и РАО в соответствие требованиям «Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности» (СП 2.6.1.2612-10);
- отсутствием достоверной информации о состоянии и объемах хранящихся в пунктах хранения ОЯТ и РАО.

В рамках выполнения ФЦП «Промышленная утилизация атомных подводных лодок, надводных кораблей с ядерной энергетической установкой, судов атомного технологического обслуживания и реабилитация радиационно-опасных объектов на 2011–2015 годы и на период до 2020 года» специалистами Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна ФМБА России и Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины ФМБА России были проведены исследования по изучению и оценке радиационной обстановки и условий труда персонала на следующих объектах, задействованных в процессах утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО:

- на объектах СевРАО и ДальРАО, бывших береговых технических баз ВМФ;
- в пунктах долговременного хранения реакторных отсеков утилизированных атомных подводных лодок и блок-упаковок судов атомного технологического обслуживания;
- на судоремонтных заводах, осуществляющих комплекс работ по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов атомного технологического обслуживания.

Целью выполненных исследований являлось совершенствование и актуализация существующей нормативно-методической базы медико-гигиенического обеспечения работ по утилизации АПЛ, судов атомного технологического обслуживания, надводных кораблей с ядерными энергетическими установками и объектов обслуживающей инфраструктуры.

Результаты и обсуждение

Совершенствование нормативно-методической базы обеспечения безопасности работ по выводу из эксплуатации береговых технических баз

Бывшие береговые базы технического обслуживания АПЛ (две в Мурманской области и две на Дальнем Востоке) были реорганизованы в два предприятия в системе ГК «Росатом»: «Северное федеральное предприятие по обращению с радиоактивными отходами» (СевРАО), расположенное в губе Андреева (Филиал № 1) и в бухте Гремиха (Филиал № 2) в Мурманской области, и «Дальневосточное федеральное предприятие по обращению с радиоактивными отходами» (ДальРАО) в районе бухты Сысоева (Приморский край) и г. Вилочинск (п-ов Камчатка).

Наиболее неблагоприятная радиационная обстановка сложилась на территории пункта временного хранения (ПВХ) отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в губе Андреева, созданного в 60-е годы для обеспечения эксплуатации АПЛ. ПВХ осуществлял прием и хранение свежего и ОЯТ, твердых и жидких радиоактивных отходов, образовавшихся при эксплуатации АПЛ и атомных ледоколов. С 1993 г. функционирование данного ПВХ по приему ОЯТ и радиоактивных отходов было прекращено, отправка ОЯТ и радиоактивных отходов (РАО) на переработку не производилась, в результате чего на объекте были накоплены значительные объемы твердых и жидких РАО. Работы по обращению с ОЯТ и РАО на период исследований (2005–2007 гг.) осуществлялись в нестандартных условиях [1], которые в общем виде включали в себя:

- недостаточный объем информации о радиационно-гигиеническом и физическом состоянии ОЯТ;
- вынужденное размещение ОЯТ в сооружениях, не предназначенных для этих целей;
- наличие на территории ПВХ и в производственных зданиях повышенных уровней содержания радионуклидов и внешнего гамма-излучения;
- аварийное состояние строительных конструкций ряда зданий и сооружений;
- отсутствие достаточного количества квалифицированного персонала;
- уникальный характер проектируемых технологий и оборудования по обращению с ОЯТ и РАО.

Кроме этого, за время эксплуатации береговых технических баз ВМФ технологии обращения с источниками ионизирующих излучений существенно отошли от проектных [2], что вызвало необходимость проводить реабилитационные работы данных объектов с учетом реально сложившейся на тот период времени радиационной обстановки. Для решения данной задачи на основании анализа проектных документов по реабилитации территории объектов СевРАО и ДальРАО, результатов радиационного контроля, проводимого службой радиационной безопасности предприятий, и на основании материалов собственных исследований были разработаны и внедрены:

1. Руководство Р-ГТП СевРАО-07 «Гигиенические требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при проектировании и организации работ с ОЯТ и РАО в Филиале № 1 СевРАО», в котором содержатся санитарно-гигиенические и организационные требования к проектированию технологических зданий и объектов инфраструктуры, необходимых для осуществления безопасного хранения, транспортирования и вывоза радиоактивных веществ и ядерных материалов,
2. Руководство Р 2.6.1.065–2012 «Обеспечение радиационной безопасности и оптимизации защиты персонала СевРАО и ДальРАО при обращении с ОЯТ и РАО» (Р-СевРАО-ДальРАО-12). Руководство содержит санитарно-гигиенические и организационные требования по обеспечению радиационной безопасности персонала при планировании и проведении работ по вывозу ОЯТ, хранению РАО и экологической реабилитации ПВХ, расположенных на территории СевРАО и ДальРАО. В Руководстве учтены результаты работ по нормализации радиационной обстановки и изменения в инфраструктуре на объектах СевРАО.

Совершенствование нормативно-методической базы обеспечения безопасности

при долговременном хранении реакторных отсеков утилизированных АПЛ и блок-упаковок судов АТО

Ускорение темпов утилизации АПЛ, выведенных из состава ВМФ, в соответствии с Концепцией национальной безопасности Российской Федерации (Указ Президента РФ от 10.01.2000 № 24) отнесено к приоритетной деятельности государства в экологической сфере [3].

В настоящее время создана инфраструктура для хранения реакторных блоков утилизированных АПЛ и блок-упаковок судов АТО, построены пункты долговременного хранения реакторных отсеков на Дальнем Востоке (пункт долговременного хранения реакторных отсеков (РО) «Устричный») и в Северо-Западном регионе (пункт долговременного хранения «Сайда»).

Реакторный блок (РБ) представляет собой герметичную упаковку, которая включает либо РО АПЛ с двумя смежными отсеками, либо один РО. РБ формируется

при проведении работ по утилизации АПЛ и предназначен для транспортирования и последующего хранения.

Блок-упаковка представляет собой герметичную упаковку, сформированную в процессе утилизации судна атомного технологического обслуживания и подготовленную к долговременному хранению на твёрдом основании. Блок-упаковка содержит вырезанную из корпуса судна часть с находящимся в ней радиоактивным содержимым – оборудованием и конструкциями корабля, дополнительно загруженными твердыми радиоактивными отходами.

В Дальневосточном регионе в настоящее время разделка АПЛ и формирование трёхотсечных блоков реакторных отсеков осуществляется на территории «Дальневосточного завода «Звезда», расположенного в городе Большой Камень Приморского края. Временное хранение на плаву трёхотсечного РБ, разделка его на одноотсечный блок и последующее хранение одноотсечного блока производятся на территории пункта долговременного хранения реакторных блоков Центра по обращению с радиоактивными отходами – отделение Фокино Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами, расположенного в бухте Разбойник ЗАТО Фокино Приморского края (рис. 1, 2).

На основании исследования радиационной обстановки в местах «сухого» хранения реакторных блоков утилизируемых АПЛ и долговременного хранения блок-упаковок судов АТО на территории ДВЦ «ДальРАО» и СЗЦ «СевРАО», были разработаны и внедрены:

1. Руководство Р 2.6.5.083-2015 «Обеспечение радиационной безопасности при хранении реакторных блоков утилизируемых атомных подводных лодок».
2. Методические указания МУ 2.6.5.044-2020 «Обеспечение радиационной безопасности персонала при долговременном хранении реакторных отсеков утилизируемых атомных подводных лодок и блок-упаковок судов атомного технологического обслуживания».

Данные документы регламентируют санитарно-гигиенические и организационные требования по обеспечению радиационной безопасности персонала при долговременном хранении реакторных отсеков утилизиро-

ванных АПЛ и блок-упаковок судов АТО и предназначены для эксплуатирующих организаций, а также для использования органами исполнительной власти, уполномоченными осуществлять федеральный государственный санитарно-эпидемиологический надзор.

Совершенствование нормативно-методической базы обеспечения безопасности при проведении работ по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО

Жизненный цикл любого судна после его эксплуатации завершается утилизацией. Утилизация НК с ЯЭУ, АПЛ и судов АТО включает в себя совокупность организационно-технологических мероприятий по выводу их из состава флота, выгрузке отработанного ядерного топлива и/или радиоактивных отходов, отправке их на переработку, хранение и/или захоронение, резке и переработке корпусных конструкций и оборудования корабля и пр.

Основными проблемами утилизации перечисленных судов в настоящее время являются отсутствие опыта проведения подобных работ, а также дефицит необходимой нормативной, проектной и технологической документации для обеспечения процесса утилизации.

Отличительными особенностями утилизации надводных кораблей, по сравнению с АПЛ, являются:

- необходимость демонтажа на плаву чистого оборудования, расположенного на верхней палубе и выше, а также внутри чистых помещений;
- необходимость демонтажа на плаву оборудования и металлоконструкций, расположенных на верхней палубе надводного корабля и выше, имеющих радиоактивные загрязнения, и передача их в хранилище ТРО;
- необходимость разделки на фрагменты металлоконструкций и оборудования помещений контролируемой зоны (рис. 3);
- возможность вырезки РО и разделки чистых оконечностей корабля на крупные секции только в доках, соответствующих габаритам и доковому весу утилизируемых надводных кораблей (рис. 4);
- более сложный комплекс работ по вырезке РО, связанный со значительными размерами РО.

Основными технологическими процессами, влияющими на условия труда персонала, являются работы по формированию блоков РО утилизируемых АПЛ, при этом наиболее опасными из них те работы, которые проводятся на этапах перед установкой биологической защиты на блок РО.

Значения мощности амбиентного эквивалента дозы от наружной поверхности блоков РО в некоторых точках превышали установленные нормативы до 10 раз, при



Рис.1. «Сухое» хранение реакторных отсеков АПЛ
Fig.1. "Dry" storage of nuclear submarine reactor compartments

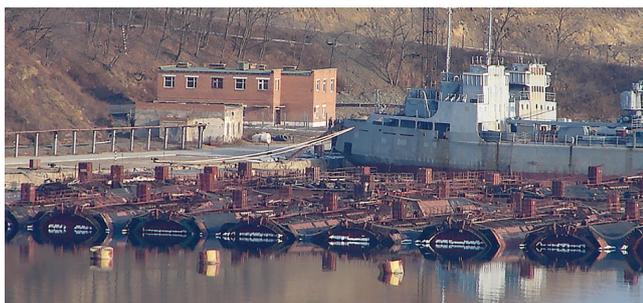


Рис.2. Хранение реакторных отсеков АПЛ «на плаву»
Fig.2. Storage of nuclear submarine reactor compartments "afloat"

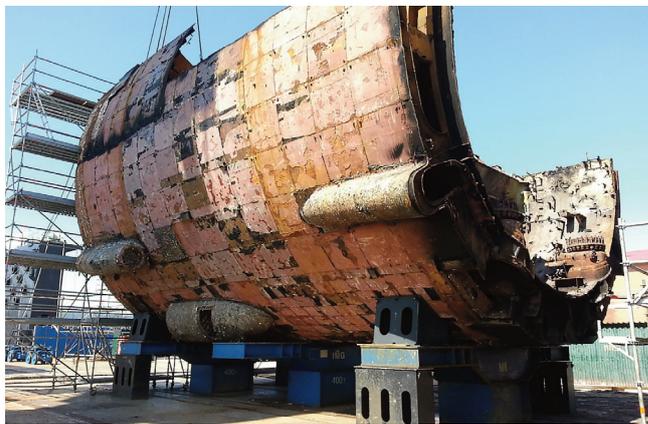


Рис.3. Фрагментация корпуса АПЛ
Fig.3. Fragmentation of the submarine hull



Рис.3 Фрагментация корпуса АПЛ
Fig. 3 Fragmentation of the submarine hull

этом загрязнения поверхностей альфа- и бета-излучателями не зафиксировано. Индивидуальные эффективные дозы облучения персонала формируются за счет радиационного воздействия от закрытых источников гамма-излучения (РО утилизируемых АПЛ), основным дозоформирующим радионуклидом является ^{137}Cs [4].

Наибольшие значения индивидуальной эффективной годовой дозы облучения (до 10,2 мЗв/год) были зарегистрированы у категорий персонала, принимающих участие в работах по разделке блоков реакторных отсеков, демонтажу легкого корпуса, а также в подготовке блока реакторных отсеков к дополнительной герметизации.

На основании исследования радиационной обстановки и условий труда персонала на судоремонтных заводах, осуществляющих комплекс работ по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО, были разработаны и внедрены:

1. Руководство Р 2.6.5.064-16 «Радиационно-гигиенические требования к утилизации судов атомно-технологического обслуживания»;
2. Методические указания МУ 2.6.5.064 – 2017 «Гигиенические и медицинские требования к обеспечению безопасных условий труда при утилизации надводных кораблей с ядерной энергетической установкой и судов атомного технологического обслуживания»;
3. Методические рекомендации МР 11.065–2017 «Совершенствование медицинского обеспечения работников предприятий, осуществляющих утилизацию атомных подводных лодок и судов АТО»;
4. Методические указания МУ 2.6.5.043–2019 «Требования к радиационному контролю при проведении работ по утилизации АПЛ, надводных кораблей с ядерной энергетической установкой и судов АТО»;
5. Руководство Р 2.6.5.042–2019 «Обеспечение радиационной безопасности персонала при утилизации надводных кораблей с ядерной энергетической установкой».

Итоговым документом, объединяющим обязательные гигиенические и организационные требования по обеспечению современного уровня радиационной безопасности персонала при проведении работ по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО, является разработанный в 2020 г. на завершающем этапе работ по ФЦП «Промышленная утилизация вооружения и военной техники ядерного комплекса на 2011–2015 годы и на период до 2020 года» проект санитарных правил «Обеспечение радиационной безопасности персонала при утилизации атомных подводных лодок, надводных кораблей с ядерными энергетическими установками и судов атомного технологического обслуживания», выход которых запла-

нирован на 2021 г. Проект санитарных правил разработан в соответствии с поручением Председателя Правительства Российской Федерации (№ ДМ-П 36-4534 от 03.06.2019 г.) о реализации механизма «регуляторной гильотины», основной целью которого в области санитарно-эпидемиологического благополучия и обеспечения радиационной безопасности является анализ действующих нормативно-правовых актов с целью исключения имеющихся противоречий и введения только тех требований, несоблюдение которых приводит к негативным последствиям для здоровья персонала радиационных объектов.

Проект санитарных правил содержит санитарно-гигиенические требования:

- к проектной документации по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО;
- к предпрятию-исполнителю работ по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ, судов АТО;
- к проведению работ по утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО;
- к обращению с материалами и изделиями, загрязненными радионуклидами;
- к обеспечению радиационной безопасности при обращении с радиоактивными отходами;
- к радиационному контролю;
- к обеспечению радиационной безопасности в случае возникновения радиационной аварии;
- к мероприятиям по охране окружающей среды.

С введением разработанных Санитарных правил практически будет завершено создание комплексной системы нормативно-методического, санитарно-гигиенического и медицинского обеспечения сохранения здоровья и снижения уровня заболеваемости персонала, участвующего в работах по утилизации атомных объектов морской техники.

Заключение

Одним из основных направлений реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности определено совершенствование нормативно-правовой базы.

В ходе выполнения ФЦП «Промышленная утилизация вооружения и военной техники ядерного комплекса на 2011–2015 годы и на период до 2020 года» специалистами Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна ФМБА России и Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины ФМБА России были проведены исследования по изучению и оценке радиационной обстановки и условий труда персонала на объектах, задействованных в процессах утилизации АПЛ, НК с ЯЭУ и судов АТО.

На основании проведенных исследований была разработана комплексная система нормативно-методического, санитарно-гигиенического и медицинского обеспечения сохранения здоровья и снижения уровня заболеваемости персонала, участвующего в работах по выводу из эксплуатации и последующей утилизации атомных объектов морской техники.

Разработанные нормативно-методические документы содержат санитарно-гигиенические и организационные требования по надзору за обеспечением радиационной безопасности при проведении работ по утилизации АПЛ, судов АТО и НК с ЯЭУ и хранении реакторных отсеков утилизируемых АПЛ и блок-упаковок судов АТО и направлены на дальнейшее совершенствование нормативно-правового и методического обеспечения прав граждан на безопасные условия труда, охрану здоровья и социальную защиту.

Enhancing the Regulatory Support of Occupational Radiation Protection during Decommissioning and Dismantling of Ships with Nuclear Power Installations and Nuclear Service Vessels

A.V. Simakov¹, D.V. Arefeva², Y.V. Abramov¹, N.L. Proskuryakova¹, I.A. Kemskiy³, A.A. Shayahmetova²

¹A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

²Scientific Research Institute of Industrial and Marine Medicine Saint-Petersburg, Russia

³Inter-Regional Management No 120 (IRM-120), Snezhnogorsk, Murmansk Region, Russia

Contact person: Yuri Viktorovich Abramov: abramov-1948@yandex.ru

ABSTRACT

Results: Information is provided on the developed regulatory and methodological documents including health physics and organizational requirements for the radiation safety and protection supervision in the course of work on decommissioning and dismantling of nuclear submarines, nuclear service ships and surface vessels with nuclear installations, as well as during storage of reactor compartments of decommissioned nuclear submarines and block packs of nuclear service ships.

Conclusion: The developed documents are aimed at further improving the regulatory legal and methodological support of citizens' rights to safe working conditions, health protection and social protection.

Key words: nuclear submarines, surface ships with nuclear installations, decommissioning, dismantling, radiation situation, normative documents

For citation: Simakov AV, Arefeva DV, Abramov YV, Proskuryakova NL, Kemskiy IA, Shayahmetova AA. Enhancing the Regulatory Support of Occupational Radiation Protection during Decommissioning and Dismantling of Ships with Nuclear Power Installations and Nuclear Service Vessels. Medical Radiology and Radiation Safety 2021;66(4):37-41.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-37-41

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Симаков А.В., Кочетков О.А., Абрамов Ю.В., Васюхно В.П., Нетеча М.Е. Проблемы обеспечения радиационной безопасности в нестандартных условиях. // В сб. Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы обеспечения радиационной безопасности населения». С-Петербург. 2006. С. 71–73.
2. Simakov AV, Kocetkov OA, Abramov YV. Special Features of Operation of SNF and RW Sites of Temporary Storage at Sevrao Facilities № 1 and № 2. // In. Internat. Conf. «Radioecology and Environmental Radioactivity». Bergen, Norway, 2008. P. 75–77.
3. Иойрыш А.И., Козодубов А.А., Маркаров В.Г., Терентьев В.Г., Чопорняк А.Б. Нормативное правовое обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов атомного флота России. М.: Наука, 2008. 204 с.
4. Иванченко А.В., Натха С.В., Шаяхметова А.А., Арефьева Д.В. Исследование факторов, влияющих на формирование радиационной обстановки при утилизации атомных объектов морской техники. // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 4. С. 19–22

REFERENCES

1. Simakov AV, Kochetkov OA, Abramov YV, Vasuchno VP, Netecha ME. Problems in Radiation Safety Assuring Under Abnormal Conditions. In Internat. Sci. Pract. Conf. "Current Challenges in Public Radiation Protection" St.-Petersburg, 2006: 71-73. (In Russian).
2. Simakov AV, Kocetkov OA, Abramov YV. Special Features of Operation of SNF and RW Sites of Temporary Storage at Sevrao Facilities № 1 and № 2. In. Internat. Conf. «Radioecology and Environmental Radioactivity». Bergen, Norway, 2008:75-77.
3. Ioyrysh AI, Kozodubov AA, Markarov BG, Chopornyak AB. Regulatory and Legal Support of Safety during Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities of the Russian Nuclear Fleet. Moscow, Nauka Publ, 2008. 204 p. (In Russian).
4. Ivanchenko AV, Natha SV, Shayahmetova AA, Arefeva DV. Investigation of Factors Impacting on the Radiation Situation Generation During the Decommissioning and Dismantling of Nuclear Marine Technological Vessels Radiation Hygiene. 2013.6(4):19-22 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 23.12.2020. Принята к публикации: 20.01.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 23.12.2020. Accepted for publication: 20.01.2021.

Т.Н. Лашенцова^{1,3}, Л.Э. Карл^{2,3}, А.М. Маренный²

РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НА ПОТЕНЦИАЛЬНО РАДОНООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

¹Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва.² Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России, Москва³Российский университет дружбы народов, Москва

Контактное лицо: Лидия Эдуардовна Карл: lidiakarl@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Современные радиозоологические исследования по оценке влияния естественной радиации на организм человека показали, что на данный момент развития общества основной вклад в облучение населения вносят природные источники ионизирующего излучения, при этом из них от 50 до 90 % дозовой нагрузки обусловлены газом радон-222 (^{222}Rn) и дочерними продуктами его распада (ДПР).

В данной работе представлены результаты радиационно-гигиенического мониторинга потенциально радоноопасной территории города Балей Забайкальского края. Измерение объемной активности радона (OAR_n) проводили в помещениях жилых и общественных зданий интегральным методом с помощью трековых экспозиметров РЭИ-4. По показателю эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОAR_n) проводили радиационно-гигиеническую оценку помещений и расчет потенциальных дозовых нагрузок на население, проживающее на этой территории.

Исследования показали, что OAR_n в помещениях жилых и общественных зданий зависит от геологической характеристики территории, от конструкции и проекта зданий и сооружений, от используемых строительных материалов. Установили, что основным критерием для оценки потенциальной радоноопасности территорий является величина OAR_n в помещениях на первых этажах зданий. Территорию города Балей по степени потенциальной радоноопасности можно поделить условно на 3 типа: 1 тип – территория, расположенная на геологическом разломе; 2 тип – южная часть территории города, представленная осадочными горными породами; 3 тип – северная часть территории города, представленная горными породами габброидной группы основного состава с низким содержанием природных радионуклидов. Типы зданий и сооружений и вид строительных материалов влияют на дозовую нагрузку, но не определяют её.

Ключевые слова: радон-222, объемная активность, ЭРОА, потенциальная радоноопасность территорий, категорирование территорий, жилые и общественные здания, объекты ядерного наследия

Для цитирования: Лашенцова Т.Н., Карл Л.Э., Маренный А.М. Радиационно-гигиенический мониторинг на потенциально радоноопасных территориях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С. 42–50.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-42-50

Введение

Защита населения от негативного воздействия ионизирующих излучений является важной экологической задачей. Эпидемиологические исследования, проводимые в ряде стран мира по радиационному обследованию территорий, при нормальной эксплуатации радиационно-опасных объектов, показали, что радиационный фон территорий формируется в основном за счет природных источников ионизирующего излучения и остаточного содержания техногенных радионуклидов после испытания ядерного оружия и крупных ядерных аварий. Наибольший вклад в облучение населения вносят природные источники ионизирующего излучения, основным из которых является газ радон (^{222}Rn) [1].

На территориях проживания населения ^{222}Rn может попадать в помещения несколькими путями: из геологических разломов, из грунта под зданием, из строительных материалов, а также с подземными водами, которые могут использоваться для систем водоснабжения населения [2, 3].

^{222}Rn – природный радиоактивный газ, который образуется при распаде ядер атомов природных радионуклидов $^{235,238}\text{U}$, ^{226}Ra , ^{232}Th , входящих в структуру минералов, составляющих горные породы. Минеральная составляющая различается в зависимости от происхождения горных пород. Ввиду химической инертности газ ^{222}Rn покидает кристаллическую решетку и мигрирует из почвы, распространяется и попадает в подземную воду, приземный слой атмосферного воздуха, замкнутые пространства, где накапливается, так как он тяжелее воздуха, и далее он может поступать в здания [4].

В России более 50 лет ведется активное обследование территорий субъектов РФ на содержание ^{222}Rn в помещениях общественных и жилых зданий разными организациями, такие работы проводятся и в структуре ФМБА России, в том числе на базе НТЦ РХБГ и ФМБЦ им. А.И. Бурназяна [5 – 8]. Эти исследования позволили выявить территории, которые характеризуются повышенным

содержанием ^{222}Rn , и соответственно, являются потенциально радоноопасными для проживания населения. На территории РФ такие территории расположены на Алтае, в Забайкалье, на Северном Кавказе, в Северо-Западном регионе и других регионах.

Важной и актуальной задачей на потенциально радоноопасных территориях является выявление всех факторов, влияющих на содержание ^{222}Rn в помещениях жилых и общественных зданий, которые позволят оценить уровень облучения населения при принятии решений для защиты населения.

Целью данной работы является проведение радиационно-гигиенического мониторинга на потенциально радоноопасной территории.

В качестве объекта исследования выбрали территорию города Балей Забайкальского края, где и проводился локальный мониторинг. Детальное обследование помещений, находящихся в жилых и общественных зданиях позволили по показателю эквивалентной равновесной объемной активности радона (ЭРОAR_n) дать радиационно-гигиеническую оценку помещений и оценить потенциальных дозовых нагрузки на население, проживающее на этой территории. Полученные данные позволили предложить критерии оценки потенциальной радоноопасности территорий, которые можно использовать и на других территориях.

Материал и методы

Для измерения объемной активности радона (OAR_n) в помещениях жилых и общественных зданий использовали интегральный метод. Принцип метода заключается в регистрации альфа-частиц, которые образуются при распаде ядер ^{222}Rn и его ДПР, с помощью твердотельных трековых детекторов [9].

Отбор проб воздуха проводили с помощью пассивных пробоотборных камер (экспозиметры) с трековыми детекторами типа LR-115-2. Детекторы помещают в пробо-

отборные камеры. После выдержки в помещении в течение определенного времени, которое зависит от предполагаемой нагрузки, их извлекают, проводят химическую обработку травлением, затем подсчитывают количество зарегистрированных следов (треков) альфа-частиц электроискровым методом с помощью электро-искрового счетчика треков АИСТ-4 из комплекта аппаратуры ТРЕК-РЭИ-1М [10, 11].

В качестве критерия оценки использовали среднегодовую эквивалентную равновесную объемную активность радона ($ЭРОА_{Rn}$), значение которой не должно превышать 200 Бк/м^3 в эксплуатируемых жилых помещениях согласно п. 5.3.3. НРБ-99/2009 [12].

Среднегодовое значение $ЭРОА_{Rn}$ рассчитывали по измеренной $ОА_{Rn}$ в холодное и теплое время года, согласно требованиям МУ 2.6.1. 037-2015 [13]. Для перехода от измеренных значений $ОА_{Rn}$ к $ЭРОА_{Rn}$ использовали значение коэффициента равновесия, равное 0,5.

Расчет индивидуальной среднегодовой эффективной дозы внутреннего облучения (СЭГД) для населения проводили по методике МУ 2.4.1.1088-02 [14].

Результаты

В качестве объекта исследования выбрали территорию города Балей Забайкальского края. Балей – небольшой город, большинство зданий старых лет постройки, с малой этажностью, которые строились во время интенсивной техногенной деятельности на этой территории.

Город Балей расположен у южного подножия Борщовочного хребта, на правом берегу реки Унды, в 350 км к юго-востоку от города Читы. В настоящее время в городе проживает около 11 тыс. человек. С 1853 г. в черте города велась золотодобыча из россыпей. В 1929 г. в окрестностях села Новотроицкое открыто Балейское месторождение золота. В 1948 г. начата разработка Тасеевского золоторудного месторождения. В пределах Балейского рудного района находятся три горных предприятия, в том числе рудник «Балей», рудник «Тасеево», Ундинский прииск, участки Явленка, Каменка, Казаковский, Алия, Средний Голготай, две золотоизвлекательные фабрики, ГРЭ и др. вспомогательные производства. Балейское и Тасеевское месторождения обрабатывались подземными горными выработками и карьерами. Отработка россыпных месторождений велась 7 крупнолитражными драгами. В 1995 г. рудная добыча золота прекращена. На этой же территории также проводилась добыча тория из монацитовых песков. В результате эксплуатации месторождений образовались отвалы вскрышных пород, карьеры, хвостохранилища, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду [15]. Исторически накопилась большая масса флотационных золотосодержащих рудных хвостов (илов), с высоким содержанием тория-232, которые складировались в два хвостохранилища в черте города на берегу реки Унда [17]. Все отвалы имеют повышенное содержание природных радионуклидов [16, 17].

Была разработана программа мониторинга на данной территории. Схему и организацию выборочного обследования формировали в соответствии с [18]. Объем выборки для обследуемых помещений в жилых квартирах и односемейных жилых домах определяли из расчета не менее 1 % от их общего числа в населенном пункте. При этом учитывали этажность здания, тип межэтажных перекрытий (деревянные, кирпичные, шлакоблочные и др.), а также наличие подвалов под зданием и другие характеристики, которые заносили в паспорта измерений, далее все данные заносили в базу данных и формировали запросы для анализа данных [10, 11].

Обследование помещений проводили в зданиях в режиме их штатной эксплуатации в два периода времени

года: в теплый летний период и в отопительный период. В помещениях экспозиметры размещались на высоте 1 – 2 м от пола, вдали от окон, отопительных и иных приборов [10, 11].

Всего провели обследование 251 здания, из них 14 – детские сады и школы, 5 – медицинские учреждения, 37 – иные учреждения, 195 – жилые дома, в которых обследовали 1348 помещений: 767 – в отопительный, 581 – в теплый периоды. По результатам обследования получили данные по удельной $ОА_{Rn}$ в помещениях общественных и жилых зданий.

Результаты измерений

По данным $ОА_{Rn}$ была рассчитали $ЭРОА_{Rn}$, как основной нормируемый показатель. Проведена соответствующая статистическая обработка полученных значений $ЭРОА_{Rn}$, рассчитаны параметры распределения, которые приведены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что в помещениях жилых и общественных зданий на территории г. Балей для $ЭРОА_{Rn}$ при нормативном значении 200 Бк/м^3 :

- все значения СГ и медианы не превышают норматив;
- значения СА превышают норматив на 1-ых этажах как в теплый, так и в отопительный периоды;
- максимальное значение на 1-ом этаже выше норматива в ~10 раз;
- наибольшие значения СА, СГ, медианы – на 1-ом этаже;
- количество превышений норматива на 1-ых этажах равно 255 шт, что составляет ~ 65 % от общего числа превышений на всех этажах (392 шт.);
- процент превышений норматива на всех этажах – 29 %, из них: на 1-ых этажах – 34 %, на 2-ых этажах – 25 %, на 3-их этажах – 19%, на 4-ых этажах – нет;
- границы доверительного интервала в отопительном и теплом периоде пересекаются, следовательно, различие значений $ЭРОА_{Rn}$ между периодами статистически не значимо.

Анализ табл. 1 показывает, что основное превышение $ЭРОА_{Rn}$ имеет место в помещениях, расположенных на 1-ых этажах зданий. Чтобы установить факторы, которые влияют на повышенные значения $ЭРОА_{Rn}$ в этих помещениях, провели дальнейшее исследование.

Превышения $ЭРОА_{Rn}$ на первых этажах могут быть связаны с геологическими особенностями территории, поэтому провели исследование по выявлению зависимости $ЭРОА_{Rn}$ от геологической характеристики территории.

Характеристика территории по степени потенциально радоноопасности в зависимости от геологических особенностей территории

Скорость эксгаляции радона с поверхности земной коры определяется геологическим строением территории, зависит от содержания природных радионуклидов в горных породах, от дисперсности горных пород, определяется тектоническими разломами земной коры и/или геодинамически активными зонами на территории.

Прежде всего, выход радона на территории зависит от содержания природных радионуклидов в горных породах, которые входят в структуру минералов слагающих почв. Рассмотрим содержание природных радионуклидов в разных типах горных пород. В табл. 2 представлено массовое содержание урана, тория в разных типах горных пород [19].

Из табл. 2 видно, что содержание урана-238 в изверженных горных породах, таких как граниты, гранодиориты, колеблется от 2,2 до $6,1 \times 10^{-6}$ г/т. Габбро содержит $0,8 \times 10^{-6}$ г/т, базальты – $0,1 - 1 \times 10^{-6}$ г/т. Метаморфические горные

Таблица 1

Параметры распределения среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности ^{222}Rn в помещениях жилых и общественных зданий на территории г. Балеи, n=1348, шт
Distribution parameters of the average annual equivalent equilibrium volumetric activity (EEVA) of ^{222}Rn in the premises of residential and public buildings on the territory of Baley, n = 1348

Этаж	Сезон	Параметры распределения значений ЭРОА _{Rn}								
		N	CA	CG	CO	Медиана и границы ее доверительного интервала*	Мин.	Макс.	Превышение 200 Бк/м ³	
Ед. измерения		шт	Бк/м ³	Бк/м ³	—	Бк/м ³	Бк/м ³	Бк/м ³	%	шт
1	ТП	364	213	131	279	123 (94 – 151)	9	2087	32	116
	ОП	393	243	135	298	121 (92 – 150)	6	1868	35	139
	Всего	757	228	133	289	122 (101 – 143)	6	2087	34	255
2	ТП	190	155	105	161	111 (89 – 134)	13	1102	25	48
	ОП	273	169	104	198	91 (68 – 114)	10	1130	25	69
	Всего	463	163	104	184	98 (81 – 115)	10	1130	25	117
3	ТП	23	74	62	43	70 (52 – 88)	21	199	0	0
	ОП	83	131	101	95	98 (78 – 118)	19	439	24	20
	Всего	106	119	91	89	86 (69 – 103)	19	439	19	20
4	ТП	4	30	30	4	30 (26 – 34)	30	34	0	0
	ОП	18	51	49	11	52 (47 – 57)	15	69	0	0
	Всего	22	47	45	13	48 (43 – 53)	15	69	0	0
Итого	ТП	581	187	117	243	114 (94 – 134)	9	2087	28	164
	ОП	767	200	116	250	99 (81 – 117)	6	1868	30	228
	Всего	1348	194	117	247	108 (95 – 121)	6	2087	29	392

Примечание: ТП – теплый период; ОП – отопительный период; CA – среднее арифметическое; CG – среднее геометрическое; CO – стандартное отклонение.

* – при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница

породы, такие как гранулиты, содержат $4,9 \times 10^{-6}$ г/т урана-238, и 21×10^{-6} г/т тория-232. Гнейсы содержат 2×10^{-6} г/т урана-238 и от 5 до 27×10^{-6} г/т тория-232. Содержание урана-238 и тория-232 в осадочных горных породах колеблется в широких пределах от $1 - 2 \times 10^{-6}$ г/т в торфе и известняках до 1250×10^{-6} г/т в глинистых сланцах.

В аллювиальных отложениях концентрируются минералы, устойчивые к физическому и химическому выветриванию, такие как монацит, фергусонит, эвксенит, колумбит, циркон, сфен, апатит и т.д. Удельное содержание тория-232 в таком минерале, как монацит, может достигать 9000 Бк/кг [12]. Поэтому такие аллювиальные отложения являются потенциально радоноопасными. На территориях, имеющих в составе горных пород такие минералы, как браннерит, гадолинит, клеветит, монацит, торит, эвксенит и др., удельное содержание тория-232 может колебаться от 700 до 9000 Бк/кг.

Территории, расположенные на основных и ультраосновных магматических горных породах, имеющих в своем составе минералы плагиоклаз, пироксен и другие, содержат незначительное количество природных радионуклидов уран-238 и торий-232, которые колеблются в интервалах от 6 до 12 Бк/кг. Потоки радона на таких территориях невелики, определяются содержанием радия-226 и

тория-232, и как правило имеют средние значения, которые существенно не отличаются от региональных значений.

Территории, расположенные на горных породах, таких как граниты, глины, сланцы, песчаники, содержащие минералы уранинит, алланит, циркон, карнолит, казолит, браннерит, гадолинит, клеветит, монацит, торит, эвксенит, могут содержать высокую концентрацию урана-238, тория-232 и радия-226, соответственно потоки радона на таких территориях повышенные.

На эманирование радона из почвы влияет дисперсность горных пород, которая достаточно сильно различается. Высокую скорость эманации радона имеют территории, сложенные легкопроницаемым гравийно-песчаным материалом, ледниковыми отложениями, гранитоидами.

Возникновение эманационных аномалий также тесно связано с тектоническими разломами земной коры и/или геодинамически активными зонами. Потоки радона на такой территории существенно зависят от типа разломов различного происхождения, высокие концентрации радона над тектоническими разломами связаны высокой проницаемостью в результате роста крупных трещин, что приводит к увеличению выделения радона с поверхности. Поэтому территории с разрывными нарушениями земной коры являются потенциально радоноопасными за счет высокой скорости эманирования.

Таблица 2

Содержание урана и тория в горных породах (по P. Vesterbacka, 2005), г/т
Content of uranium and thorium in rocks (after P. Vesterbacka, 2005), gpt

Горные породы		^{238}U , 10^{-6} г/т	^{232}Th , 10^{-6} г/т
Изверженные	Граниты, Гранодиориты, Риолиты	2,2 – 6,1	8 – 33
	Габбро	0,8	3,8
	Базальты	0,1 – 1	0,2 – 5
Метаморфические	Гранулиты	4,9	21
	Гнейсы	2,0	5 – 27
	Сланцы	2,5	7,5 – 19
Осадочные	Глинистые сланцы	3 – 1250	–
	Бокситы	11,4	49
	Фосфориты	50 – 300	1 – 5
	Торф	1 – 12	1 – 5
	Известняки	2	0 – 2,4

Поэтому, исходя из геологического строения, любую территорию условно можно поделить, с точки зрения потенциальной радоноопасности, на 3 части:

- Тип 1 – есть геологический разлом, скорость эксхалляции радона-222 зависит от типа разлома, имеет повышенные потоки радона;
- Тип 2 – территории, расположенные на песчано-галечных и глинистых отложениях, с повышенным содержанием природных радионуклидов урана-238 и тория-232, сопровождается повышенными потоками радона;
- Тип 3 – территории, расположенные на магматических горных породах основного состава, характеризуются низким содержанием природных радионуклидов в минеральной составляющей, фоновыми потоками радона, соответствующими региональным значениям.

Характеристика территории г. Балеи по степени потенциально радоноопасности в зависимости от геологических особенностей

Проведена характеристика территории г. Балеи по степени потенциально радоноопасности в зависимости от предложенного типа территории. Изучено геологическое строение территории г. Балеи, для этого использовали каталог геологических карт Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского [20].

Геологическое строение территории г. Балеи характеризуется наличием горных пород разного происхождения – осадочных и магматических. Осадочные горные породы представлены аллювиальными отложениями неоплейстоценовой эпохи в виде песчано-галечного материала и глинами. Магматические представлены интрузивными горными породами основного состава из группы габброидов раннего протерозоя. Территорию города разделяет разрывное нарушение земной коры по направлению с северо-запада на юго-восток. Геологическую структуру территории определяют отложения с минералом монацитом, содержащим в составе природный радионуклид торий-232. Южная часть г. Балеи представлена аллювиальными песчано-галечными и глинистыми отложениями в результате действия реки Унда, где происходит аккумуляция обломочного мате-

риала с монацитом. Поэтому на этой территории главным источником поступления радона являются намывные отложения, с повышенным содержанием тория-232. Кроме того, на территории г. Балеи есть разрывное нарушение земной коры.

Поэтому с точки зрения потенциальной радоноопасности территория г. Балеи, исходя из геологического строения, существенно различается, но соответствует тому условному делению территории на 3 части, которое предложено авторами в этой статье.

На рис. 1 показана геологическая характеристика территории г. Балеи [Рутштейн И.Г., 2000], где показана линия прохождения геологического разлома 1, территория 2 с аллювиальными отложениями в районе реки Унда, и территория 3, представленная магматическими горными породами основного состава из группы габброидов раннего протерозоя.

На карте на рис.1 нанесены точки отбора проб в помещениях и зоны деления территории. Все эти характеристики позволили разделить территорию на три части, которые были нанесены на карту:

- территория 1, относится к типу 1, где есть геологический разлом, с повышенным выделением ²²²Rn;
- территория 2, относится к типу 2, расположена на аллювиальных песчано-галечных и глинистых отложениях, с повышенным содержанием природных радионуклидов (южная часть), сопровождаются повышенными потоками ²²²Rn;
- территория 3, относится к типу 3, расположена на горных породах габброидной группы основного состава с фоновым содержанием природных радионуклидов (северная часть).

Проведена статистическая обработка данных значений ЭРОА_{Rn} в зависимости от типа территории. Параметры распределения ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий в зависимости от типа территории представлены в табл.3.

Из табл. 3 видно, что для ЭРОА_{Rn} в помещениях на первых этажах:

- значения медианы и ее доверительных интервалов, СГ на территориях всех типов не превышают норматив 200 Бк/м³;
- значение СА превышает норматив 200 Бк/м³ на территории 2-го типа;

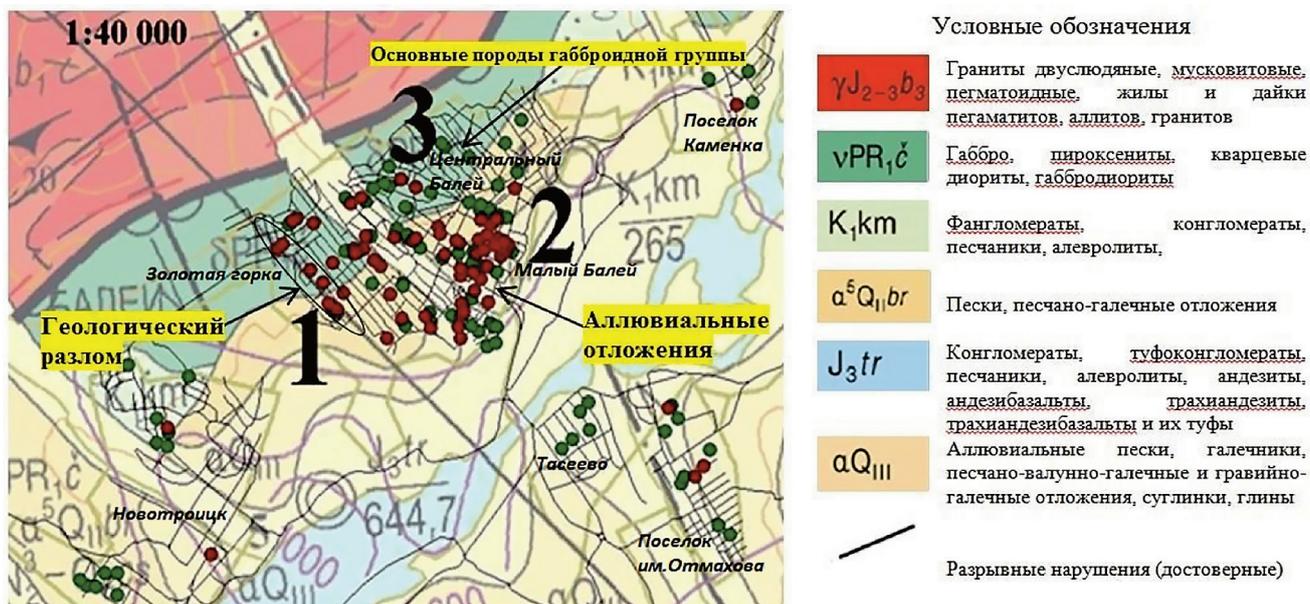


Рис.1. Геологическая карта г. Балеи (Рутштейн И.Г., 2000)
Fig. 1. Geological map of Baley (Rutshtein I.G., 2000)

Таблица 3

Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} на первых этажах зданий в зависимости от типа территории
Parameters of distribution of EEVA_{Rn} values on the first floors of buildings depending on the type of territory

Тип территории	Параметры распределения значений ЭРОА _{Rn}									
	N	СА	СГ	СО	Медиана и границы ее доверительного интервала*	Мин.	Макс.	Превышения 200 Бк/м ³		
Ед. измерения	шт	Бк/м ³	Бк/м ³	–	Бк/м ³	Бк/м ³	Бк/м ³	%	шт	
1 Тип	122	167	125	135	122 (98 – 145)	9	690	29	35	
2 Тип	514	267	150	332	135 (106 – 164)	6	2087	39	201	
3 Тип	38	73	61	49	71 (56 – 86)	15	270	3	1	

Примечание: СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение.

*– при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница

- меньшее значение медианы и СА расположены на территории 3-го типа;
- максимальные значения на территориях всех типов превышают норматив 200 Бк/м³, превышения на территориях 1-го и 2-го типа составляют 29 и 39 % соответственно, а на территории 3-го типа – 3 %;
- максимальные значения на территории 1-го типа превышают норматив в 3,5 раза, на территории 2-го типа – в 10 раз, на территории 3-го типа – 1,4 раза.

Зависимость содержания радона на первых этажах от строительных материалов

В табл. 4 представили значения ЭРОА_{Rn} в помещениях на первых этажах во всей выборке в зависимости от строительных материалов, которые представлены деревянными, кирпичными и шлакоблочными зданиями.

Значения ЭРОА_{Rn} в деревянных, кирпичных и шлакоблочных зданиях распределяются следующим образом:

- значения медианы и ее доверительных интервалов, СА, СГ в деревянных, кирпичных зданиях на всех этажах не превышает норматив 200 Бк/м³;
- значение СА, медианы и ее доверительных интервалов на первых и вторых этажах в шлакоблочных зданиях превышают норматив 200 Бк/м³;
- превышение норматива на 1-ых этажах деревянных, шлакоблочных, кирпичных зданий составляет 24, 59, 26 % соответственно;
- превышения нормативного показателя на 2-ых этажах деревянных зданий нет, на вторых и третьих этажах шлакоблочных зданий превышение составляет 52 и 14 % соответственно, а кирпичных зданий – 12 и 20 % соответственно;
- максимальное значение ЭРОА_{Rn} составляет 2087 Бк/м³, было выявлено в помещении на первом этаже шлако-

блочного здания и превышает норматив в 10 раз; максимальное значение ЭРОА_{Rn} на втором этаже шлакоблочного здания превышает норматив в 5,6 раза; на третьем этаже – в 1,5 раза;

- максимальное значение ЭРОА_{Rn} на первом этаже деревянного здания превышает норматив в 8 раз;
- максимальное значение ЭРОА_{Rn} на первом этаже кирпичного здания превышает норматив в 4,9 раза, на втором этаже – в 3,3 раза, на третьем этаже – в 2,2 раза.

В результате анализа табл. 4 показано, что превышение нормативного показателя в шлакоблочных зданиях существенно как на 1-ых, так и на 2-ых этажах, возможно это объясняется тем, что для строительства этих зданий использовался материал с высоким содержанием природных радионуклидов, вероятно из отвалов в районе расположения добывающих предприятий.

Оценка средней годовой эффективной дозы (СЭГД) облучения населения за счет радона

Радиационная безопасность населения по требованиям ОСПОРБ-99/2010 оценивали по величине СЭГД облучения от всех основных природных источников излучения, которая составляет:

- менее 5 мЗв/год – приемлемый уровень облучения населения от природных источников излучения;
- свыше 5 до 10 мЗв/год – облучение населения является повышенным;
- более 10 мЗв/год – облучение населения является высоким.

Проведен расчет средних годовых эффективных доз облучения по методике [14] в помещениях на первых этажах зданий в зависимости от типа территории, строительного материала и постройки (табл. 5).

Таблица 4

Параметры распределения значений ЭРОА_{Rn} в зависимости от строительного материала
Parameters of distribution of EEVA_{Rn} values depending on the building material

Материал здания	Этаж	Параметры распределения значений ЭРОА _{Rn}								
		N	СА	СГ	СО	Медиана и границы ее доверительного интервала*	Мин.	Макс.	Превышение 200 Бк/м ³	
Ед. измерения		шт	Бк/м ³	Бк/м ³	–	Бк/м ³	Бк/м ³	Бк/м ³	%	шт
Дерево	1	270	181	113	237	104 (76 – 132)	1	1606	24	65
	2	15	73	67	32	66 (50 – 82)	33	132	0	0
Шлакоблок	1	190	407	254	413	260 (201 – 318)	6	2087	59	113
	2	157	277	179	255	204 (164 – 244)	10	1130	52	81
	3	14	112	84	80	115 (72 – 157)	21	298	14	2
Кирпич	1	294	158	102	163	87 (68 – 105)	9	981	26	76
	2	287	106	79	90	76 (66 – 86)	13	653	12	36
	3	92	120	92	91	85 (66 – 103)	19	439	20	18
	4	22	47	45	13	48 (43 – 53)	15	69	0	0

Примечание: СА – среднее арифметическое; СГ – среднее геометрическое; СО – стандартное отклонение.

*– при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница

Таблица 5

Годовые эффективные дозы облучения на первых этажах зданий для всех типов территорий и строительного материала
Annual effective radiation doses on the first floors of buildings for all types of territories and building materials

Тип территории	Материал здания	N*	Превышения 200 Бк/м ³ в помещениях** на 1 этажах	Превышение 200 Бк/м ³ в зданиях на 1 этажах***		Медиана и границы ее доверительного интервала**** от:	
				Есть	Нет	Среднегодовых значений ЭРОА _{Rn}	Годовой эффективной дозы облучения
Ед. измерения		шт	шт (%)	шт (%)		Бк/м ³	мЗв/год
1	Дерево	63	26 (41)	20 (54)	17 (46)	199 (155 – 240)	13 (10 – 15)
	Шлакоблок	13	2 (15)	2 (50)	2 (50)	92 (41 – 142)	6 (3 – 9)
	Кирпич	44	7 (16)	5 (63)	3 (37)	118 (70 – 166)	8 (5 – 11)
2	Дерево	156	33(21)	19 (33)	38 (67)	119 (61 – 177)	8 (4 – 11)
	Шлакоблок	173	109 (63)	18 (82)	4 (18)	372 (267 – 477)	24 (17 – 30)
	Кирпич	185	59 (32)	15 (56)	12 (44)	149 (90 – 208)	10 (6 – 13)
3	Дерево	31	2 (6)	2 (11)	16(89)	84 (56 – 112)	5 (4 – 7)
	Кирпич	7	0(0)	0 (0)	2	63	4

Примечание: * количество проведенных измерений ЭРОА_{Rn} в помещениях зданий;
 ** количество помещений с превышением на 1-ых этажах;
 *** количество зданий с превышением 200 Бк/м³ на 1-ых этажах;
 **** – при ДИ = 0,95; интервал: левая граница – правая граница.

Анализ табл. 5 показывает:

- на первых этажах деревянных зданий ЭРОА_{Rn} превышает нормативный показатель 200 Бк/м³ на территории 1 в 26 помещениях (41 % от общего числа помещений), на территории 2 – в 33 помещениях (21 % от общего числа помещений), на территории 3 – в 2 помещениях (6 % от общего числа помещений на первых этажах деревянных зданий, расположенных на территории 3);
- на первых этажах шлакоблочных зданий ЭРОА_{Rn} превышает нормативный показатель 200 Бк/м³ на территории 1 в 2 помещениях (15 % от общего числа помещений на 1 этаже шлакоблочных зданий), на территории 2 – в 109 помещениях (63 % от общего числа помещений на 1 этаже шлакоблочных зданий, расположенных на территории 2);
- на первых этажах кирпичных зданий ЭРОА_{Rn} превышает нормативный показатель 200 Бк/м³ на территории 1 в 7 помещениях (16 % от общего числа помещений), на территории 2 – в 59 помещениях (32 % от общего числа помещений), на территории 3 – в 0 помещениях;
- на территории 1 превышения норматива на первых этажах есть в 20 деревянных зданиях (54 % от общего числа деревянных зданий), в 2 шлакоблочных зданиях (50 % от общего числа шлакоблочных зданий), в 5 кирпичных зданиях (63 % от общего числа кирпичных зданий);
- на территории 2 превышения норматива на первых этажах есть в 19 деревянных зданиях (33 % от общего числа деревянных зданий), в 18 шлакоблочных зданиях (82 % от общего числа шлакоблочных зданий), в 15 кирпичных зданиях (56 % от общего числа кирпичных зданий);
- на территории 3 превышения норматива на первых этажах есть в 2 деревянных зданиях (11 % от общего числа деревянных зданий, расположенных на территории 3);
- медиана среднегодового значения ЭРОА_{Rn} превышает норматив 200 Бк/м³ на первых этажах в шлакоблочных зданиях и составляет 372 Бк/м³;

- наименьшее значение медианы среднегодового значения ЭРОА_{Rn} в кирпичных зданиях, расположенных на территории 3, и составляет 63 Бк/м³;
 - значение медианы СЭГД облучения превышает ограничение 5 мЗв/год во всех зданиях на территориях 1 и 2;
 - меньшее значение медианы СЭГД облучения в кирпичных зданиях и составляет 4 мЗв/год.
- Далее, исходя из рассчитанных величин дозовых нагрузок, было проведено категорирование обследованных зданий по степени радоноопасности и разработано мероприятия по улучшению радиационно-экологической ситуации в регионе.

Категорирование зданий по величине годовой эффективной дозы облучения населения от ²²²Rn

В данной работе было реализовано предложение категорировать здания по уровню потенциальной радоноопасности, исходя из уровней дозовых нагрузок от радона для населения в помещениях на первых этажах.

Все мероприятия по снижению дозовых нагрузок представлены в табл. 6.

В зданиях с годовой эффективной дозой до 5 мЗв/год мероприятия по снижению объёмной активности радона не требуются. Рекомендуется мониторинг содержания радона в этих зданиях. Облучение считается приемлемым.

В зданиях с годовой эффективной дозой от 5 до 10 мЗв/год рекомендуются мероприятия по снижению объёмной активности радона. Необходим обязательный мониторинг содержания радона в этих зданиях. Облучение населения считается повышенным.

В зданиях с годовой эффективной дозой свыше 10 мЗв/год необходимы срочные мероприятия по снижению объёмной активности радона в помещениях или переселение жильцов и снос здания. Облучение населения в этих зданиях считается высоким.

Таблица 6

Категорирование зданий по потенциальной радоноопасности по величине годовой эффективной дозы, создаваемой радоном, на первых этажах помещений
Categorization of buildings by potential radon hazard by the value of the annual effective dose generated by radon on the first floors of the premises

Категория зданий	Материал здания	N	Значения годовой эффективной дозы облучения			Необходимые мероприятия
			Медиана	Мин	Макс	
Ед. измерения		шт	мЗв/год			
1 (менее 5 мЗв/год)	Дерево	26	4	1,7	4,9	Мероприятия не требуются
	Шлакоблок	2	4	3,8	4,5	
	Кирпич	12	3	1,7	4,9	
	Всего	40	4	1,7	4,9	
2 (от 5 до 10 мЗв/год)	Дерево	46	7	5,0	9,9	Рекомендуются мероприятия по снижению объёмной активности радона. Необходим обязательный мониторинг содержания радона в этих зданиях и выявление всех источников поступления радона в здания
	Шлакоблок	3	5	5,2	6,3	
	Кирпич	12	6	5,2	9,7	
	Всего	61	7	5,0	9,9	
3 (более 10 мЗв/год)	Дерево	43	17	10,9	93,7	Необходимы срочные мероприятия по снижению объёмной активности радона в помещениях или переселение жильцов и снос здания
	Шлакоблок	20	24	10,8	55,9	
	Кирпич	15	14	10,1	32,7	
	Всего	78	17	10,1	93,7	

Из табл. 6 следует:

- для 40 зданий (26 деревянных, 2 шлакоблочных, 12 кирпичных) не требуются мероприятия по снижению содержания радона в зданиях; облучение населения в этих зданиях считается приемлемым;
- для 61 здания (46 деревянных, 3 шлакоблочных, 12 кирпичных) рекомендуются мероприятия по снижению объёмной активности радона; необходим обязательный мониторинг содержания радона в этих зданиях и выявление всех источников поступления радона в здания;
- для 78 зданий (43 деревянных, 20 шлакоблочных, 15 кирпичных) необходимы срочные мероприятия по снижению объёмной активности радона в помещениях или переселение жильцов и снос здания.

Обсуждение

Предложено характеризовать территории по степени потенциальной радоноопасности в зависимости от геологических особенностей территории и содержания природных радионуклидов в почве по типам, которые можно условно поделить условно на 3 типа:

Тип 1 – где есть геологический разлом;

Тип 2 – территория, представленная горными породами с повышенным содержанием природных радионуклидов;

Тип 3 – территория, представленная горными породами с низким содержанием природных радионуклидов.

Территорию г. Балей можно поделить условно на 3 части по степени потенциальной радоноопасности: 1 тип – геологический разлом; 2 тип – южная часть территории города, представленная осадочными горными породами; 3 тип – северная часть территории города, представленная горными породами габброидной группы основного состава с низким содержанием природных радионуклидов.

Такое районирование территории по степени потенциальной радоноопасности позволяет на стадии про-

ектирования понимать, где можно строить дома, где повышать требования к проекту зданий с точки зрения радоноопасности и защищенности от поступления радона, а на стадии эксплуатации понимать, где надо проводить углубленные исследования, предполагая, что в помещениях может быть повышенное содержание радона.

Главным критерием по оценке потенциальной радоноопасности территории является объёмная активность радона на первых этажах зданий, которая достоверно характеризует поток радона с поверхности почвы, независимо от источника поступления. Это основной параметр контроля, по которому можно судить о радоноопасности территории, принимать решения о санитарном состоянии здания, судить о потенциальной опасности для населения или персонала, рассчитать потенциальные дозовые нагрузки.

Заключение

В результате работы показано, что для 61 здания облучение населения является повышенным, а для 78 зданий – высоким, что говорит о неблагоприятной радиационно-экологической ситуации в городе. Необходимо привлечение внимания администрации города с целью снижения облучения населения, проживающего на этой территории.

Исследование показало, что даже при значениях ЭРОА_{Rn}, не превышающих норматив 200 Бк/м³, который устанавливает НРБ-99/2009, облучение населения считается повышенным и превышает ограничение 5 мЗв/год. При значениях среднегодовой ЭРОА_{Rn} около 80 Бк/м³ годовая эффективная доза облучения за счет только ДПР радона составляет 5 мЗв/год. Такая ситуация в стране обусловлена экономическими проблемами. Если в качестве приоритета использовать ограничение значения величины годовой эффективной дозы, то в этом случае очень большое количество зданий будет необходимо реабилитировать, что с экономической точки зрения совершенно неподъемная работа на данном временном этапе.

Radiation-Hygienic Monitoring in Potentially Radon-Hazardous Territories

T.N. Lashchenova^{1,3}, L.E. Karl^{1,2}, A.M. Marennyy²

¹A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

²State Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene FMBA, Moscow, Russia

³Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Contact person: Lydia Eduardovna Karl: Lidiakarl@yandex.ru

ABSTRACT

Modern radioecological studies to assess the effect of natural radiation on the human body have shown that at the moment of development of society, the main contribution to the exposure of the population is made by natural sources of ionizing radiation, while from 50 to 90 % of the dose load are caused by the gas radon-222 (²²²Rn) and daughter products of its decay.

This paper presents the results of radiation-hygienic monitoring of the potentially radon-hazardous territory of the city of Baley, Trans-Baikal Territory. The measurement of the volumetric activity of radon (OAR_{Rn}) was carried out in the premises of residential and public buildings by the integral method using track exposure meters REI-4. According to the indicator of the equivalent equilibrium volumetric activity of radon (EROAR_{Rn}), a radiation-hygienic assessment of the premises and the calculation of potential dose loads on the population living in this territory were carried out.

Studies have shown that OAR_{Rn} in residential and public buildings depends on the geological characteristics of the territory, on the design and design of buildings and structures, and on the building materials used. It was found that the main criterion for assessing the potential radon hazard of territories is the value of OAR_{Rn} in rooms on the 1st floors of buildings. According to the degree of potential radon hazard, the territory of the city of Baley can be conditionally divided into 3 types: 1 type – the territory located on a geological fault; Type 2 – the southern part of the city, represented by sedimentary rocks; Type 3 – the northern part of the city, represented by rocks of the basic gabbroid group with a low content of natural radionuclides. The types of buildings and structures and the type of building materials affect the dose load, but do not determine it.

Key words: radon-222, volumetric activity, EEVA, potential radon hazard of territories, categorization of territories, residential and public buildings, nuclear legacy objects

For citation: Lashchenova TN, Karl LE, Marennyy AM. Radiation-Hygienic Monitoring in Potentially Radon-Hazardous Territories. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):42-50.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-42-50

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: Vol. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Жуковский М.В. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2000.
3. Гулабянц Л.А. / Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013.
4. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016.
5. Стамат И.П., Кормановская Т.А., Горский Г.А. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации. // Радиационная гигиена. 2014, Т. 7, № 1. С. 54-62.
6. Маренный А.М. Проблема облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. // Ядерная и радиационная безопасность России. 2002, Т. 2, № 5. С. 6-63.
7. Губин А. Т., Маренный А. М., Сакович В. А., Астафуров В.И., Нефедов Н.А., Пенезев А.В. Обследование территорий, обслуживаемых ФМБА России, на содержание радона в помещениях. // Медицина экстремальных ситуаций. 2012, Т. 4, № 42. С. 77-88.
8. Маренный А.М., Романов В.В., Астафуров В.И., Губин А.Т., Киселёв С.М., Нефёдов Н.А., Пенезев А.В. Проведение обследований зданий различного назначения на содержание радона на территориях, обслуживаемых ФМБА России. // Радиационная гигиена. 2015, Т. 8, № 1. С. 23-29.
9. Цапалов А.А. // Принципы радонового контроля в помещениях зданий // АНРИ, 2014. №1. С. 6-15.
10. Маренный А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом // АНРИ, 2012. № 4. С. 13-19.
11. МВИ 2.6.1.003–99. «Радон. Измерение объемной активности интегральным трековым методом в производственных, жилых и общественных помещениях»; МИ «Радон. Измерение объемной активности в воздухе помещений интегральным трековым методом», Свидетельство об аттестации № 40090.2И385 от 16.07.2012.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09) утв. и введены в действие от 07.07.09 г. – Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
13. МУ 2.6.1.037 – 2015. Определение среднегодовых значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по результатам измерений разной длительности. М.: ФМБА России, 2016.
14. МУ 2.4.1.1088-02. Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. М.: Минздрав России; 2002.
15. Птицын А.Б. Проблемы освоения техногенных месторождений Забайкалья. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. С. 128-130.
16. Веневская Н.Н. К вопросу об экологической ситуации города Бaley (Забайкальский край) // Труды XX Международного симпозиума имени академика Усова М.А. студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск. 2016. 109-110 с.
17. Абрамов Б.Н., Эпова Е.С., Манзырев Д.В. Геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений золота в восточном Забайкалье. География и природные ресурсы. 2019. № 2. С. 103-111.
18. МР 11-2/206-09. Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения. 2000; N 11-2/206-09.
19. Арбузов С.И. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие // Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск 2010.
20. Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Капринского. Каталог растров. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

REFERENCES

1. UNSCEAR, 2008. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly United Nations: V. 1, Annex B, New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
2. Zhukovskiy MV. Radon Safety of Buildings. Ekaterinburg: UrO RAN; 2000 (in Russian).
3. Gulabyants LA. Manual for the Design of Anti-radon Protection of Residential and Public Buildings. Moscow: NO «FEN-NAUKA», 2013 (In Russian).
4. Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB Regularities of the Formation of the Radon Field in the Geological Environment. Moscow: PERO, 2016 (In Russian).
5. Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorskiy GA Russian Federation Population Radiation Protection During the Exposure From Natural Ionizing Irradiation Sources: Modern State and Directions for Development and Optimization. Radiation Hygiene. 2014;7(1): 54-62 (In Russian).
6. Marennyy AM The Problem of Public Exposure to Natural Sources of Ionizing Radiation. Nuclear and Radiation Safety of Russia.

- 2002.2(5):36-63. (In Russian).
7. Gubin A T, Marennyy AM, Sakovich VA, Astafurov VI, Nefedov NA, Penezhev AV Survey of Territories Maintained by the Federal Medical and Biological Agency of Russia for radon Content in Premises. *Meditsina Ekstremal'nykh Situatsiy*. 2012.42(4):77-88 (In Russian).
 8. Marennyy AM, Romanov VV, Astafurov VI, Gubin AT, Kiselev SM, Nefedov NA, Penezhev AV Survey for Indoor Radon in Dwellings on the Territories Supervised by FMBA of Russia. *Radiation Hygiene*. 2015,8(1):23-29. (In Russian).
 9. Tsapalov AA Principles of Radon control in the premises of buildings ANRI. Moscow Puplic 2015. 1: 6-15. (In Russian).
 10. Marennyy AM Methodological Aspects of Measurements of Average Volumetric Activity of Radon in Rooms by Integral Track Method ANRI. Moscow Puplic 2012; 4: 13-19 (In Russian).
 11. MVI 2.6.1.003–99. «Radon. Measurement of Volumetric Activity by Integral Track Method in Industrial, Residential and Public Premises»; MI «Radon. Measurement of Volumetric Activity in Indoor air by the Integral Track Method», Attestation Certificate № 40090.21385 of 16.07.2012. (In Russian).
 12. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009): Sanitarno-epidemiologicheskies Pravila i Normativy (SanPiN 2.6.1.2523-09): utv. i Vvedeny v Deystvie ot 07.07.09 g. M.: Federalniy Centr Gигieny i Epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 100 p. (In Russian).
 13. MU 2.6.1.037 – 2015. Determination of the Annual Average EEC Values of Radon Isotopes in Indoor air Based on the Results of Measurements of Different Durations. Moscow: FMBA; 2016. (In Russian).
 14. MU 2.4.1.1088-02. Assessment of Individual Effective Doses to the Population Due to Natural Sources of Ionizing Radiation. Moscow: Minzdrav Rossiya. 2002 (In Russian).
 15. Ptitsyn AB Problems of Development of Technogenic Deposits in Trans-Baikal Region. *Geology and Mineral Resources of Siberia*. 2014; 3: 128-130 (In Russian).
 16. Venevskaya NN About the Environmental Situation in the Town of Balei (Trans-Baikal Region). *Proc. of 20th Int. Symp. Tomsk*, 2016. 109-110. (In Russian).
 17. Abramov BN, Epova E.S., Manzyrev D.V. Geocological problems of mining gold ore deposits in Eastern Trans-Baikal Region. *Geografy and Natural Resources*. 2019; 2: 103-111 (In Russian).
 18. MR 11-2/206-09. Random Survey of Residential Buildings to Assess Doses to the Population. 2000; N 11-2/206-09. (In Russian).
 19. Arbutov SI *Geochemistry of Radioactive Elements: Textbook*. Tomsk. 2010. (In Russian).
 20. Kaprinsky AP. Russian Research Geological Institute Named after. Catalog of Rasters. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90291 на базе НТЦ РХБГ ФМБА России.

Участие авторов. Концепция и дизайн исследования – Лашенова Т.Н., Карл Л.Э.

Сбор и обработка данных – Карл Л.Э.

Написание текста – Карл Л.Э., Лашенова Т.Н.

Редактирование – Лашенова Т.Н., Маренный А.М.

Поступила: 18.03.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

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

Financing. The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90291 at the State Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene FMBA.

Contribution. Research concept and design – T.N. Laschenova, L.E. Karl

Data collection and processing – Karl L.E.

Text writing – Karl L.E., Laschenova T.N.

Editing – T.N. Laschenova, A.M. Marenniy.

Article received: 18.03.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

А.М. Полещук, О.А. Дорохова, Б.А. Кухта, Н.А. Богданенко

АНАЛИЗ ОПЫТА УЧАСТИЯ В МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЛАБОРАТОРИЙ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ В НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ АККРЕДИТАЦИИ

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

Контактное лицо: Александра Михайловна Полещук: aleksaupsa@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Формирование представления лабораторий, аккредитованных в Системе аккредитации Российской Федерации (Росаккредитации) – национальной системе аккредитации, в частности, лабораторий радиационного контроля (ЛРК) для подтверждения компетентности посредством участия в межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаниях на международном уровне.

Результаты: Обобщение опыта успешного прохождения международных межлабораторных сличительных (сравнительных) испытаний в современных условиях работы ЛРК.

Выводы: Описанный в статье опыт может быть использован аккредитованными лабораториями при подтверждении соответствия критериям аккредитации.

Ключевые слова: лаборатория радиационного контроля, межлабораторные сравнительные испытания, подтверждение компетентности

Для цитирования: Полещук А.М., Дорохова О.А., Кухта Б.А., Богданенко Н.А. Анализ опыта участия в межлабораторных сравнительных испытаниях лабораторий радиационного контроля в национальной системе аккредитации // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.51–53.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-51-53

Введение

Лаборатория дозиметрии инкорпорированных радионуклидов (далее – лаборатория) ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России является одной из профильных лабораторий дозиметрического контроля внутреннего облучения в системе Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России), осуществляет научно-методическое обеспечение деятельности лабораторий дозиметрии внутреннего облучения (ЛДВО) центров гигиены и эпидемиологии Федерального медико-биологического агентства (ЛДВО ФГБУЗ ЦГиЭ ФМБА России). Лаборатория проводит работы по оценке доз внутреннего облучения, реализуемых вследствие поступления таких радионуклидов, как уран, америций, кюрий, плутоний и полоний, на основе результатов измерения их содержания в биологических пробах (моча, кал, мазки из носа, мягкие ткани, костные ткани).

Ключевая задача лаборатории состоит в поддержке функционирования ЛДВО ЦГиЭ ФМБА России в современных условиях нормирования при проведении индивидуального дозиметрического контроля персонала организаций отдельных отраслей промышленности с особо опасными условиями труда и населения отдельных территорий, находящихся в сфере ответственности ФМБА России.

С принятием Федерального Закона № 102 от 26.06.2008 г. «Об обеспечении единства измерений» [1] и соответствующих подзаконных актов усилились требования к нормативному и метрологическому обеспечению научных исследований в области охраны окружающей среды и здоровья населения, в частности, к исследованиям (измерениям) при дозиметрическом контроле внутреннего облучения персонала особо опасных объектов, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Для обеспечения достоверности и метрологической прослеживаемости измерений, выполняемых в рамках как госконтракта на прикладные научные работы, так и сторонних договоров, исследования по совершенствованию метрологического обеспечения таких измерений

приобретают особую важность и актуальность, особенно для лабораторий, аккредитованных в национальной системе аккредитации.

Все измерения показателей внутреннего облучения, выполняемые в лаборатории, регламентируются только аттестованными методиками измерений, разработанными в основном сотрудниками лаборатории в рамках госзаказа. Всего за 2000–2021 гг. разработано 37 методик измерений. Из них 14 включено в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.

Накоплен большой опыт исследований определения полония-210 в секционном материале, что позволило провести исследования полониевой версии смерти Ясира Арафата [2].

В данной статье рассмотрена одна из форм подтверждения компетенции испытательными лабораториями, аккредитованными в национальной системе аккредитации Российской Федерации – межлабораторные сличительные (сравнительные) испытания (МСИ).

Материал и методы.

Лаборатория определяет содержание радионуклидов в пробах биологического материала по аттестованным методикам, содержащимся в области аккредитации. В частности, таким как: 1) МУК 2.6.1.011-14 «Методика измерений активности урана спектрометрическим методом после экстракционно-хроматографического выделения из проб мочи» (ФР.1.38.2016.24327) [3]; 2) СТО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России 4.21/01-2017 «Методика измерений активности изотопов америция и плутония в пробах мочи спектрометрическим методом после радиохимической подготовки» [4].

Испытательная лаборатория, согласно п. 8.5 ГОСТ 8.638-2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения» [5], должна быть аккредитованной в установленном порядке: «Аккредитация является обязательной для ЛРК, осуществляющих контроль радиационной обстановки и дозиметрический

Таблица 1

Данные о содержании радионуклидов в биологическом образце, представленном каждой участвующей лабораторией в Бк/см³ (с доверительной вероятностью 95 %).
Data on the content of radionuclides in a biological sample presented to each participating laboratory in Bq/cm³ (with a confidence probability of 95 %).

Радионуклиды	⁹⁰ Sr	¹⁰⁶ Ru	¹³⁷ Cs	²³⁹ Pu
Активность в образце объемом 250 см ³ (Бк)	5,02 ± 0,03	20,1 ± 0,6	100 ± 1	0,00994 ± 0,00003
Концентрация (Бк/дм ³)	20,08 ± 0,12	80,4 ± 2,4	400 ± 4	0,03976 ± 0,00012

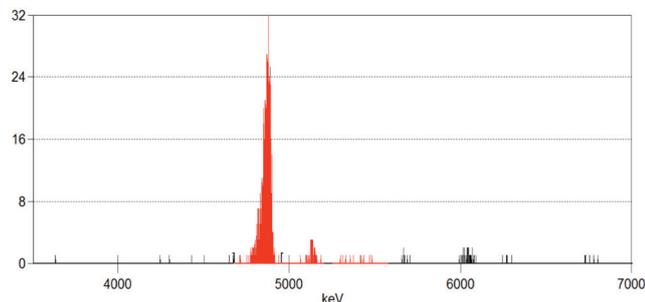


Рис. 1. Энергетический спектр альфа-излучения биологического образца (мочи), полученный на альфа-спектрометре Alpha Analyst (Canberra Industries, Inc., США)

Fig. 1. The energy spectrum of alpha radiation of a biological sample (urine) obtained on the alpha-spectrometer Alpha Analyst (Canberra Industries, Inc., USA)

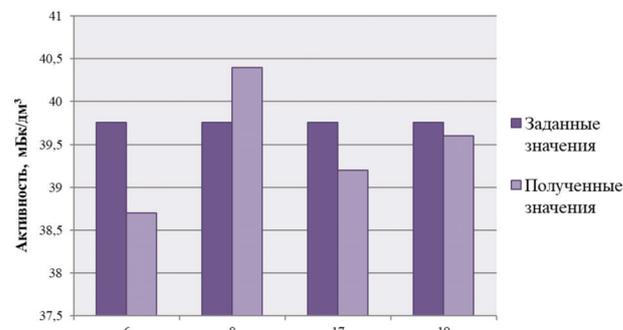


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений с истинным значением для полученных образцов (6, 8, 17, 19 – коды лабораторий-участников)
Fig. 2. Comparison of measurement results with actual value (6, 8, 17, 19 – participating laboratories codes)

контроль на предприятии, радиационный контроль окружающей среды и условий проживания населения, контроль медицинского облучения и подтверждение соответствия продукции по радиационному признаку».

По ГОСТ 8.638-2013, испытательная лаборатория подтверждает свою компетентность на соответствие ИСО ГОСТ 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий» [6] согласно установленным критериям. В ГОСТ 17025 содержатся требования к испытательным лабораториям, что в свою очередь создает условия для повышения качества результатов и предотвращения выдачи недостоверных результатов. В результате МСИ аккредитованная лаборатория представляет объективное доказательство своей компетентности и позволяет пользователям удостовериться в надежности выдаваемых результатов.

Таким образом, одной из форм подтверждения компетентности испытательной лаборатории, согласно вышеупомянутому документу, служит удовлетворительное прохождение МСИ. Согласно ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации» [7], межлабораторное сличение (interlaboratory comparison) – это «организация, выполнение и оценивание измерений или испытаний одного и того же, или нескольких подобных образцов двумя или более лабораториями в соответствии с заранее установленными условиями». Согласно политике Росаккредитации в отношении проверки квалификации путем проведения МСИ от 02.04.2021 г. [8]: «Лаборатория должна не реже 1 раза в год принимать участие в программах МСИ. Аккредитованная лаборатория в течение 5 лет с момента принятия решения об аккредитации должна принять участие в МСИ по всем методам испытаний, включенным в область аккредитации».

Лаборатория дозиметрии инкорпорированных радионуклидов ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России приняла участие в 2016 г. в международных сличительных (сравнительных) испытаниях под эгидой Рабочей группы по радиологическим – ядерным угрозам Глобальной

инициативы по безопасности в области здравоохранения¹, Сети экстренной медицинской готовности и содействия при радиационных чрезвычайных ситуациях Всемирной организации здравоохранения² и Сети реагирования и оказания помощи Международного агентства по атомной энергии³. Целью данных испытаний была проверка способности выполнить анализ биологических проб (мочи) *in vitro* лабораториями-участниками в течение 72 ч после получения образца. Такие испытания позволяют проверить возможности лабораторий-участников к определению нескольких радионуклидов, содержащихся вместе в одной пробе мочи, оценить возможности используемых методов и сравнить полученные результаты, а также способствует поддержанию готовности к оказанию помощи другим странам при возможных радиационных инцидентах.

В лабораторию поступила проба мочи объемом 250 см³. Радионуклиды, содержащиеся в пробе, соответствовали сценарию тяжелой радиационной аварии на атомной станции, когда радионуклиды ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²³⁹Pu вносят основной вклад в дозу внутреннего облучения. Проба была подготовлена согласно стандартной процедуре, используемой Национальным калибровочным референсным центром мониторинга: анализ биопроб и измерения *in vivo* Министерства здравоохранения Канады⁴ [9].

Лаборатории-участники должны были представить результаты организатору испытаний. Анализ данной пробы на содержание альфа-излучателей проводился согласно вышеупомянутым методикам измерений [3] и [4].

Применяемые методы реализуются путем выделения радионуклидов америция, плутония и урана из проб мочи экстракционной хроматографией, очистке от примесей и соосаждением на стальной диск с последующим измерением на альфа-спектрометре с обязательным контролем химического выхода (посредством добавления перед началом анализа в пробу мочи известного количества изотопов америция-243, плутония-239 и урана-232).

¹ Global Health Security Initiative (GHSI) Radio-Nuclear Threats Working Group (RNWG)

² Radiation Emergency Medical Preparedness and Assistance Network, World Health Organization (WHO REMPAN)

³ Response and Assistance Network, International Atomic Energy Agency (IAEA RANET)

⁴ National Calibration Reference Center for Bioassay and In Vivo Monitoring, Health Canada

Результаты и обсуждение

Полученные в ходе испытаний результаты были опубликованы в работе [10]. Данные о содержании радионуклидов в исследуемом образце, представленном каждой участвующей лаборатории, приведены в табл. 1. В испытаниях принимало участие 19 лабораторий, 12 из которых обнаружили содержание в исследуемом образце ²³⁹Pu. Спектр альфа-излучения изотопов плутония, полученный во время анализа образца в нашей лаборатории, приведен на рис. 1. Следует выделить 4 лаборатории, определивших с наибольшей точностью содержание плутония в пробе, в том числе и лабораторию дозиметрии инкорпорированных радионуклидов ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. На основании приведенных в [10] результатов можно провести сопоставление результатов, полученных в этих лабораториях, с истинными (рис. 2).

Необходимо отметить, что на сегодняшний день в Российской Федерации не имеется возможности проведения МСИ, в которых требуется определение радиоизотопов в пробах биологического материала (моча, кал и т.п.): отсутствует провайдер МСИ по ГОСТ ИСО 17043-2013 «Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации». Для таких подразделений, как лаборатория дозиметрии инкорпорированных радионуклидов ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, а также Федеральных государственных бюджетных учреждений здравоохранения центров гигиены и эпидемиологии ФМБА России данный вопрос представляется принципиальным, поскольку ставит под угрозу деятельность этих лабораторий радиационного контроля как аккредитованных в национальной системе аккредитации.

Medical Radiology and Radiation Safety. 2021. Vol. 66. № 4. P. 51–53

Radiation safety

Analysis of the Experience of Participation in Interlaboratory Comparisons of the Radiation Control Laboratory in National Accreditation System

A.M. Poleshchuk, O.A. Dorokhova, B.A. Kukhta, N.A. Bogdanenko

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia
Contact person: : Alexandra Mikhailovna Poleshchuk : aleksaupsa@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: Formation of the idea of laboratories accredited by Accreditation System of Russian Federation, in particular radiation control laboratories, about the possibility of confirming technical competence by means of participation in interlaboratory comparison tests at international level.

Content: Description of the experience of successful passing the international comparisons by radiation control laboratories under up-to-date requirements.

Conclusion: The experience described in the article can be used by accredited laboratories in practice for conformity validation with accreditation criteria.

Key words: radiation control laboratory, interlaboratory comparison tests, competence

For citation: Poleshchuk AM, Dorokhova OA, Kukhta BA, Bogdanenko NA. Analysis of the Experience of Participation in Interlaboratory Comparisons of the Radiation Control Laboratory in National Accreditation System. Medical Radiology and Radiation Safety 2021;66(4):51-53.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-51-53

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»
2. Уйба В.В., Котенко К.В., Ильин Л.А., Квачева Ю.Е., Абрамов Ю.В., Галстян И.А. и др. Полониевая версия смерти Ясира Арафата: результаты российских исследований. Медицинская Радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60. № 3. С. 41-49.
3. МУК 2.6.1.011-14 Методика измерений активности урана спектрометрическим методом после экстракционно-хроматографического выделения из проб мочи. 2014.
4. СТО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России 4.21/01-2017 Методика измерений активности изотопов америция и плутония в пробах мочи спектрометрическим методом после радиохимической подготовки. 2017.
5. ГОСТ 8.638-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения.
6. ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
7. ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации.
8. Политика Росаккредитации в отношении проверки квалификации путем проведения межлабораторных сравнительных (сравнительных) испытаний от 02.04.2021 г.
9. Daka J, Kramer GH. The Canadian national Calibration and Reference Center for Bioassay and in Vivo Monitoring: an Update. Health Phys. 2009. V. 97, No. 6. P. 590–594. DOI:01.hp.0000363839.78169.20
10. Li C, Bartizel C, Battisti P. et al. GHSI Emergency Radionuclide Bioassay Laboratory Network - Summary of the Second Exercise. Rad. Prot. Dosim. 2017. V. 174, No. 4. P. 449-456. DOI:10.1093/tpd/ncw254.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 23.12.2020. Принята к публикации: 20.01.2021.

REFERENCES

1. Federal Law No. 102-FZ of June 26, 2008 «On Ensuring the Uniformity of Measurements» (In Russian).
2. Uyba VV, Kotenko KV, Ilyin LA, Kvacheva YE, Abramov YV, Galstyan IA, et al. Polonium-210 Version of Arafat's Death: the Results of Russian Investigation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2015; 60(3):41–49 (In Russian).
3. Methodological Guidelines 2.6.1.011-14 Procedure of Measurement the Activity of Uranium by Alpha-spectrometry After Extraction-chromatographic Isolation from Urine Samples. 2014 (In Russian).
4. Standard of the Organization of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency 4.21 / 01-2017 Procedure of Measurement the Activity of Americium and Plutonium Isotopes in Urine Samples by the Alpha-spectrometry After Radiochemical Preparation (In Russian).
5. State Standard 8.638-2013 Metrological ensuring of radiation control. General principles (In Russian).
6. State Standard ISO/IEC 17025-2019 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories (In Russian).
7. State Standard ISO/IEC 17043-2013 Conformity Assessment. General Requirements for Proficiency Testing (In Russian).
8. The Policy of RusAccreditation Regarding the Verification of Qualifications by Conducting Interlaboratory Comparison (Comparative) Tests of 02.04.2021.
9. Daka J, Kramer GH. The Canadian national Calibration and Reference Center for Bioassay and in Vivo Monitoring: an Update. Health Phys. 2009;97(6):590–594. DOI:01.hp.0000363839.78169.20
10. Li C, Bartizel C, Battisti P. et al. GHSI Emergency Radionuclide Bioassay Laboratory Network – Summary of the Second Exercise. Radiat. Protect Dosimetry. 2017;174(4):449-456. DOI:10.1093/tpd/ncw254.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 23.12.2020. Accepted for publication: 20.01.2021.

А.В. Титов, Н.К. Шандала, Ю.С. Бельских, Д.В. Исаев, М.П. Семенова,
Т.А. Дороньева, К.Ю. Оськина, Ю.В. Гущина

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ РЕАБИЛИТАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ УРАНОВОГО НАСЛЕДИЯ

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

Контактное лицо: Алексей Викторович Титов: titov_fmbc@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Изложение подходов к установлению критериев реабилитации территорий, загрязненных в результате прошлой деятельности предприятий по добыче и переработке урановых руд. В настоящее время данные предприятия относятся к «урановому наследию».

Результаты: Представлены обоснованные референтные уровни, выраженные в значениях годовой эффективной дозы, которые рекомендуется использовать в качестве критериев реабилитации территорий, загрязненных в результате прошлой деятельности предприятий по добыче и переработки урановых руд (площадки «уранового наследия»).

В зависимости от дальнейшего использования территорий после реабилитации они составляют от 1 мкЗв/год при временном нахождении населения до 10 мкЗв/год при постоянном проживании населения и ведении хозяйственной деятельности.

Заключение:

В соответствии с международными основными нормами безопасности, принятыми более чем 10 лет назад, ситуации облучения от радиоактивных веществ, сохранившихся после предыдущей деятельности, относятся к ситуации существующего облучения.

Тем не менее, ни в ФЗ РФ «О радиационной безопасности населения», ни в Нормах радиационной безопасности понятия «существующее облучение», к которому относится облучение на площадках ядерного и уранового наследия, и «референтный уровень», который используется для обеспечения радиационной безопасности населения, проживающего на площадках наследия или использующих их для ведения хозяйственной деятельности, до настоящего времени не введены.

Ключевые слова: урановое наследие, критерии реабилитации, направления использования территорий, природные радионуклиды, радиоактивное загрязнение, реабилитация, прошлая деятельность, техногенные радионуклиды, удельная активность

Для цитирования: Титов А.В., Шандала Н.К., Бельских Ю.С., Исаев Д.В., Семенова М.П., Дороньева Т.А., Оськина К.Ю., Гущина Ю.В. Обоснование критериев реабилитации территорий уранового наследия // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.54–57.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-54-57

Введение

В настоящее время в Российской Федерации имеются многочисленные объекты и загрязненные площадки, относящиеся к «ядерному наследию».

Объекты ядерного наследия – это объекты использования атомной энергии в мирных и оборонных целях, которые созданы до установления современных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности, в том числе объекты, эксплуатация которых по функциональному назначению прекращена и которые находятся на стадиях вывода из эксплуатации, захоронения, утилизации. Наличие объектов ядерного наследия, в отношении которых требуется принятие дополнительных мер по завершению их жизненного цикла и (или) реабилитации, в том числе перевод этих объектов в ядерно- и радиационно-безопасное состояние и реабилитация радиоактивно-загрязненных участков территорий, на которых расположены эти объекты, является важной задачей в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности [1].

Одной из составляющих «ядерного наследия» является «урановое наследие»: объекты и территории, образовавшиеся в результате прошлой деятельности предприятий по добыче и переработке урановых руд. Особенность площадок «уранового наследия» и их отличие от площадок ядерного наследия заключается в том, что они загрязнены природными радионуклидами. Поэтому раздельная оценка исходного и привнесенного загрязнения объектов и территорий природными радионуклидами за счет прошлой деятельности предприятий во многих случаях оказывается принципиально невозможной. Это связано, прежде всего, с исключительно большой вариабельностью проявления природных источников излучения в пространстве [2]. Например, в районе отвалов Лермонтовского производственного объединения «Алмаз» фоновые значения мощности амбиентного эквивалента дозы варьируют от 0,1 до 0,3 мкЗв/ч [3].

В Российской Федерации к «урановому наследию» относятся объекты и площадки на действующих предприятиях, на выведенных из эксплуатации предприятиях, а также отработанные месторождения и места ведения опытно-промышленных работ геологоразведочными партиями [4].

Выведенные из эксплуатации предприятия и места геологоразведочных работ, на которых необходимо проведение рекультивации, являются:

- Лермонтовское производственное объединение «Алмаз» (ЛПО «Алмаз»);
- Новотроицкое рудоуправление, осуществлявшее добычу ториевых руд в г. Балей Читинской области, и карьер в районе посёлка Озерное;
- Степное рудоуправление в Калмыкии;
- места ведения опытно-промышленных работ геологоразведочными партиями на Алданском месторождении в Республике Саха Якутия и Стрельцовском месторождении в Забайкальском крае.

К эксплуатируемым добывающим и перерабатывающим предприятиям, на объектах которых требуется проведение рекультивации, относятся:

1. Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ПАО «ППГХО»), г. Краснокаменск, Забайкальский край.
2. Малышевское рудоуправление (МРУ), пос. Малышево, Свердловская область.
3. Машиностроительный завод (ОАО «МСЗ»), г. Электросталь.
4. Чепецкий механический завод (ЧМЗ), г. Глазов.

Для решения проблемы обеспечения радиационной безопасности населения и окружающей среды в районах расположения объектов уранового наследия необходима разработка современного нормативного и методологического обеспечения реабилитации, и в первую очередь научное обоснование критериев реабилитации.

Современные подходы к обеспечению радиационной безопасности на объектах «ядерного наследия»

В соответствии с документами МКРЗ [5] и МАГАТЭ [6] в целях установления практических требований по обеспечению защиты и безопасности все ситуации облучения подразделяются на ситуации планируемого облучения, ситуации аварийного облучения и ситуации существующего облучения.

Ситуация облучения от радиоактивных веществ, сохранившихся после предыдущей деятельности, классифицируется как ситуация существующего облучения. В ситуациях существующего облучения для обеспечения радиационной безопасности должен быть установлен не предел дозы, а референсный уровень (reference level) – уровень дозы, риска или удельной активности, выше которого планировать допустимое облучение неприемлемо, а ниже которого следует продолжать оптимизацию защиты и безопасности. То есть референтный уровень играет роль граничного условия при определении диапазона вариантов для целей оптимизации при принятии мер защиты.

Референсные уровни, как правило, выражаются в виде годовой эффективной дозы для репрезентативного лица в диапазоне 1–20 мЗв, причем фактическое значение этой дозы зависит от возможностей контролировать ситуацию и от опыта управления подобными ситуациями, накопленного в прошлом.

Комиссия МКРЗ рекомендует, чтобы референсные уровни, установленные по индивидуальной дозе, использовались в сочетании с внедрением процесса оптимизации.

Целью процесса оптимизации является обеспечение оптимизированной защиты для всех лиц, подвергающихся облучению, однако приоритетное внимание должно уделяться группам, для которых доза превышает референсный уровень. Для предотвращения доз, превышающих референсные уровни, должны предприниматься все разумные меры. Однако не следует игнорировать облучение и ниже референтного уровня. Обстоятельства такого облучения также следует оценить, чтобы понять, насколько оптимизирована защита в подобных случаях, или нужны дальнейшие защитные меры [7].

Таким образом, для ситуаций, связанных с ядерным (урановым) наследием, целью реабилитации является реализация оптимизированных стратегий реабилитации, направленных на снижение доз до референтного уровня для максимально возможного числа людей.

При установлении референсных уровней следует учитывать планируемое использование территории наследия после реабилитации.

Возможные варианты использования реабилитированных площадок

Дозы облучения населения зависят от поведения населения на реабилитированных площадках, т.е. от вариантов использования площадок.

К основным вариантам использования площадок урановых производств после проведения реабилитации можно отнести:

- изменение целевого назначения основных сооружений, зданий, инженерных систем и оборудования предприятия (объекта), приведение их в радиационно-безопасное состояние для ведения иной производственной деятельности (конверсия предприятия), в том числе сельскохозяйственной деятельности и животноводства, разведения рыб;
- использование территорий и объектов:

- для постоянного проживания населения;
- для временного нахождения населения (парк, зона отдыха, и т.п.).

Постоянное проживание населения

Постоянное проживание подразумевает, что на этой территории будут построены жилые дома для проживания населения и ведения хозяйственной деятельности на подсобном участке. Доза облучения населения формируется за счет следующих факторов:

- внешнего облучения в жилых домах и на территории населенного пункта;
- ингаляционного поступления радона;
- ингаляционного поступления радионуклидов с пылью;
- перорального поступления радионуклидов в результате потребления пищевых продуктов, выращенных на подсобных участках, и питьевой воды из местных источников.

В соответствии с ОСПОРБ-99/2010 [8] степень радиационной безопасности населения характеризуют следующие значения эффективных доз облучения от всех основных природных источников излучения:

- менее 5 мЗв/год – приемлемый уровень облучения населения от природных источников излучения;
- свыше 5 до 10 мЗв/год – облучение населения является повышенным;
- более 10 мЗв/год – облучение населения является высоким.

Мероприятия по снижению уровней облучения природными источниками излучения должны осуществляться в первоочередном порядке для групп населения, подвергающихся облучению в дозах более 10 мЗв/год.

Исходя из вышеизложенного, при использовании территории для постоянного проживания населения после проведения реабилитации территории можно принять референсный уровень 10 мЗв в год от всех источников ионизирующего излучения (за исключением медицинского облучения).

Конверсия предприятия

Одним из примеров конверсии предприятия является гидрометаллургический завод бывшего предприятия ЛПО «Алмаз». На нём с 1954 г. проводилась переработка руды из рудников № 1 и № 2, а с 1974 по 1991 гг. – привозных урановых руд. В последующие годы завод занимался производством азотно-фосфорных удобрений.

Рекультивированные площадки (водоемы) могут также использоваться сельскохозяйственными, животноводческими и рыболовецкими предприятиями для производства соответствующей продукции, поступающей в торговую сеть.

В соответствии с НРБ-99/2009 [8] и СанПиН 2.6.1.2800–10 [9], эффективная годовая доза облучения работников в производственных условиях (любые профессии и производства) за счет природных источников ионизирующего излучения в производственных условиях не должна превышать 5 мЗв/год.

Данный уровень эффективной годовой дозы может быть принят в качестве референтного уровня для работников предприятия.

При использовании реабилитированной территории для сельскохозяйственных целей, животноводства или разведения рыбы в водоемах на реабилитируемой территории помимо персонала предприятий необходимо также обеспечение радиационной безопасности населения, потребляющего произведенную продукцию.

В Российской Федерации существуют нормативы по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs в пищевых продуктах, поступающих в торговую сеть [10]. Содержание естественных радионуклидов не нормируется.

Средняя годовая эффективная доза облучения жителей России за счет радионуклидов рядов урана и тория (в первую очередь ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po), содержащихся в пищевых продуктах, в различных регионах варьирует в широких пределах. Значения годовой эффективной дозы облучения в среднем по России, приведенные в различных литературных источниках, варьируют от 0,033 мкЗв [11] до 160 мкЗв/год [12]. На территориях в районах расположения урановых производств средние значения годовой эффективной дозы от потребления местных пищевых продуктов (молока и картофеля) составляют 0,26 мкЗв в районе бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз» (г. Лермонтов) [13] и 0,4 мкЗв в районе ПАО ППГХО (г. Краснокаменск) [14]. Таким образом, доза от поступления одного из местных продуктов составляет 0,13–0,2 мкЗв/год.

Ориентируясь на эти данные, можно установить референсный уровень от потребления пищевого продукта, полученного на реабилитированной территории, приблизительно равный 0,2 мЗв/год.

Прочие варианты использования территории

Прочие варианты использования территории включают варианты с временным нахождением населения на данной территории:

- автомобильные стоянки;
- зона отдыха;
- парки;
- спортивные площадки для гольфа, лыжные трассы и т.п.

Эффективные дозы облучения населения формируются за счет внешнего облучения и внутреннего облучения от ингаляционного поступления радона и его дочерних радионуклидов только в период нахождения на этих территориях.

В работе [2] со ссылкой на руководство по безопасности МАГАТЭ № WS-G-5.1 [15] рекомендуется использовать значение годовой эффективной дозы облучения критической группы населения, равное 0,3 мЗв. Однако в данном руководстве рассматривается вывод объектов из эксплуатации, и оно не применяется «в отношении восстановления территорий, загрязненных в результате проводимых в прошлом работ».

Исходя из опыта зарубежных стран [16,17], референсный уровень можно принять равным 1,0 мЗв в год.

Заключение

На основе анализа международных документов и требований, действующих в Российской Федерации документов в области обеспечения радиационной безопасности населения, разработаны референсные уровни, которые могут быть использованы при реабилитации объектов и территорий, загрязненных в результате прошлой деятельности предприятий по добыче и переработке урановых руд для различных вариантов использования территории в будущем. Они представлены в величинах годовой эффективной дозы, которую могут получить работники или население за период нахождения на реабилитированной территории.

К сожалению, несмотря на то, что прошло уже более 10 лет после опубликования Международных основных норм безопасности [6], ни в ФЗ РФ «О радиационной безопасности населения», ни в Нормах радиационной безопасности не введены понятия «существующее облучение», к которому относится облучение на площадках ядерного и уранового наследия, и «референсный уровень», который используется для обеспечения радиационной безопасности населения, проживающего на площадках наследия или использующего их для ведения хозяйственной деятельности.

Данный пробел необходимо устранить в ближайшем будущем. Предложения по совершенствованию российского регулирования обращения с ядерным наследием представлены в брошюре [17].

Justification of Remediation Criteria of Uranium Legacy Sites

A.V. Titov, N.K. Shandala, Yu.S. Belskikh, D.V. Isaev, M.P. Semenova,
T.A. Doronjeva, K.Yu. Oskina, Yu.V. Gushchina

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia
Contact person: Alexey Viktorovich Titov: titov_fmhc@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To present approaches to establishing the criteria for remediation of sites contaminated due to past activities of uranium mining and milling facilities. These facilities are considered today as uranium legacy.

Results: This paper presents the justified reference levels expressed in terms of annual effective dose values, which are recommended for using as remediation criteria for sites contaminated due to past activities of uranium mining and milling facilities (uranium legacy sites).

Depending on further use of the sites after remediation, these criteria range from 1 $\mu\text{Sv}/\text{year}$, in case of temporary presence of the population, to 10 $\mu\text{Sv}/\text{year}$, in case of permanent residence of the population and conducting economic activities.

Conclusions: In accordance with the international basic safety standards, accepted more than 10 years ago, exposure situations from radioactive material retained from previous activities refer to the existing exposure situation.

Nevertheless, neither Federal Law “On Radiation Safety of the Population” nor Radiation Safety Standards have so far introduced terms “existing exposure situation” covering exposure at nuclear and uranium legacy sites and “reference level”, which is used to assure radiation safety of the population living at legacy sites or using these sites for the purpose of the economic activities.

Key words: uranium legacy, remediation criteria, site using areas, natural radionuclides, radioactive contamination, remediation, past activities, manmade radionuclides, specific activity

For citation: Titov AV, Shandala NK, Belskikh YuS, Isaev DV, Semenova MP, Doronjeva TA, Oskina KYu, Gushchina YuV Justification of Remediation Criteria of Uranium Legacy Sites. Medical Radiology and Radiation Safety 2021;66(4):54-57.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-54-57

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Указ президента Российской Федерации «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» Москва, Кремль. 13 октября 2018 года N 585.
2. Романович И.К., Стамат И.П., Санжарова Н.И., Панов А.В. Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Часть 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации. Радиационная гигиена. 2016;9(4):6-15. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15.
3. Титов А.В., Шандала Н.К., Исаев Д.В., Семенова М.П., Серегин В.А., Бельских Ю.С., Остапчук Т.В., Чернобаев А.С. Оценка радиационной опасности пребывания населения и ведения хозяйственной деятельности в районе расположения выработанного уранового месторождения. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(2):11–16. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-2-11-16.
4. Решение Экономического совета СНГ о докладе «Реабилитация территорий государств-участников Содружества Независимых Государств, подвергшихся деятельности урановых производств» (Вместе с Рабочей группой по подготовке Доклада) (Принято в г. Москве 27.12.2006).
5. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». 2009.
6. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности, часть 3. МАГАТЭ. Вена, 2015.
7. Policy and strategies for environmental remediation. IAEA nuclear energy series no. NW-G-3.1 - Vienna: International Atomic Energy Agency. 2015: 48 p.
8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010): СП 2.6.1.2612–10 (Пост. от 26 апреля 2010 г. № 40). М., 2010. 82 с.
9. СанПиН 2.6.1.2800-10 Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения.
10. СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов.
11. Стамат И.П., Кормановская Т.А., Горский Г.А. Радиационная безопасность населения России при облучении природными источниками ионизирующего излучения: современное состояние, направления развития и оптимизации. // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7. № 1 С. 54–62.
12. Источники облучения для населения России (ibrae.ac.ru). www.ibrae.ac.ru/russian/chernobyl-3d/man/1.htm.
13. Шандала Н.К., Титов А.В., Исаев Д.В., Семенова М.П., Серегин В.А., Остапчук Т.В., Шлыгин В.В., Старинский В.Г., Старинская Р.А. Оценка влияния ливневых дождей на радиационную обстановку в районе расположения штольни №16 бывшего предприятия ЛПО «Алмаз». Медицина экстремальных ситуаций. 2017. Т. 60. № 2. С. 202–207.
14. Шандала Н.К., Исаев Д.В., Гимадова Т.И., Киселёв С.М., Семенова М.П., Серегин В.А., Титов А.В., Золотухина С.Б., Журавлёва Л.А., Хохлова Е.А. Радиационная обстановка в городе Краснокаменске. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015;Т. 60. № 6. С. 10–14.
15. Серия Норм МАГАТЭ по безопасности «Освобождение площадок от регулирующего контроля после завершения практической деятельности». Руководство № WS-G-5.1. Вена, 2008; 42 с.
16. CARE.Final Report. Prepared by Hildegard Vandenhove, Andrew Bousher, Per Hedemann Jensen, Duncan Jackson, Barbara Lambers, Theo Zeevaert. For European Commission DG XI Environment, Nuclear Safety and Civil Protection under contract 96-ET-006. September 1999.
17. Шандала Н.К., Киселев С.М., Титов А.В., Семенова М.П., Серегин В.А. Совершенствование регулирующей инфраструктуры при надзоре за объектами ядерного наследия. Под ред. В.В. Уйба и А.С. Самойлова. http://фцп-ярб2030.рф/society/publications/.

REFERENCES

1. Decree of the President of the Russian Federation "On Approval of the Fundamentals of State Policy in the Field of Nuclear and Radiation Safety of the Russian Federation for the Period up to 2025 and Beyond" Moscow, Kremlin. October 13, 2018 N 585. (In Russian)].
2. Romanovich IK, Stamat IP, Sanzharova NI, Panov AV. Criteria for rehabilitation of facilities and territories contaminated with radionuclides as a result of past activities: Part 1. The choice of indicators for justification of the criteria for rehabilitation. Radiation Hygiene. 2016;9(4):6-14. (In Russian).
3. Titov AV, Shandala NK, Isaev DV, Semenova MP, Seregin VA, Belskikh YuS, Ostapchuk TV, Chernobaev AS. Assessment of the Public Radiation Protection and Economic Activity Safety in the Area of the Developed Uranium Deposit. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(2):11–16. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-2-11-16. (In Russian).
4. Decision of the CIS Economic Council on the report "Remediation of the territories of the member states of the Commonwealth of Independent States affected by uranium production" (Together with the Working Group on the preparation of the Report) (Adopted in Moscow on December 27, 2006). (In Russian).
5. ICRP Publication 103. Translation from English / Kiselev MF, Shandala NK. general editors. M.: Publ. JCS PKF «Alana», 2009. (In Russian).
6. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General safety requirements, part 3. IAEA. Vienna, 2015. (In Russian).
7. Policy and strategies for environmental remediation. IAEA nuclear energy series no. NW-G-3.1 - Vienna: International Atomic Energy Agency. 2015:p. 48.
8. SanPiN 2.6.1.2819-10. Radiation Protection of the population living at the areas of peaceful nuclear explosions (1965 - 1988). Health rules and regulations. (In Russian).
9. SanPiN 2.6.1.2800-10 Health Physics Requirements to Limit Public Exposure due to Natural Radiation Sources. (In Russian).
10. SanPiN 2.3.2.1078-01 Health Physics Requirements for Safety and Nutritional Value of Food. (In Russian).
11. Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorskiy GA. Russian Federation population radiation protection during the exposure from natural ionizing irradiation sources: modern state and directions for development and optimization. Radiation hygiene. 2014;7(1):54-62. (In Russian).
12. Sources of radiation exposure for the Russian population (ibrae.ac.ru). www.ibrae.ac.ru/russian/chernobyl-3d/man/1.htm. (In Russian).
13. Shandala NK, Titov AV, Isaev DV, Semenova MP, Seregin VA, Ostapchuk TV, Shlygin VV, Starinsky VG, Starinskaya RA. The impact assessment of the heavy rain consequences on the radiation situation around the shaft-16 of the former ALMAZ enterprise. Medicine of Extreme Situations. 2017;2 (60):202-207. (In Russian).
14. Shandala NK, Isaev DV, Gimadova TI, Kiselev SM, Semenova MP, Seregin VA, Titov AV, Zolotukhina SB, Zhuravleva LA, Khohlova EA. Current Radiation Situation in Krasnokamensk. Medical Radiology and Radiation Safety. 2015;60(6):10–14. (In Russian)].
15. Release of sites from regulatory control on termination of practices. Safety guide no. WS-G-5.1. Vienna. International Atomic Energy Agency. 2006;42 p. (In Russian).
16. CARE.Final Report. Prepared by Hildegard Vandenhove, Andrew Bousher, Per Hedemann Jensen, Duncan Jackson, Barbara Lambers, Theo Zeevaert. For European Commission DG XI Environment, Nuclear Safety and Civil Protection under contract 96-ET-006. September 1999.
17. Shandala NK, Kiselev SM, Titov AV, Semenova MP, Seregin VA. Enhancing the regulatory framework during the supervision of nuclear legacy sites. Ed.: Uiba V. and Samoilo A. http://фцп-ярб2030.рф/society/publications/ (In Russian)].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 16.02.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 16.02.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

А.Ю. Бушманов, А.П. Бирюков, Э.П. Коровкина, А.С. Кретов, И.В. Власова,
А.А. Ломтева, А.А. Гугина

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СОВЕТОВ ПО УСТАНОВЛЕНИЮ СВЯЗИ ЗАБОЛЕВАНИЯ, ИНВАЛИДНОСТИ И СМЕРТИ С ВОЗДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

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

Контактное лицо: Ирина Владимировна Власова: i_v_vlasova@mail.ru

РЕФЕРАТ

Одной из систем экспертных советов, существующих на территории Российской Федерации, является Межведомственный экспертный совет (МЭС), куда могут обратиться граждане, для установления причины связи заболевания, инвалидности и смерти с воздействием ионизирующего излучения.

В статье рассмотрены нормативные документы и законодательная база, регламентирующие работу МЭС, по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся радиационному воздействию вследствие Чернобыльской катастрофы. Представлены результаты деятельности межведомственных экспертных советов РФ за 2010–2020 гг.

Определены категории граждан, имеющие право подавать документы для проведения экспертизы по установлению причинной связи заболевания, инвалидности и смерти в результате воздействия ионизирующего излучения в МЭС.

Ключевые слова: Межведомственные экспертные советы (МЭС), ЧАЭС, законодательная база, организационная структура

Для цитирования: Бушманов А.Ю., Бирюков А.П., Коровкина Э.П., Кретов А.С., Власова И.В., Ломтева А.А., Гугина А.А.

Результаты деятельности межведомственных экспертных советов по установлению связи заболевания, инвалидности и смерти с воздействием радиационных факторов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.58–61.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-58-61

Введение

Изучение состояния здоровья населения, подвергшегося облучению в результате Чернобыльской катастрофы, продолжает оставаться одной из важных проблем здравоохранения.

Для реализации мер социальной защиты лиц, перенесших (перенесших) лучевую болезнь и другие заболевания, связанные с радиационным воздействием вследствие чернобыльской катастрофы или с работами по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС создана сеть межведомственных экспертных советов (МЭС) по установлению причинной связи заболевания с воздействием радиации [1, 2].

Исходной информацией для работы МЭС являются сведения о дозовых нагрузках на пациента. Источником этих данных могут являться записи в военных билетах, справки из военкоматов, архивные сведения Министерства обороны и территориальных учреждений.

Анализ литературных данных, результатов работы межведомственных экспертных советов свидетельствует об исключительной сложности ретроспективной диагностики лучевых поражений и их экспертизы [6–7].

В экспертной практике нередки случаи постановки диагноза острой и хронической лучевой болезни при данных радиационного анамнеза, исключающих накопление доз облучения, превышающих порог для развития соответствующих тканевых реакций [3–5].

Организация работы межведомственных экспертных советов

Экспертные советы в Российской Федерации организованы в соответствии с Приказом Минздравсоцразвития РФ № 475 от 28.07.2005 (с изменениями на 26.01.2012) «О создании и организации деятельности межведомственных экспертных советов по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов» и Приказа Минздравсоцразвития РФ от 21 апреля 2005 г. № 289 «Об утверждении Положения о межведомственном экспертном совете по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию

радиационных факторов». В последнем из них определены регламент деятельности, персональный состав межведомственных экспертных советов и состав специалистов, входящих в рабочую группу МЭС.

В настоящее время в РФ функционируют шесть Межведомственных экспертных советов с закрепленной за ними зоной ответственности:

1. Российский МЭС создан на базе Федерального государственного учреждения «Российский научный центр рентгенодиологии Федерального агентства по высокотехнологической медицинской помощи» (ФГБУ «РНЦРР» Минздрава России, г. Москва) и обслуживает население Центрального федерального округа.
2. Новосибирский региональный МЭС создан на базе Государственного Новосибирского областного клинического диагностического центра (ГБУЗ НСО «ГНОКДЦ», г. Новосибирск) и обслуживает население Дальневосточного федерального округа и Сибирского федерального округа.
3. Ростовский региональный МЭС создан на базе Ростовского медицинского университета (ГБОУ ВПО РостГМУ Минздрава России, г. Ростов-на-Дону) и обслуживает население Южного федерального округа.
4. Санкт-Петербургский региональный МЭС создан на базе Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины МЧС России (ФГБУ ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России, г. Санкт-Петербург) и обслуживает население Северо-Западного федерального округа и Приволжского федерального округа.
5. Челябинский региональный МЭС создан на базе федерального государственного учреждения науки «Уральский научно-практический центр радиационной медицины ФМБА России» (ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России, г. Челябинск) и обслуживает население Уральского федерального округа.
6. Федеральный МЭС создан на базе федерального государственного учреждения «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России» (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва) и обслуживает население Российской Федерации в целом.

Таблица 1

Результаты деятельности межведомственных экспертных советов РФ по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов, за 2010–2020 гг.
The results of the activities of the interdepartmental expert councils of the Russian Federation on establishing the causal relationship of diseases, disability and death of citizens exposed to radiation factors for 2010–2020.

Год	Всего обращений	Связь с воздействием ИИ					
		Результаты экспертизы, %		Новообразования, %		Болезни системы кровообращения, %	
		Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
2010	3330	57,2	38,6	85,6	11,9	43,9	49,7
2011	3660	52,7	36,5	86,4	13,6	44,4	53,2
2012	3251	48,8	51,2	69,2	19,2	31,6	68,4
2013	3176	52,7	37,3	80,9	16,9	45,8	47,2
2014	2547	53,1	35,5	73,8	21,9	48,5	13,3
2015	2483	55,2	36,9	79,1	19,5	91,3	8,7
2016	2376	51,3	31,5	71,9	25	46,1	44,8
2017	2364	45,5	26,3	69,7	20,7	38,3	43,2
2018	2332	41	28,1	77,4	28,2	20	28
2019	2243	51,6	31,2	72,8	23,4	21,2	25,3
2020	1843	48,6	29,7	77	35	20,5	43

Нормативно-правовая база обеспечивающая деятельность МЭС включает 12 основных регламентирующих документов (в их действующей редакции):

- Федеральный закон № 323-ФЗ от 21 ноября 2011 г. «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации».
- Закон РФ № 1244-1 от 15.05.1991 «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС»
- Федеральный закон от 26 ноября 1998 г. № 175-ФЗ «О социальной защите граждан Российской Федерации, подвергшихся воздействию радиации вследствие аварии в 1957 году на производственном объединении «Маяк» и сбросов радиоактивных отходов в реку Теча».
- Федеральный Закон № 2 от 10 января 2002 г. «О социальных гарантиях гражданам, подвергшимся радиационному воздействию вследствие ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне».
- Закон РФ № 3061-1 от 18.06.1992 г «О внесении изменений и дополнений в Закон РФ «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС».
- Постановление Верховного Совета РФ от 27.12.1991 г. № 2123-1 «О распространении действия Закона РСФСР «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» на граждан из подразделений особого риска».
- Постановление Правительства РФ от 2004г. № 592 «Об утверждении списка заболеваний, возникновение или обострение которых обусловлено воздействием радиации вследствие катастрофы на ЧАЭС, аварии в 1957 г. на ПО «Маяк» и сбросов радиоактивных отходов в реку Теча».
- Постановление Правительства РФ № 728 от 02.10.2002 г. «О порядке установления межведомственными экспертными советами причинной связи развившихся у детей заболеваний с последствиями ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне».
- Приказ Минздравсоцразвития РФ от 21 апреля 2005 г. № 289 «Об утверждении Положения о межведомственном экспертном совете по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов».

– Приказ Минздравсоцразвития РФ от 28.07.2005 г. № 475 «О создании и организации деятельности межведомственных экспертных советов по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов».

- Приказ Минздравсоцразвития РФ № 386н от 07.08.2008 г. «О внесении изменений в приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 28 июля 2005 года № 475 «О создании и организации деятельности межведомственных экспертных советов по установлению причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов».
- Письмо Минздравсоцразвития РФ № 916-18 от 28.03.2006 г. Перечень документов для представления в экспертный Совет ликвидатором аварии на ЧАЭС.

В МЭС ежегодно проводится экспертиза по установлению причины связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов вследствие аварий на Чернобыльской АЭС, на производственном объединении «Маяк», испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, а также жителей загрязненных радионуклидами территорий, ветеранов подразделений особого риска, потомков 1-го и 2-го поколения лиц, облученных в результате радиационных аварий.

Под причинной связью развившихся заболеваний и инвалидности лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, понимается связь между наступлением вредных последствий для здоровья указанных лиц и воздействием на них радиационных факторов вследствие Чернобыльской катастрофы.

Порядок обращения граждан в межведомственные экспертные советы

При наличии подозрения на связь возникшего заболевания с радиационным воздействием вследствие Чернобыльской катастрофы, в т.ч. с работами по ликвидации последствий катастрофы, пациент имеет право пройти экспертизу сначала в региональном МЭС по месту жительства, в соответствии с описанным выше прикреплением. В случаях несогласия пациента с решением регионального совета он имеет право обратиться для повторной экспертизы в Федеральный МЭС.

Необходимые документы и заявление пациента о проведении экспертизы направляются в МЭС органом здравоохранения субъекта РФ. По результатам рассмотрения поступивших документов МЭС принимает решение об установлении (отказе в установлении) причинной связи заболеваний (инвалидности и смерти) гражданина с воздействием радиационных факторов, или об отложении рассмотрения дела в связи с необходимостью получения дополнительных сведений и (или) документов.

Действующий перечень заболеваний, возникновение или обострение которых обусловлено воздействием радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС в настоящий момент включает следующие нозологии:

1. Детерминированные эффекты (заболевания развиваются только при превышении установленного порога полученной дозы ионизирующего излучения):
 - Острая и хроническая лучевая болезнь (Т66)
 - Местное лучевое поражение (лучевые ожоги, L58)
 - Лучевая катаракта (H26.8)
 - Лучевой гипотиреоз (E 03.8)
2. Стохастические эффекты (порог дозы не установлен; заболевания регистрируются среди необлученного населения; воздействие ионизирующего излучения увеличивает частоту возникновения заболевания):
 - Апластическая анемия (D 61.2)
 - Новообразования (C 00-D 48)

Дополнительно, МЭС имеют возможность учитывать современные научно-клинические данные о радиобиологических эффектах патогенного воздействия ионизирующего излучения и устанавливать связь отдельных заболеваний, не включенных в перечень, с воздействием радиационных факторов вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС.

Заключение

На территории РФ существует система экспертных советов (МЭС), куда могут обратиться граждане, для установления причиной связи заболевания, инвалидности и смерти с воздействием ионизирующего излучения. Категории граждан, имеющих право на проведение указанной экспертизы, порядок обращения граждан и место обращения, порядок обжалования решений МЭС и четко регламентированы нормативно-правовыми документами РФ.

МЭС проводят экспертизу по установлению причинной связи заболевания, инвалидности и смерти граждан, пострадавших от воздействия ионизирующего излучения в результате аварии на Чернобыльской АЭС; аварий на производственном объединении «Маяк»; испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, а также жителей загрязненных радионуклидами территорий, ветеранов подразделений особого риска, потомков 1-го и 2-го поколения лиц, облученных в результате радиационных аварий

При вынесении заключения МЭС учитывают Перечень заболеваний, возникновение или обострение которых обусловлено воздействием радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, аварии в 1957 г. на производственном объединении «Маяк» и сбросов радиоактивных отходов в реку Течу, утвержденный постановлением Правительства Российской Федерации от 4.11.2004 г. № 592

В то же время, перечни заболеваний и патологических состояний, используемые при проведении экспертизы связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан, подвергшихся воздействию радиационных факторов в РФ, не в полной мере соответствуют современным представлениям о формировании радиационно-обусловленной патологии [10] и требуют пересмотра и уточнения с целью формирования единых подходов к проведению данного вида экспертизы МЭС.

Results of the Activities of Interdepartmental Expert Advice on Establishing Communication Diseases, Disabilities and Death with Impact Radiation Factors

A.Yu. Bushmanov, A.P. Biryukov, E.P. Korovkina, A.S. Kretov, I.V. Vlasova, A.A. Lomteva, A.A. Gugina

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

Contact person: Irina Vladimirovna Vlasova: i_v_vlasova@mail.ru

ABSTRACT

One of the systems of expert councils that exist on the territory of the Russian Federation is the Interdepartmental Expert Council (IEC), where citizens can apply to establish the cause of the connection between illness, disability and death with exposure to ionizing radiation.

The article discusses the normative documents and the legal framework governing the work of the IEC, to establish the causal relationship of diseases, disability and death of citizens exposed to radiation as a result of the Chernobyl disaster. The results of the activities of interdepartmental expert councils of the Russian Federation for 2010–2020 are presented.

The categories of citizens who have the right to submit documents for an examination to establish the causal relationship of illness, disability and death as a result of exposure to ionizing radiation in the IEC have been determined.

Key words: *Interdepartmental Expert Councils (IEC), Chernobyl atomic power station (ChAPS), legislative base, organizational structure*

For citation: Bushmanov AYu, Biryukov AP, Korovkina EP, Kretov AS, Vlasova IV, Lomteva AA, Gugina AA. Results of the Activities of Interdepartmental Expert Advice on Establishing Communication Diseases, Disabilities and Death with Impact Radiation Factors. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2021;66(4):58-61.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-58-61

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.02.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.02.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сборник нормативных документов к Закону Российской Федерации «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС». – М.: Энергоатомиздат, 1993, 238 с.
2. Бушманов А.Ю., Гуськова А.К., Краснюк В.И., Галстян И.В. Методическое пособие по установлению связи заболеваний с воздействием ионизирующего излучения. – М., ФМБЦ им.А.И. Бурназяна ФМБА России, 2009, 27 с.
3. Гуськова А.К. Трудности в экспертизе при установлении связи заболеваний с воздействием радиации в отдаленные сроки после облучения и методы по их преодолению // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2010. Т.55. №1, С.81–85.
4. Гуськова А.К. Трудности и ошибки в интерпретации данных о связи заболеваемости и смертности различных категорий лиц с воздействием ионизирующего излучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2010. Т.55. №6. С.72–74.
5. Туков А.Р., Гуськова А.К. Анализ опыта и источников ошибок в оценке состояния здоровья лиц, вовлеченных в радиационные аварии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 1997. Т.42. №5. С. 5–10.
6. Бушманов А.Ю., Бирюков А.П., Коровкина Э.П., Кретов А.С. Анализ нормативно – правовой базы и результаты деятельности межведомственных экспертных советов по установлению причинной связи заболевания, инвалидности и смерти граждан России, подвергшихся воздействию радиационных факторов вследствие чернобыльской катастрофы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т.61. № 3. С. 103–108
7. Бушманов А.Ю., Рожко А.В., Бирюков А.П., Кретов А.С., Надыров Э.А., Коровкина Э.П. Анализ нормативно-правовой базы, используемой экспертными советами при установлении причинной связи заболеваний, инвалидности и смерти граждан Союзного государства, подвергшихся радиационному воздействию вследствие Чернобыльской катастрофы // «Медицина экстремальных ситуаций». 2016. Т.58. № 4. С. 8–17
8. Санитарные правила 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009).
9. Санитарные правила 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99/2010)
10. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты. (Труды МКРЗ; публикация 118)/ Ф. А. Стюарт и др.; ред.: А. В. Аклеев, М. Ф. Киселев; пер. с англ.: Е. М. Жидкова, Н. С. Котова. Челябинск: Книга, 2012. – 384 с.

REFERENCES

1. Collection of Normative Documents of the Russian Federation Law «On Social Protection of Citizens Exposed to Radiation From the Chernobyl Accident». Moscow, Energoatomisdat Publ., 1993. 238 p. (In Russian).
2. Bushmanov AYu, Guskova AK, Krasnyuk VI, Galstyan IV. Methodological Manual for Establishing the Relationship of Diseases with Exposure to Ionizing Radiation. Moscow, A.I. Burnazyana FMBA of Russia Publ., 2009. 27 p. (In Russian).
3. Guskova AK. The Complexity of the Casual Relationship Expert Assessments for Radiation Exposure and Diseases at Late Terms after Irradiation and Overcome Measures. Medical Radiology and Radiation Safety. 2010. 55(1):81–85. (In Russian).
4. Guskova AK. Difficulties and errors in the interpretation of data on the relationship between morbidity and mortality of various categories of people with exposure to ionizing radiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2010. 55(6): 72–74. (In Russian).
5. Tukov AP, Guskova AK. Анализ опыта и источников ошибок в оценке состояния здоровья лиц, вовлеченных в радиационные аварии. Medical Radiology and Radiation Safety. 1997. 42(5): 5–10. (In Russian).
6. Bushmanov AYu, Biryukov AP, Korovkina EP, Kretov AS, Buhvostova NN. The Analysis of Documentary Regulatory Base and Results of Activity of Interdepartmental Advisory Councils on Establishment of the Causal Relationship of Diseases, Disability and Death of the Citizens of Russia Affected by Radiation Factors Owing to the Chernobyl Accident. Medical Radiology and Radiation Safety. 2016. 61. (3): 103–108. (In Russian).
7. Bushmanov AYu, Rozhko AV, Biryukov AP, Kretov AS, Nadyrov EA, Korovkina EP. Analysis of the Applied Regulatory and Legal Framework Used by the Advisory Councils in Establishment of the Causal Relationship in Cases of Morbidity, Disability and Mortality Among the Allied States Citizens Exposed to Radiation in Chernobyl Accident. Medicine of Extreme Situations. 2016. 58. (4): 8–17. (In Russian).
8. Sanitary rules 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standards" (NRB-99/2009). (In Russian).
9. Sanitary rules 2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety" (OSPORB-99/2010). (In Russian).
10. ICRP Report on Tissue Reactions, Early and Long-Term Effects in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in the Context of Radiation Protection. ICRP; Pub. (118) / Stuart FA, et al., ed. Akleev AV, Kiselev MF. transl. English: Zhidkova EM, Kotova NS. Chelyabinsk, Kniga Publ., 2012. – 384 p. (In Russian).

И.А. Галстян, А.Ю. Бушманов, Н.А. Метляева, В.Ю. Соловьев, Л.Ю. Мершин, М.В. Кончаловский,
В.Ю. Нугис, О.В. Щербатых, Л.А. Юнанова, А.А. Давтян, Е.Е. Обухова

ХРОНИЧЕСКАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ПОДОСТРОГО ТЕЧЕНИЯ ОТ ВНЕШНЕГО НЕРАВНОМЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ КОНТАКТЕ С ПОТЕРЯННЫМ ИСТОЧНИКОМ

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

Контактное лицо: Ирина Алексеевна Галстян: igalstyan@rambler.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Анализ особенностей клинического течения хронической лучевой болезни (ХЛБ) вследствие внешнего неравномерного хронического облучения при длительном бытовом контакте с потерянным источником ионизирующего излучения.

Материал и методы: Проведен клинический анализ 2 клинических наблюдений больных, у которых в результате внешнего неравномерного облучения вследствие случайного бытового контакта с потерянными источниками ионизирующего излучения развились ХЛБ подострого течения и хронический лучевой дерматит.

Результаты: Мальчик К.А. с возраста 1 год в течение 7 лет подвергался хроническому лучевому воздействию (в течение 1,5 лет – резко неравномерному) в суммарной дозе около 6,3 Гр по данным ЭПР эмали зуба, по данным ретроспективного восстановления дозы на красный костный мозг с помощью воксельного моделирования – 26 (19–37) Гр.

Ф.В.В., мужчина 38 лет, подвергался фракционированному облучению в течение 5 месяцев в суммарной дозе по данным цитогенетического исследования 7,9 Гр и при мощности дозы около 0,035 Гр/ч.

При обследовании в стационаре у больных диагностирована ХЛБ, в рамках костномозгового синдрома которой наблюдались глубокая тромбоцитопения, умеренные лейко- и нейтропения, умеренный анемический синдром. Последний не характерен для типичного течения ХЛБ и является критерием, указывающим на подострое течение заболевания. Кроме того, были обнаружены признаки хронического лучевого дерматита в проекции действия пучка ионизирующего излучения. После прекращения облучения у больных не наблюдалось восстановления кроветворной функции, и в периоде ближайших последствий у них развился миелодиспластический синдром (МДС) с дальнейшей трансформацией в острый лейкоз.

Выводы: 1. Случайный длительный бытовой или криминальный контакт с источником ионизирующего излучения может приводить к формированию ХЛБ с нетипичным подострым течением и формированием МДС и последующей трансформации в лейкоз в исходе заболевания или в периоде его последствий.

2. Можно предположить, что при внешнем неравномерном облучении, приводящем к развитию ХЛБ подострого течения и к хроническому лучевому поражению кожи, агранулоцитоз может отсутствовать.

3. Неблагоприятными прогностическими признаками в отношении развития МДС и лейкоза в исходе или в периоде последствий ХЛБ подострого течения при внешнем неравномерном облучении являются длительно сохраняющиеся после прекращения облучения глубокая тромбоцитопения и анемический синдром.

Ключевые слова: хроническая лучевая болезнь, подострое течение, неравномерное облучение, потерянный источник ионизирующего излучения, агранулоцитоз, анемический синдром, миелодиспластический синдром, острый лейкоз

Для цитирования: Галстян И.А., Бушманов А.Ю., Метляева Н.А., Соловьев В.Ю., Мершин Л.Ю., Кончаловский М.В., Нугис В.Ю., Щербатых О.В., Юнанова Л.А., Давтян А.А., Обухова Е.Е. Хроническая лучевая болезнь подострого течения от внешнего неравномерного облучения при контакте с потерянным источником // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С. 62–69.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-62-69

Введение

Радиационные аварии с потерянными источниками ионизирующего излучения демонстрируют, что вследствие грубых нарушений эксплуатации, хранения, транспортировки или при неправильном захоронении они могут стать доступными лицам из населения, не имеющим представления о правилах обращения с ними или способными использовать их в криминальных целях.

В настоящее время в атомной промышленности отсутствуют условия для индукции хронических лучевых поражений. Их возникновение может быть возможным лишь при случайном неконтролируемом длительном контакте с мощным источником радиации. Если хроническому или фракционированному воздействию подвергается человек, постоянно находящийся в поле облучения в статичной позе, то в таком случае чаще всего возможно развитие сочетанных поражений: хронической лучевой болезни (ХЛБ) и хронического радиационного дерматита. При высокой мощности дозы возможно особое (нестандартное) течение ХЛБ с глубоким поражением всех ростков костномозгового кроветворения, с развитием в периоде основных клинических проявлений агранулоцитоза и анемического синдрома, а также в исходе или периоде отдаленных последствий –

миелодиспластического синдрома (МДС) с дальнейшей возможной трансформацией в лейкоз.

Ранее был проведен ретроспективный анализ особенностей подострого течения ХЛБ у небольшой группы работников первого атомного предприятия России, работавших в 1948–1955 гг. в особо неблагоприятных условиях производства [1]. Полученные критерии, на основании которых можно говорить о подостром течении ХЛБ, приведены в табл. 1.

Проведенное исследование показало, что при тяжелой форме костномозгового синдрома (КМС), возникшего в результате хронического гамма-облучения с высокой мощностью дозы и протекающего с развитием агранулоцитоза и анемическим синдромом, восстановление кроветворной функции костного мозга происходит с определенным ущербом, который в дальнейшем может реализоваться в виде МДС.

Развитие агранулоцитоза и анемического синдрома – признаки, отличающие подострое течение ХЛБ. Наличие агранулоцитоза и анемии у больных с ХЛБ указывает на очень глубокое поражение кроветворных клеток стволового пула. Сходные критерии подострого течения ХЛБ предлагались В.И. Краснокомом и соавт. [2].

Таблица 1

Основные клинические проявления КМС у больных ХЛБ с подострым и типичным течением, подвергшихся относительно равномерному облучению в производственных условиях
The main clinical manifestations of BMS in patients with CRS with a subacute and typical course exposed to relatively uniform irradiation in an industrial setting

№ пп	Группа больных	Количество больных (муж/жен)	Мощность дозы: Min-max M±m	Наличие агранулоцитоза/общее количество больных в группе (% от общего количества больных)	Наличие анемического синдрома (% от общего количества больных)	Развитие онкогематологического заболевания в отдаленные сроки (% от общего количества больных)	Развитие в исходе периода формирования ХЛБ панмиелофтиза (апластической анемии) (% от общего количества больных)
1	ХЛБ, подострое течение	15 (14/1)	1–9 мГр/ч 2±1 мГр/ч	10/15 (66 %)	9/15 (60 %)	9/15 (60 %)	1/15 (6,7 %)
2	ХЛБ, типичное течение	84 (60/24)	менее 0,3 мГр/сут 0,8±0,1 Гр/год	0/84 (0 %)	0/84 (0 %)	0/84 (0 %)	0/84 (0 %)

Проведенное исследование позволило установить, что при длительном относительно равномерном облучении человека с мощностью дозы 1–9 мГр/ч и более при накоплении суммарной дозы 1,7–9,6 Гр и длительности контакта более 6 и до 96 мес в 60 % наблюдений можно ожидать развитие ХЛБ со своеобразным подострым клиническим течением КМС. Основным фактором, определяющим эту особенность течения КМС, является мощность дозы, которая превышает 1 мГр/ч. При таком облучении ранний исход ХЛБ в МДС является по сути детерминированным.

Целью настоящей публикации является анализ особенностей клинического течения ХЛБ вследствие неравномерного хронического облучения при длительном бытовом контакте с потерянными источниками ионизирующего излучения.

Материал и методы

В клинике ФМБЦ им. А.И. Бурназяна наблюдались 2 больных, у которых вследствие случайного длительного контакта с радиационными источниками были диагностированы хронические лучевые поражения с развитием МДС и острого лейкоза в отдаленном периоде. Приводятся клинические описания наблюдавшихся случаев.

Результаты и обсуждение

Клиническое наблюдение 1

Очень редкой, но наблюдавшейся и в других странах [3], является ситуация, когда потерянный источник ионизирующего излучения случайно попадает в железобетонные конструкции жилого дома, и жильцы дома подвергаются хроническому радиационному воздействию.

Семья К. из четырех человек – родители и два сына в возрасте 6 лет и 1 года – вселились в квартиру в железобетонном многоэтажном здании в сентябре 1982 г. Кровать старшего сына стояла около межквартирной стены в детской комнате. Младший сын К.А. большую часть времени проводил в манеже у противоположной стены комнаты. Через 1 год в 1983 г. в связи с плохим самочувствием старший сын был направлен на медицинское обследование, при котором были выявлены тромбоцитопения и анемия. В 1984 г. появились петехии на коже и носовые кровотечения. Диагностирована апластическая анемия. Через 4 года в 1986 г. на левой стопе были обнаружены кожные изменения и остеопороз костей, которые позднее после заболевания второго ребенка ретроспективно рассматривались как подозрительные на развитие лучевого дерматита стопы и остеопороз костей левой стопы. В феврале 1987 г. диагностирована остеосаркома левой пяточной кости. В мае 1987 г. маль-

чик умер. Так как подозрений на радиационный генез развившихся заболеваний в этот момент высказано не было, дозиметрическое обследование помещения не проводилось.

13.11.1988 г. в семье родилась девочка. Она находилась с родителями в другой комнате и в детской бывала редко.

Младший сын около трех лет с 09.1982 г. по 1985 г. жил в детской комнате, затем еще 3 года с 1985 по 1988 гг. жил с родителями в другой комнате. С 05.1988 по 11.1989 опять жил в детской комнате и спал на том же месте, что раньше и старший брат. Появление картины ожога тыла правой стопы с переходом на латеральную лодыжку, аналогичной таковой у старшего ребенка, привело к подозрению о радиационном генезе выявленных изменений. При проведении дозиметрического контроля в межквартирной перегородке на глубине 1 см со стороны детской комнаты квартиры семьи К. на высоте 55 см от пола (на уровне кровати, на которой последовательно спали оба сына) был обнаружен закрытый источник ¹³⁷Cs ИГИ-Ц-4 с энергией гамма-квантов 0,662 МэВ. Источник был изъят 29.11.1989 г. Дозовые оценки были проведены сотрудниками Харьковского НИИ медицинской радиологии и отражены в справке, находящейся в архивной истории болезни К.А.

В справке подробно рассмотрены характеристики источника излучения и описана ситуация с облучением каждого члена семьи К., включая погибшего в 9-летнем возрасте ребенка. Оцененная в документе доза облучения тела для К.А. составляла 4280 бэр (42,8 Гр). Однако характер клинической картины поражения, исходя из нашего опыта, не согласуется с данной величиной дозы. Нами проведено дополнительное дозиметрическое исследование данного случая для ретроспективного восстановления дозы с использованием современных технологий расчета.

Согласно справке, источником излучения был промышленный источник на базе ¹³⁷Cs (энергия гамма-излучения 0,662 МэВ, период полураспада 30,17 лет). На 12.12.1989 г. его активность была 4,22×10¹⁰ Бк, а результатом измерения мощности дозы в открытой геометрии в 1 м от стало значение в 3,69 мГр/ч. Источник находился в межквартирной стене на глубине 1 см. Размер комнаты 3,4×3,05×2,6 м, стена – железобетонная панель толщиной 16 см, расстояние от источника до окна – 1,9 м (рис. 1).

Накопление дозы можно разделить на три этапа, характеризующиеся различными условиями облучения ночью и различной степенью неопределенности режима днём. На первом этапе, с сентября 1982 по 1985 гг., он спал в детской комнате на кровати, расположенной у противоположной от источника стены (рис. 1). На втором, с

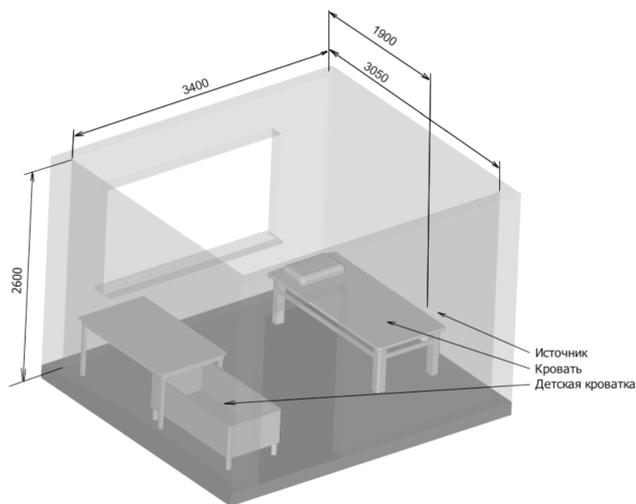


Рис. 1. Схема помещения с источником в стене
Fig 1. Scheme of a room with a source in the wall

1985 по май 1988 гг., он спал с родителями в другой комнате. На третьем, с мая 1988 по ноябрь 1989 гг., он спал на кровати у стены с источником. Все расчеты проводились с учетом изменения активности источника в течение рассматриваемого периода.

Период с сентября 1982 по 1985 гг. Расчёт показывает, что мощность дозы в области кроватки варьирует в пределах $0,5 \pm 0,1$ мГр/ч. Если в кроватке ребенок находился как минимум 16 ч в сутки, вклад в суммарную годовую дозу оценивается величиной порядка 3 Гр. Наиболее вероятная оценка дополнительной дозы, получаемой им в оставшиеся 8 ч, оценивается величиной от 0,3 до 1,2 Гр.

Оценка облучения в период с 1985 по май 1988 гг. Верхняя граница оценки годовой дозы за этот период представляется величиной порядка 3,5 Гр. Наиболее правдоподобную оценку годовой дозы облучения ребёнка можно получить на основании сравнения с годовой дозой облучения матери (1,7 Гр), оцененной в справке: эта величина составляет около 1 Гр.

Оценка условий облучения в период с мая 1988 по ноябрь 1989 гг. Из-за расположения кровати, на которой спал ребенок, в непосредственной близости к источнику, во время сна имело место крайне неравномерное облучение. Моделирование распределения дозы по телу и, в частности по красному костному мозгу (ККМ), было оценено с использованием воксельного фантома. Для моделирования применялся антропоморфный воксельный фантом ICRP [4] с уменьшением высоты (170 см) до роста ребёнка (141 см). Для вычислений использовался код Geant4 10.7 [5–7] с пакетом физических моделей QBBC.

Было проведено три расчёта методом Монте-Карло оценки распределения дозы, получаемой отдельными органами и тканями организма при различных положениях спящего на кровати ребенка возле источника (по 1 млрд историй на каждый). Сглаженные поверхности равной дозы для одной из геометрий облучения изображены на рис. 2.

Полученная в результате вычислений средняя годовая доза (Гр) на красный костный мозг (ККМ), получаемая за 8 ч сна, представлена на рис. 3.

Расчёты показали, что гистограмма доза-объем для ККМ для двух других поз не отличается существенно от приведенного на рис. 3. Величина усреднённой по позе и по объёму ККМ годовой мощности дозы, получаемой за время сна, равнялась $6,54 \pm 1,28$ Гр/год.

Дополнительная доза, как и в двух других периодах, могла появляться за счёт облучения днём. Мы предпола-

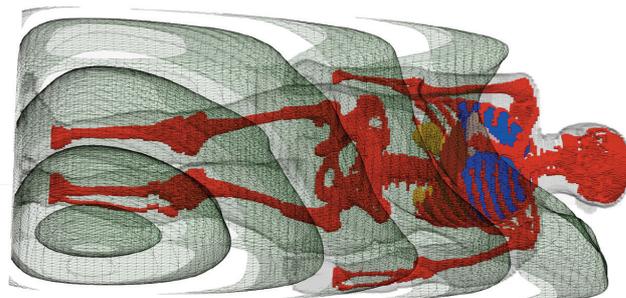


Рис. 2. Геометрия облучения – лёжа на спине, облучение слева. Среди органов и тканей отмечены цветом: красным – места расположения ККМ в скелете, синим – лёгкие, коричневым – печень, розовым – сердце, оранжевым – почки. Зелёные полупрозрачные поверхности – поверхности равной дозы, получаемой за 8 ч сна (Гр/год)
Fig. 2. Geometry of irradiation – lying on the back, irradiation on the left. The organs and tissues are marked with color: red – the location of the red bone marrow in the skeleton, blue – lungs, brown – liver, pink – heart, orange – kidneys. Green translucent surfaces – surfaces of equal dose received in 8 h of sleep (Gy/year)

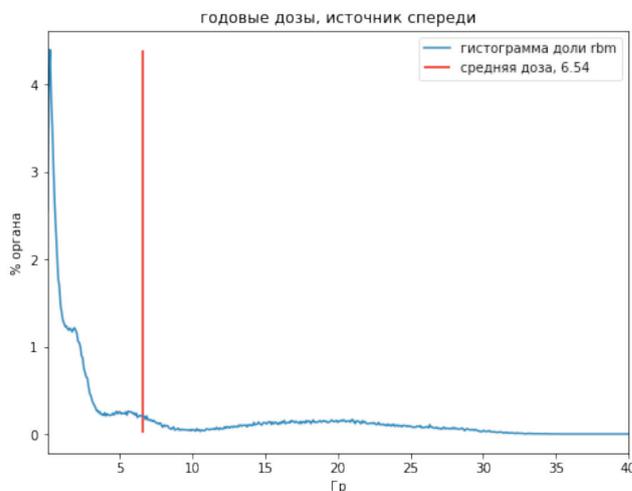


Рис. 3. Распределение ККМ по дозе (красной вертикальной чертой обозначено средневзвешенное значение)
Fig. 3. Distribution of red bone marrow by dose (the red vertical line indicates the weighted average value)

гаем, что с учетом учебы в школе и нахождения вне квартиры часть времени, она составляла величину около 1,5 (0,5–2,5) Гр.

Интегральная оценка дозы облучения ККМ равнялась 26 (19–37) Гр за 7 лет. К сожалению, неопределённость оценки дозы достаточно высокая, но это связано с отсутствием надежных исходных данных для её более точного определения.

Мальчик был обследован в Республиканском специализированном диспансере Украины. В выписке отмечено, что К.А. заболел в сентябре 1989 г., когда появились шелушение и язвы на правой стопе и голени, обширные экстрavasаты на различных участках тела. В анализах крови тромбоцитопения ($68,0 \times 10^9/\text{л}$), лейкопения ($3,1 \times 10^9/\text{л}$) и небольшая анемия (эритроциты – $3,8 \times 10^{12}/\text{л}$, Hb – 116 г/л).

При обследовании в апреле 1990 г. в клинике ФМБЦ им. А.И. Бурназяна у пострадавшего были выявлены тромбоцитопения до $(40–60) \times 10^9/\text{л}$ и лучевой ожог 3×3 см в области тыла латеральной лодыжки правой ноги, что ещё раз свидетельствовало о неравномерном характере облучения. Доза по ЭПР эмали зуба – 6,3 Гр ($\pm 15\%$).

У К.А. был установлен диагноз ХЛБ II степени тяжести и местного лучевого поражения стопы тяжелой степени. Была произведена кожная пластика с хорошим результатом.

В мае 1990 г., несмотря на прекращение облучения, у ребенка сохранялась тромбоцитопения до $50,0 \times 10^9/\text{л}$, отмечались преходящие лейко- ($3,6 \times 10^9/\text{л}$) и нейтропения ($1,5-1,6 \times 10^9/\text{л}$) со сдвигом лейкоцитарной формулы влево до миелоцитов, анемия ($3,6 \times 10^{12}/\text{л}$), которые сохранялись и в дальнейшем.

В августе 1991 г. у мальчика диагностирован МДС – рефрактерная анемия с избытком бластов с дальнейшей трансформацией в острый миелобластный лейкоз (ОММЛ). Таким образом, гемобластоз был констатирован спустя 21 мес после окончания облучения. Проводимое лечение оказалось неэффективным, и ребенок умер.

Наряду с клиническими анализами периферической крови было осуществлено цитогенетическое исследование культур лимфоцитов периферической крови у всех членов данной семьи, живых на момент поступления в клинику ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. Кровь была взята в период с 22.02 по 09.04.1990 г. Для подсчёта aberrаций хромосом использовали классический метод окраски. Полученные результаты представлены в табл. 2. С помощью точного критерия Фишера было показано, что частота дицентриков существенно превышала контрольный уровень, приведенный в работе [8] для лаборатории 7, т.е. той же лаборатории, в которой обследовались и члены семьи К. (для всех анализов уровень значимости не превышал 0,00375). В настоящее время понятно, что для ретроспективной оценки дозы и при хроническом радиационном воздействии для цитогенетической индикации дозы следует использовать FISH-окрашивание хромосом, позволяющее учитывать транслокации, относящиеся к так называемому стабильному типу aberrаций хромосом, имеющему тенденцию сохраняться с течением времени [9]. Однако в период описываемого обследования данная технология во всём мире только начала развиваться, а в нашей клинике просто отсутствовала. Поэтому для расчёта средней дозы на всё тело в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ [9] была использована линейная часть линейно-квадратичного уравнения доза–эффект для дицентриков, полученного после острого облучения крови здоровых доноров *in vitro*. В настоящей статье для этого была применена зависимость, позаимствованная из Медицинской технологии № ФС-2017/015-У [10]:

$$Y = 0,001 + 0,015 \times D + 0,063 \times D^2,$$

где Y – частота дицентриков на одну клетку, D – доза облучения (Гр).

Расчёт доз хронического облучения дан в последнем столбце табл. 2. На самом деле оценки доз могут быть и выше, т.к. не произведена коррекция частоты дицентриков на их элиминацию с течением времени после облучения. Однако в рекомендациях МАГАТЭ [9] отмечается, что имеющаяся выраженная вариабельность между отдельными людьми не позволяет произвести реалистичскую корректировку на основании только временных

параметров, хотя и предлагается экспоненциальная модель скорости исчезновения дицентриков с полупериодом около трёх лет. При этом и данная концепция может быть не точна, т.к. при изучении элиминации aberrаций хромосом у лиц, пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС (дозы острого облучения от 0,2 до 9,8 Гр), была обнаружена зависимость скорости элиминации дицентриков от величины первоначально полученной дозы, а лучше всего эмпирическим данным соответствовало не простое экспоненциальное уравнение, а более сложная зависимость, так что понятие времени «полужизни» aberrаций, декларируемое в рекомендациях МАГАТЭ [9], оказалось лишённым универсального смысла [11].

Это наблюдение демонстрирует случайный и трудно выявляемый длительный контакт лиц из населения с источником ионизирующего излучения. Семь лет семья подвергалась практически постоянному облучению. Воздействие на членов одной семьи различалось по мощности, степени равномерности, длительности всего периода облучения и продолжительности ежедневной фракции. Наименьшему облучению подвергся отец детей, так как он значительную часть дня находился вне дома и жил в другой комнате, на большем расстоянии от источника. Он подвергался относительно равномерному облучению в течение 7 лет. Диагноз ХЛБ у него установлен не был. Мать детей, домохозяйка, находилась преимущественно дома, часто бывала в детской комнате недалеко от источника излучения. Подверглась относительно равномерному облучению также в течение 7 лет. У нее после обследования был установлен диагноз ХЛБ I степени. Облучение младшей девочки было относительно равномерным в течение наиболее короткого времени (в течение 1 года). У нее также был установлен диагноз ХЛБ I степени. Мальчики подверглись резко неравномерному облучению преимущественно нижних конечностей, находясь в кровати на минимальном расстоянии от источника ионизирующего излучения. При этом надо отметить, что, если старший брат все 5 лет жизни в этой квартире спал около стены с источником излучения, то его суммарная доза обусловлена неравномерным облучением. У младшего К.А. значительная часть суммарной дозы обусловлена относительно равномерным воздействием. В течение 5,5 лет он либо находился у других стен детской комнаты (в манеже, в своей кроватке), либо жил с родителями в другой комнате. И только 1,5 года он спал на кровати у стены с источником. В течение этих 1,5 лет он подвергался резко неравномерному облучению с мощностью дозы на уровне кровати на расстоянии 1 м от стены 5 мГр/ч. В целом, у К.А. облучение было хроническим. Он облучался ежедневно, практически в течение всего дня с небольшими перерывами, когда он выходил на улицу, а в последние годы на занятия в школу.

По данным исследования ЭПР эмали зуба суммарная доза составила 6,3 Гр. Данных о состоянии показателей крови ребенка в период формирования ХЛБ мы не имеем.

Таблица 2

Результаты цитогенетических анализов культур лимфоцитов периферической крови членов семьи К. (клинический случай 1) и оценки дозы у них
Results of cytogenetic analyzes of peripheral blood lymphocyte cultures of the family K. members (case 1) and their dose assessments

Член семьи К.	Число проанализированных метафаз	Процент aberrантных клеток	Частота aberrаций хромосом на 100 клеток				Оценка дозы по частоте дицентриков, Гр
			дицентрики	центрические кольца	парные фрагменты	атипичные хромосомы	
Сын (К.А.)	100	11,0	9,0	1,0	5,0	0	5,9
Дочь	100	7,0	2,0	0	4,0	1,0	1,3
Отец	100	7,0	2,0	0	4,0	1,0	1,3
Мать	165	9,7	3,0	0,6	6,1	0	1,9

В ФМБЦ им. А.И. Бурназяна К.А. наблюдался уже после прекращения контакта с источником ионизирующего излучения, то есть в периоды исхода и отдаленных последствий ХЛБ. В это время агранулоцитоз у мальчика выявлен не был. У него сохранялись глубокая тромбоцитопения и умеренный преходящий анемический синдром. В периоде последствий у ребенка был выявлен МДС с дальнейшей трансформацией в ОММЛ. Таким образом, у К.А. суммарная доза, мощность дозы облучения и клинические особенности заболевания соответствовали критериям, представленным в табл. 1, и течение ХЛБ у мальчика может рассматриваться как подострое.

Клиническое наблюдение 2

7.07.1995 г. при плановом исследовании радиационной обстановки методом пешей гамма-съемки в кармане на двери грузового автомобиля со стороны места водителя был обнаружен источник ионизирующего излучения ^{137}Cs активностью 1,3 Ки (48,1 ГБк) [12]. Мощность излучения на поверхности источника составляла более 2 Гр/час. Мощность дозы на левой стороне сидения водителя Ф.В.В., 38 лет, оценена как 50 мГр/ч, в центре – 35 мГр/ч. Принадлежность источника и то, как он оказался в грузовике, установить не удалось. Согласно данным опроса пострадавшего предполагалось, что источник ионизирующего излучения находился в двери машины около пяти месяцев. Положение пострадавшего во время облучения и его длительность связаны с пребыванием на месте водителя. Ориентировочно оно составляло 5–8 ч в день 5–6 дней в неделю регулярно на протяжении 6 мес. В обычную 5–6-дневную рабочую неделю средняя суточная доза для всего тела достигала около 100 мГр.

Водитель машины Ф.В.В. для обследования поступил в клинический отдел ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. Средняя оценка дозы для всего тела по частотам дицентриков в культурах лимфоцитов периферической крови с коррекцией на фактор времени и с учётом хронического характера радиационного воздействия равнялась $7,9 \pm 1,3$ Гр [13]. Оценка средней дозы по частотам FISH-регистрируемых транслокаций (одноцветный вариант метода) составила 10 Гр [13]. Однако на момент опубликования цитируемой работы не имелось кривой доза–эффект (частота транслокаций) для использованных ДНК-зондов к парам хромосом 2, 3 и 8. Поэтому при расчёте дозы было использовано уравнение дозовой зависимости для частоты дицентриков при хроническом облучении, исходя из теоретического предположения об одинаковости дозовых зависимостей для дицентриков и геномной частоты транслокаций. Недавно была опубликована наша работа, посвящённая построению после острого облучения крови здоровых доноров *in vitro* кривых доза–эффект с помощью трёхцветного FISH-метода, которая включала применение ДНК зондов к парам хромосом 2, 3 и 8 [14]. Если проигнорировать обмены между FISH-окрашенными хромосомами, то произойдет симуляция одноцветного FISH-окрашивания, как при обследовании пациента Ф.В.В. В этом случае линейно-квадратичная дозовая зависимость для частот транслокаций будет иметь следующий вид:

$$Y = 0,238 + 0,819 \times D + 2,139 \times D^2,$$

где Y – частота FISH-регистрируемых транслокаций на 100 клеток, D – доза облучения (Гр).

При расчёте дозы облучения для хронического радиационного воздействия с использованием только линейной части данного уравнения оценка средней дозы на все тело составит 11,9 Гр, что с учётом всех сделанных допущений близко к оценке 10 Гр, полученной в работе [13].

Доза на область головы путем исследования ЭПР эмали зуба – $7,7 \pm 0,5$ Гр. Учитывая явную неравномерность лучевого воздействия, приблизительные дозы для других частей тела были рассчитаны исходя из расстояния от источника и предполагая, что водитель находился в сидячем положении. Доза на латеральную поверхность левого бедра, где при осмотре был обнаружен участок эпиляции 20×15 см, оценивалась как 65 Гр. На левой ягодице также выявлена область пигментации и эпиляции 10×15 см. Расчетным способом доза облучения области грудины была оценена как 10 Гр.

При поступлении в стационар в начале июля 1995 г. больной сообщил, что в течение двух месяцев замечал усталость после физической нагрузки, одышку при быстрой ходьбе и «шум» в голове. Он также заметил участок эпиляции на боковых поверхностях левого бедра и ягодицы. В крови в повторных анализах выявлялись стабильная анемия ($2,7\text{--}3,2 \times 10^{12}/\text{л}$), нейтропения ($1,5\text{--}2,0 \times 10^9/\text{л}$), лимфопения ($0,9\text{--}1,5 \times 10^9/\text{л}$), тромбоцитопения ($50,0\text{--}70,0 \times 10^9/\text{л}$). Исследование эякулята выявило полную аспермию. В биохимическом анализе крови отмечалось повышение уровня общего билирубина за счет непрямой фракции при нормальных показателях печеночных ферментов и отсутствии маркеров вирусных гепатитов (вероятно, синдром Жильбера).

13.07.1995 г., т.е. через несколько дней после последней поездки на машине и пребывания в поле действия ионизирующего излучения, было произведено исследование костного мозга в трех местах (грудина и передние ости подвздошных костей справа и слева) для того, чтобы морфологически и цитогенетически оценить неравномерность облучения. Обнаружено снижение клеточности костного мозга во всех костях, при этом наибольшая степень (5 % миелопоэтической ткани) отмечена в левой подвздошной кости. В морфологическом составе костного мозга (подсчет на 500 клеток) отмечена некоторая редукция нейтрофильного ростка как за счет пролиферирующих форм (промиелоциты, миелоциты), так и за счет сокращения числа сегментоядерных нейтрофилов, в большей степени в грудице. Результаты цитогенетического анализа культур лимфоцитов костного мозга, взятого из разных точек, представлены в табл. 3. С помощью u -критерия, как и ожидалось, было продемонстрировано отсутствие отличий распределений клеток по числу содержащихся в них дицентриков от теоретического распределения Пуассона. Также использование точного критерия Фишера показало, что хотя частота клеток с дицентриками в культуре лимфоцитов костного мозга из передней ости подвздошной кости слева и была численно выше, чем при взятии материала из двух других точек, это различие можно рассматривать лишь в виде тенденции: уровни значимости равнялись 0,172 и 0,082 при сравнении с культурами лимфоцитов из грудины и передней ости подвздошной кости справа соответственно. Скорее всего, данная неопределённость обусловлена статистически недостаточным числом метафаз, которые удалось проанализировать.

В последующие 6 мес сохранялась умеренная стабильная панцитопения (эритроциты – около $3,0 \times 10^{12}/\text{л}$, тромбоциты – $50,0\text{--}70,0 \times 10^9/\text{л}$, нейтрофилы – $1,8\text{--}2,0 \times 10^9/\text{л}$). Сохранялись полная аспермия и изменения кожи левого бедра и ягодицы. Начиная с 7-го мес после прекращения облучения, отмечено значительное ухудшение показателей периферической крови при нормальной и повышенной клеточности костного мозга с гиперплазией красного ростка и признаками миелодисплазии (многоядерные нормобласты, обилие митозов с незавершенными телофазами и кариомерами в красном ряду, слоистая цитоплазма, усиление зернистости, гигантизм клеток в нейтрофильном

Таблица 3

Результаты цитогенетических анализов культур лимфоцитов костного мозга пациента Ф.В.В. (клинический случай 2)
Results of cytogenetic analyzes of bone marrow lymphocyte cultures of patient F.V.V. (case 2)

Точка пункции костного мозга	Число проанализированных метафаз	Процент aberrантных клеток	Частота aberrаций хромосом на 100 клеток				Количество клеток с числом дицентриков			и-критерий
			дицентрики	центрические кольца	парные фрагменты	атипичные хромосомы	0	1	2	
Грудина	35	22,9	14,3	2,9	8,6	2,9	30	5	0	-0,51
Передняя ость подвздошной кости слева	121	27,3	19,8	2,5	14,0	0,8	99	20	2	-0,19
Передняя ость подвздошной кости справа	200	26,5	15,5	2,5	11,0	1,5	171	27	2	-0,21

ростке, дегенеративные мегакариоциты и гигантские тромбоциты. В большей степени эти изменения были отмечены в грудине – наименее облученном месте. Был заподозрен переход лучевой аплазии в МДС типа рефрактерной анемии по FAB классификации [15]. При этом цитогенетическое исследование костного мозга не выявило хромосомных нарушений, характерных для МДС.

Через 1 год после окончания облучения в августе 1996 г. цитогенетическое исследование выявило патологический клон с моносомией по 7 хромосоме. В сентябре 1996 г. был установлен диагноз МДС с трансформацией в ОММЛ.

Ф.В.В. подвергся менее длительному облучению, чем К.А., но с большей мощностью дозы 035 мГр/ч. Характер облучения, хотя оно, как и в первом случае, было неравномерным, отличался от облучения К.А. В отличие от ребенка, Ф.В.В. подвергся фракционированному облучению (по 58 часов в течение 5 будних дней). В выходные дни он не облучался. Суммарная доза на все тело по данным исследования ЭПР эмали зуба – 7,9 Гр. Так же как и мальчик, Ф.В.В. поступил в клинику ФМБЦ им. А.И. Бурназяна после прекращения контакта с источником ионизирующего излучения, то есть в периоде исхода и наблюдался в периоде последствий ХЛБ. Клинические данные о периоде формирования ХЛБ II степени тяжести отсутствуют. При поступлении в стационар у больного выявлены нейтропения (агранулоцитоза не было), тромбоцитопения, стойкий анемический синдром. Позднее у больного сформировался МДС с дальнейшей трансформацией в ОММЛ.

Соответственно по дозиметрическим характеристикам (мощность дозы, суммарная доза) и клиническим проявлениям периода исхода и последствий ХЛБ для заболевания Ф.В.В. также характерно подострое течение.

Следует отметить, что оба наблюдения, несмотря на разные условия и продолжительность облучения, очень близки, что и определяет общность клинической картины исходов. В обоих случаях имело место продолжительное фракционированное резко неравномерное, но при этом тотальное воздействие с близким уровнем суммарной дозы.

Анализ клинических особенностей течения ХЛБ у К.А. и Ф.В.В. показал отсутствие агранулоцитоза при

лучевой аплазии у этих больных. В клинический отдел ФМБЦ им. А.И. Бурназяна эти больные поступили после прекращения облучения. Можно предполагать, что за короткий период между прекращением контакта с источником и поступлением в стационар произошло восстановление гранулоцитарного роста кроветворения. Однако родители К.А. неоднократно обращались в медицинские учреждения в связи с плохим самочувствием сына, но ни из медицинских документов, ни с их слов неизвестно о выявлении агранулоцитоза или близких к этому состоянию показателей нейтрофилов.

Ф.В.В. поступил в клинику через 3 дня после прекращения облучения, у него также агранулоцитоз или близкие к этому состоянию показатели нейтрофилов отмечены не были. Известно, что неравномерность облучения при острой лучевой болезни приводит к уменьшению глубины нейтропении, частоты агранулоцитоза и более быстрому восстановлению гранулоцитарного роста [16]. Вполне возможно, что у данных пострадавших агранулоцитоз был в период экспозиции и непродолжительный. Этот вопрос при подостром течении ХЛБ ранее не изучался, но можно предположить существование сходной закономерности при лучевой аплазии в рамках ХЛБ.

Выводы

Случайный длительный бытовой или криминальный контакт с источником ионизирующего излучения может приводить к формированию ХЛБ с нетипичным подострым течением, в исходе которого часто развивается МДС или острый лейкоз.

На основании клинических наблюдений можно предположить, что при неравномерном облучении, приводящем к развитию ХЛБ и хронического лучевого поражения кожи, агранулоцитоз при подостром течении ХЛБ может или отсутствовать, или быть крайне непродолжительным.

Неблагоприятными прогностическими признаками в отношении развития МДС и лейкоза в исходе или в периоде последствий ХЛБ подострого течения при неравномерном облучении являются длительно сохраняющиеся после прекращения облучения глубокая тромбоцитопения и анемический синдром.

Subacute Course of Chronic Radiation Syndrome Caused External Non-Uniform Radiation Exposure of Lost Source

I.A. Galstyan, A.Yu. Bushmanov, N.A. Metlyaeva, V.Yu. Soloviev, L.Yu. Mershin, M.V. Konchalovsky, V.Yu. Nugis, O.V. Shcherbatykh, L.A. Yunanova, F.S. Torubarov, A.A. Davtian, E.E. Obuhova

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

Contact person: Irina Alekseevna Galstyan: igoalstyan@rambler.ru

ABSTRACT

Purpose: To analyze the features of the clinical course of chronic radiation syndrome (CRS) due to external non-uniform chronic exposure to prolonged household contact with a lost source of ionizing radiation.

Material and methods: Analysis of 2 clinical observations of patients who developed subacute course of CRS and chronic radiation dermatitis due to external non-uniform exposure of the lost sources of ionizing radiation are presented.

Results: Boy A. K. from the age of 1 year for 7 years was external radiation exposed (for 1.5 years non-uniform exposure) to the total dose according to EPR tooth enamel about 6.3 Gy, according to the data of retrospective dose recovery on red bone marrow using voxel modeling – 26 (19–37) Gy.

F. V. V., male, 38 years, was external non-uniform radiation exposed for 5 months, the total dose according to cytogenetic studies of 7.9 Gy (dose rate about 0.035 Gy/h).

During the examination in the hospital, the patients were diagnosed with CRS. Within the framework of the bone marrow syndrome, deep thrombocytopenia, moderate leuko- and neutropenia, and moderate anemic syndrome were observed. The latter is not typical for the typical course of CRS and is a criterion indicating a subacute course of the disease. In addition, signs of chronic radiation dermatitis were found in the projection of the action of the ionizing radiation beam. After stopping the radiation exposure, the patients did not recover their hematopoietic function, and in the period of immediate consequences, they developed myelodysplastic syndrome (MDS) with further transformation into acute leukemia.

Conclusion: 1. Accidental prolonged household or criminal contact with a source of ionizing radiation can lead to the formation of CRS with an atypical subacute course and the formation of MDS with transformation to acute leukemia in the outcome of the disease or in the period of its consequences.

2. It can be assumed that with external non-uniform radiation exposure, leading to the development of CRS and chronic radiation damage to the skin, agranulocytosis in the subacute course of CRS may be absent.

3. Adverse prognostic signs for the development of MDS and leukemia in the outcome or in the period of the consequences of subacute CRS with non-uniform exposure are long-lasting deep thrombocytopenia and anemic syndrome after the end of radiation exposure.

Keywords: chronic radiation syndrome, subacute course, non-uniform radiation exposure, lost radiation source, agranulocytosis, anemic syndrome, myelodysplastic syndrome, acute leukemia

For citation: Galstyan IA, Bushmanov AY, Metlyaeva NA, Soloviev VYu, Mershin LY, Konchalovsky MV, Nugis VYu, Shcherbatykh OV, Yunanova LA, Torubarov FS, Davtian AA, Obuhova EE. Subacute Course of Chronic Radiation Syndrome Caused External Non-Uniform Radiation Exposure of Lost Source. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):62-69.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-62-69

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Галстян И.А., Метляева М.А., Кончаловский М.В., Нугис В.Ю., Щербатых О.В., Юнанова Л.А. и др. «Подострое» течение хронической лучевой болезни. Медицинская радиология и радиационная безопасность. Принята в печать.
2. Краснюк В.И., Кончаловский М.В., Устюгова А.А. Клинические особенности подострого течения лучевой болезни. Саратовский научно-медицинский журнал. 2014. Т.10. №4. С. 858–862.
3. Hwang S-L, Guo H-R, Hsieh W-A, Hwang J-S, Lee S-D, Tang J-L, et al. Cancer risks in a population with prolonged low dose-rate gamma-radiation exposure in radiocontaminated buildings, 1983-2002. Int J Radiat Biol. 2006;82(12):849-58. DOI: 10.1080/09553000601085980.
4. ICRP Publication. 110. Adult Reference Computational Phantoms. SAGE Publications Ltd. May 2010: 166. |
5. Agostinelli S. et al. Geant4 – A Simulation Toolkit, Nucl. Instrum. Meth. A 2003;506:250-303.
6. Allison J. et al. Geant4 – Developments and Applications, IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006;53:270-278.
7. Agostinelli S. et al. Geant4 – A Simulation Toolkit, Nucl. Instrum. Meth. A 2003;506:250-303.
8. Севаньяев А.В., Хвостунов И.К., Снугирёва Г.П., Новицкая Н.Н., Антошина М.М., Фесенко Э.В. и др. Сравнительный анализ результатов цитогенетических обследований контрольных групп лиц в различных отечественных лабораториях // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013. Т. 53. № 1. С.5–24.
9. Cytogenetic dosimetry: Applications in preparedness for and response to radiation emergencies. Vienna: IAEA, 2011. 229 p.
10. Снугирёва Г.П., Богомазова А.Н., Новицкая Н.Н., Хазинс Е.Д., Рубанович А.В. Биологическая индикация радиационного воздействия на организм человека с использованием цитогенетических методов. Медицинская технология №ФС-2007/015-У. М., 2007. 29 с.
11. Нугис В.Ю., Дудочкина Н.Е. Закономерности элиминации аберраций хромосом у людей после острого облучения по данным культивирования лимфоцитов периферической крови в отдаленные сроки // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. Т. 46. № 1. С.5–16.
12. Baranov AE, Guskova AK, Davtian AA, Sevan'kaev AV, Lloid DC, Edwards AA, et al. Protracted overexposure to a ¹³⁷Cs source: II. Clinical sequelae. Radiation Protection Dosimetry. 1999. Т. 81. № 2. С. 91–100.
13. Sevan'kaev AV, Lloid DC, Edwards AA, Mikhailova GF, Nugis VYu, Domracheva EV, et al. Protracted overexposure to a ¹³⁷Cs source: I. Dose Reconstruction. Radiation Protection Dosimetry. 1999. Т. 81. № 2. С.85–90.
14. Нугис В.Ю., Снугирёва Г.П., Ломоносова Е.Е., Козлова М.Г., Никитина В.А. Трёхцветный FISH-метод: кривые доза-эффект для транслокаций в культурах лимфоцитов периферической крови после гамма-облучения *in vitro* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т.65. №5. С.12–20.
15. Миелодиспластический синдром. Клинические рекомендации. 2020. 94 с.
16. Селидовкин ГД, Барабанова АВ. Острая лучевая болезнь от общего облучения. Радиационная медицина под ред. Л.А. Ильина. ИздАТ. 2001. Т. 2. С. 62–89.

REFERENCES

- Galstyan IA, Metlyayeva NA, Konchalovsky MV, Nugis VYu, Shcherbatykh OV, Yunanova LA, et al. "Subacute" course of chronic radiation syndrome. Medical Radiology and Radiation Safety. Accepted for publication. (In Russian)].
- Krasnyuk VI, Konchalovsky MV, Ustyugova AA. Clinical features of subacute course of radiation disease. Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2014;10(4):858-862. (In Russian)].
- Hwang S-L, Guo H-R, Hsieh W-A, Hwang J-S, Lee S-D, Tang J-L, et al. Cancer risks in a population with prolonged low dose-rate gamma-radiation exposure in radiocontaminated buildings, 1983-2002. Int J Radiat Biol. 2006;82(12):849-58. DOI: 10.1080/09553000601085980.
- ICRP Publication. 110. Adult Reference Computational Phantoms. SAGE Publications Ltd. May 2010: 166.
- S. Agostinelli et al. Geant4 – A Simulation Toolkit, Nucl. Instrum. Meth. A 2003;506: 250-303.
- J. Allison et al. Geant4 – Developments and Applications, IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006;53:270-278.
- S. Agostinelli et al. Geant4 – A Simulation Toolkit, Nucl. Instrum. Meth. A 2003;506: 250-303.
- Sevan`kaev AV, Khvostunov IK, Snigiryova GP, Novitskaya NN, Antoschina MM, Fesenko EV, et al. Comparative analysis of cytogenetic examination of control groups of subjects carried out in different russian laboratories. Radiatsion biology, radioecology. 2013;53(1):5-24. (In Russian).
- Cytogenetic dosimetry: Applications in preparedness for and response to radiation emergencies. Vienna: IAEA, 2011. 229 p.
- Snigiryova GP, Bogomazova AN, Novitskaya NN, Hazins ED, Rubanovich AV. Biological indication of radiation exposure to the human body using cytogenetic methods. Medical Technology No.FS-2007/015-U. Moscow, 2007. 29 p. (In Russian)]
- Nugis VYu, Dudochkina NEu. The regularities of chromosome aberrations elimination in lymphocyte cultures of the peripheral blood of people in late times after acute irradiation. Radiatsion biology, radioecology. 2006;46(1):5-16. (In Russian)].
- Baranov AE, Guskova AK, Davtian AA, Sevan`kaev AV, Lloid DC, Edwards AA, et al. Protracted overexposure to a ¹³⁷Cs source: II. Clinical sequelae. Radiation Protection Dosimetry. 1999;81(2):91-100.
- Sevan`kaev AV, Lloid DC, Edwards AA, Mikhailova GF, Nugis VYu, Domracheva EV, et al. Protracted overexposure to a ¹³⁷Cs source: I. Dose Reconstruction. Radiation Protection Dosimetry. 1999;81(2):85-90.
- Nugis VYu, Snigiryova GP, Lomonosova EE, Kozlova MG, Nikitina VA. Three-color FISH method: dose-effect curves for translocations in peripheral blood lymphocyte cultures after gamma-irradiation *in vitro*. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(5):12-20. (In Russian).
- Myelodysplastic syndrome. Clinical Recommendations. 2020; 94 p. (In Russian)].
- Selidovkin GD, Barabanova AV. Acute radiation syndrome caused general radiation Exposure. In: Radiation Medicine. Ed.: Iljin LA. Izdat, 2001;2:62-89 (In Russian)].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.02.2021. **Принята к публикации:** 20.04.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.02.2021. **Accepted for publication:** 20.04.2021.

Информированное согласие:

Больной К.А. умер в 1993 г. Больной Ф.В.В. умер в 1997 г. Получить информированное согласие от их родственников на публикацию не представляется возможным, так как по адресам, указанным в историях болезни они в настоящее время не проживают.

К.А. с родителями проживал на территории Украины, в Донбассе, являлся иностранцем.

Informed consent:

Patient K.A. died in 1993. Patient F.V. died in 1997. It is not possible to obtain informed consent from their relatives for publication, since they do not currently live at the addresses indicated in the medical records.

K.A. lived with his parents on the territory of Ukraine, in the Donbass, was a foreigner.

Е.А. Дашанова^{1,2}, А.А. Молоканов¹, Е. А. Корнева¹

ОБОСНОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ ДОСТАТОЧНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОИЗОТОПОВ УРАНА В БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБАХ

¹Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва.²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Контактное лицо: Екатерина Александровна Дашанова: daschanofff@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Разработка критерия достаточности при измерениях активности радионуклидов урана в биологических пробах, проводимых в рамках программы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК), на основе расчета неопределенности и характеристик пределов измерений.

Материал и методы: Предложен критерий достаточности, определяющий максимальное значение порога чувствительности (*порога принятия решения*) измерения, проводимого для целей ИДК, при котором имеет место факт непревышения основного предела дозы (ПД) или допустимого уровня (ДУ) с учетом неопределенности оценки дозы. Для расчета критерия достаточности при проведении измерений активности радионуклидов в объекте контроля и характеристик пределов измерений использован модельный подход, состоящий в разработке расчетной модели на основе функциональной зависимости измеряемой величины от входных величин, которые определяются процессом радиохимической подготовки и последующим спектрометрическим измерением пробы.

Результаты: Разработана модель расчета активности радионуклидов урана в биологической пробе на основе описания процедуры спектрометрического измерения активности радионуклидов урана ²³⁴U, ²³⁵U и ²³⁸U, осажденных электролитическим методом на мишени после экстракционно-хроматографического выделения их из пробы мочи с добавленным в нее образцовым радиоактивным раствором (ОРР) радионуклида ²³²U в качестве репера для определения эффективности выделения радионуклидов урана (химического выхода). Получены уравнения для вычисления значения *порога принятия решения* и *предела детектирования* суммарной активности указанных альфа-излучающих радионуклидов урана. На основе этих уравнений определена зависимость *порога принятия решения* и *предела детектирования* от времени измерения при известных исходных данных, что позволяет планировать продолжительность измерений, при которой активность радионуклидов урана в пробе может быть определена достоверно или при котором будет обеспечен критерий достаточности метода измерения (необходимый в том случае, когда активность не выявляется, то есть результат измерения меньше *порога принятия решения*). На основе реального примера спектрометрического измерения активности радионуклидов урана в пробе проведен расчет значений активности радионуклидов урана ²³⁴U, ²³⁵U и ²³⁸U и соответствующих характеристик пределов измерений.

Заключение: Обеспечение выполнения критерия достаточности при измерениях активности радионуклидов урана в биологических пробах для целей ИДК достигается за счет правильного выбора времени измерения пробы, которое устанавливается путем анализа значений характеристик пределов измерения суммарной активности рассматриваемых альфа-излучающих радионуклидов урана ²³⁴U, ²³⁵U и ²³⁸U: *порога принятия решения* и *предела детектирования*.

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, альфа-спектрометрия, критерий достаточности, порог принятия решения, предел детектирования, пределы доверительного интервала

Для цитирования: Дашанова Е.А., Молоканов А.А., Корнева Е.А. Обоснование и применение критерия достаточности для измерений активности радиоизотопов урана в биологических пробах // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.70–76.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-70-76

Введение

Целью индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) является определение степени соблюдения принципов радиационной безопасности и требований нормативов, в том числе демонстрация факта непревышения установленных основных пределов доз (ПД) и допустимых уровней (ДУ) [1, 2]. Из этого следует, что в контролируемых условиях основной задачей ИДК внутреннего облучения персонала является оценка индивидуальной ожидаемой эффективной дозы (ОЭД) у каждого работника за счет поступления радионуклидов в каждом календарном году. Это позволяет определить, был ли превышен для данного работника установленный предел дозы. Задача оценки индивидуальной ожидаемой эффективной дозы (ОЭД) у каждого работника в каждом календарном году, при ингаляционном поступлении техногенных радионуклидов урана решается на основе проведения регулярных измерений активности радионуклидов в биопробах человека (в основном, в суточном диурезе).

При планировании измерений в рамках ИДК ключевыми характеристиками, определяющими объем контроля и его стоимость, являются частота и порог чувствитель-

ности измерений (порог принятия решения) [3]. В данном случае, порог принятия решения является характеристикой спектрометрического метода определения радионуклидов урана в биологических пробах мочи и обуславливает критерий достаточности при измерениях, проводимых в рамках программы ИДК. Критерием достаточности метода измерения активности радионуклидов в объекте контроля является такое значение *порога принятия решения* y^* , при котором верхняя граница дозы с учетом неопределенности, $E_{95}(y^*, \Delta_{y^*})$, не превысит предел дозы (ПД) или заданный допустимый уровень (УД) [2, 3]:

$$E_{95}(y^*, \Delta_{y^*}) = УД \leq ПД \quad (1)$$

При этом, $E_{95}(y^*, \Delta_{y^*}) \neq E(y^* + \Delta_{y^*})$, так как при расчете дозы учитывается не только неопределенность результата измерения, но и неопределенность других факторов, используемых при интерпретации измерений, включая частоту измерений. Критерий достаточности (1) определяет такое значение порога принятия решения, достижимое при применении данного метода измерения, при котором с заданной вероятностью можно утверждать, что индивидуальная ОЭД работника не превышает значения ПД или ДУ с учетом неопределенности метода изме-

рения и метода интерпретации результата измерения в единицах ОЭД, то есть $OED \leq E_{95}(y^*, \Delta_{y^*}) = U_d \leq PD$. Тогда цель ИДК будет достигнута даже в том случае, когда измеряемая активность не превышает порог принятия решения метода измерения и значение ОЭД не может быть определено достоверно. Для рассматриваемого случая ИДК на урановом производстве требования к порогу принятия решения усложняются, поскольку активности изотопов урана в моче зависят от типа соединений урана, находящихся в воздухе рабочих помещений. В целом, достаточным является значение $y^* = 4$ мБк в суточном количестве мочи (СКМ) для суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов урана [2, 3].

Порог принятия решения (decision threshold) определяется как фиксированное значение y^* измеряемой величины, количественно выражающей физический эффект, при превышении которого измерение действительно отражает наличие данного физического эффекта [4]. Если результат измерения меньше y^* , то он не подтверждает наличие данного физического эффекта, тем не менее нельзя заключить, что эффект отсутствует. Поскольку в данном случае (спектрометрическое измерение активности радионуклидов урана) значение y^* зависит от продолжительности измерения пробы ($t_{изм}$) и уменьшается приблизительно пропорционально $1/\sqrt{t_{изм}}$, то достичь необходимого значения y^* можно путем увеличения времени измерения пробы. Однако увеличение времени измерения проб приводит к уменьшению производительности и увеличению стоимости метода ИДК, и в случае, когда результат измерения активности радионуклидов урана превышает y^* , возникает вопрос: при каком значении $t_{изм}$ величина активности радионуклидов урана в пробе может быть определена достоверно и какова неопределенность или точность измерения этой величины? Для этого используются следующие характеристики пределов измерений: *предел детектирования* и *пределы достоверного интервала*.

Предел детектирования (detection limit) – это наименьшее истинное значение искомой величины $y^\#$, для которого с установленной вероятностью $1 - \beta$ будет получен в условиях данного измерения результат, превышающий *порог принятия решения* y^* [4]. Из этого определения следует, что если при определенном $t'_{изм}$ результат измерения превышает предел детектирования $y^\#$, то с заданной вероятностью можно утверждать, что величина активности радионуклидов урана в пробе может быть определена достоверно и, таким образом, данное время измерения пробы будет достаточным.

Пределы достоверного интервала (limits of the confidence interval) – это значения, которые определяют доверительный интервал, содержащий истинное значение искомой величины с заданной вероятностью [4]. Данная характеристика выражает неопределенность или точность (погрешность, в соответствии с определением выше) измерения величины активности радионуклидов урана в пробе.

Материал и методы

В основу оценки неопределенности измерений положен модельный подход. Суть модельного подхода заключается в следующем [4]: составляется модельное уравнение, демонстрирующее функциональную зависимость измеряемой величины от входных величин:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n), \tag{2}$$

где, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ – входные величины; n – номер входной величины; f – вид функциональной зависимости.

Первичный результат измерения y величины Y получается путем замены входных величин $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ на их оценки $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \tag{2}$$

Если входные величины X_i измеряются независимо, то стандартную неопределенность $u(y)$ измеряемой величины, связанную с первичным результатом измерения y , вычисляют согласно уравнению:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)}, \tag{4}$$

где $u(x_i)$ – стандартная неопределенность, связанная с оценкой x_i входной величины X_i .

В уравнении (4) оценки x_i должны быть заменены входными величинами X_i в частных производных от функции f . Определение оценок x_i и соответствующих стандартных неопределенностей $u(x_i)$, проводят в соответствии с ISO/IEC Guide 98-3 [5] или ГОСТ 34100.3-2017/ ISO/IEC Guide 98-3:2008 [6].

Порог принятия решения y^* , согласно определению выше, устанавливается таким образом, что в случаях, когда результат измерения превышает порог принятия решения y^* , вероятность того, что истинное значение измеряемой величины равно нулю (ошибки первого рода), меньше или равна выбранной вероятности α (обычно принимают значение $\alpha = 0,05$ или 5 %):

$$y^* = k_{1-\alpha} \cdot u^\%(0), \tag{5}$$

где $k_{1-\alpha}$ – квантиль стандартного нормального распределения для вероятности $1-\alpha$, $k_{1-\alpha}$ при $\alpha = 0,05$; $u^\%(0)$ – стандартная неопределенность оценки случайной величины Y как функции истинного значения измеряемой величины $y^\%$ при значении $y^\% = 0$.

Функция $u^\%(y^\%)$ часто имеет довольно медленный рост при увеличении $y^\%$. Поэтому замена $u^\%(y^\%) = u(y_i)$ является достаточной для таких случаев, в особенности если первичный результат измерения y_i искомой величины $y^\%$ не намного больше соответствующей стандартной неопределенности $u(y_i)$ [4]. Поскольку в рассматриваемом случае (спектрометрическое измерение активности радионуклидов урана) это условие выполняется, то выражение для порога принятия решения можно переписать следующим образом:

$$y^* = k_{1-\alpha} \cdot u(y_i) = k_{1-\alpha} \cdot u(y_{back}), \tag{6}$$

где y_{back} – это результат измерения y_i при $y^\% = 0$, то есть результат измерения фона.

Предел детектирования $y^\#$, согласно определению выше, это наименьшее истинное значение искомой величины $y^\%$, для которой с установленной вероятностью $1 - \beta$ будет получен в условиях данного измерения результат, превышающий *порог принятия решения* y^* . В этом случае вероятность принятия ошибочного решения, что физический эффект отсутствует (ошибки второго рода) не превышает заданного значения β (обычно принимают значение $\beta = \alpha = 0,05$ или 5%). Предел обнаружения $y^\#$ находят как минимальное решение следующего уравнения [4]:

$$y^\# = y^* + k_{1-\beta} \cdot u^\%(y^\%) \tag{7}$$

или с учетом замены $u^\%(y^\%) = u(y_i)$ и уравнения (6):

$$y^\# = k_{1-\alpha} \cdot u(y_{back}) + k_{1-\beta} \cdot u(y^\#), \quad (8)$$

где $k_{1-\beta}$ – квантиль стандартного нормального распределения для вероятности $1-\beta$, $k_{1-\beta} = 1,65$ при $\alpha = 0,05$.

Пределы доверительного интервала предусмотрены для физического эффекта, признанного имеющим место в соответствии с порогом принятия решения (5), таким образом, что доверительный интервал содержит истинное значение измеряемой величины с указанной вероятностью $1-\gamma$. Пределы доверительного интервала учитывают тот факт, что измеряемая величина неотрицательна.

При значении первичного результата измерения y и стандартной неопределенности $u(y)$, нижний предел доверительного интервала, $y^<$, и верхний предел доверительного интервала, $y^>$, определяют по формулам [4]:

$$y^< = y - k_p \cdot u(y), \quad p = \omega \cdot (1 - \gamma/2) \quad (9)$$

$$y^> = y + k_q \cdot u(y), \quad q = 1 - \omega \cdot \gamma/2 \quad (10)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y/u(y)} \exp\left(-\frac{v^2}{2}\right) dv = \Phi[y/u(y)]. \quad (11)$$

Для определения ω , p и k_p , q и k_q используется функция стандартного нормального распределения $\Phi(t)$, где $t=y/u(y)$. При этом, $\omega = \Phi(t)$, $k_p=t$ для $\Phi(t)=p$. Значения $\Phi(t)$ определяют, используя табулированные значения стандартного нормального распределения [4]. В общем случае, пределы доверительного интервала расположены несимметрично относительно результата измерения y , но вероятности того, что истинное значение измеряемой величины меньше, чем $y^<$ и больше, чем $y^>$ одинаково равны $\gamma/2$. При $y \geq 4 \cdot u(y)$ можно принять значение $\omega=1$, тогда пределы доверительного интервала будут расположены симметрично относительно и можно использовать выражение: $y - k_{1-\gamma/2} \leq y \leq y + k_{1-\gamma/2}$. Обычно принимают значение $\gamma=0,05$, тогда $k_{1-\gamma/2} = 1,96$.

Результаты и обсуждение

Для расчета неопределенности и соответствующих характеристик пределов измерений разработана модель расчета активности радионуклидов урана в биологической пробе на основе описания процедуры спектрометрического измерения активности радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U , осажженных электролитическим методом на мишени после экстракционно-хроматографического выделения их из пробы мочи с добавленным в нее рабочим радиоактивным раствором (РРР) радионуклида ^{232}U в качестве репера для определения эффективности выделения радионуклидов урана (химического выхода). На рис. 1 показан процесс приготовления пробы (мишени) для спектрометрического измерения. Для приготовления РРР используют образцовый радиоактивный раствор (ОРР) радионуклида ^{232}U с удельной активностью A_{RRSm} , Бк/г, массой m_{RRS} , г, путем переноса ОРР в мерную колбу и разбавления его раствором кислоты HNO_3 до нужной объемной активности РРР, A_{WRSv} , мБк/см³, которую определяют по результатам альфа-спектрометрических измерений. В стакан с пробой, полученной после экстракционно-хроматографического выделения урана из пробы мочи, добавляют РРР объемом V_{25} , см³, и активностью A_{WRS}^{add} , мБк, с помощью пипеточного дозатора на 25 мкл. Радионуклиды урана, содержащиеся в полученном растворе, осаждают электролитическим методом на стальной диск (мишень) для проведения альфа-спектрометрических измерений.

Альфа спектрометрические измерения активности радионуклидов урана, содержащихся на мишени, позволяют определить число импульсов, N_{232} , N_{234} , N_{235} , и N_{238} , в соответствующих энергетических диапазонах: ^{232}U (5225 – 5359) МэВ, ^{234}U (4630 – 4830) МэВ, ^{235}U (4445 – 4455) МэВ и ^{238}U (4055 – 4260) МэВ, путем обработки спектра, показанного на рис. 2.

Число импульсов, N_{238} , измеренное, например, в энергетическом диапазоне ^{238}U , формируется в соответствии со следующей моделью:

$$N_{238} = N_{sample/238} + N_{sample/238}^{add} + N_{camera/238}, \quad (12)$$

где $N_{sample/238}$ – число импульсов от ^{238}U , содержащегося на мишени до добавления в пробу репера; $N_{sample/238}^{add}$ – число импульсов от ^{238}U , содержащегося на мишени от добавленного в пробу репера; $N_{camera/238}$ – число импульсов в энергетическом диапазоне ^{238}U , обусловленных загрязнением камеры и погрешностью электроники.

Как было отмечено выше при обсуждении критерия достаточности, значение минимально необходимого времени измерения, t'_{uzm} , при котором активность радионуклидов урана в пробе может быть определена достоверно, зависит от величины предела обнаружения $y^\#$, вычисляемая согласно (8) через значение результата измерения фона, y_{back} , число импульсов которого в энергетическом диапазоне ^{238}U , с учетом расчетной модели (12) и того, что $N_{sample/238} = 0$, выражается формулой:

$$N_{back/238} = N_{WRS/238}^{add} + N_{camera/238} \quad (13)$$

$N_{WRS/238}^{add}$ и $N_{camera/238}$ определяют по результатам независимых альфа-спектрометрических измерений. Распределение числа импульсов, регистрируемых в энергетическом диапазоне радионуклида ^{238}U за фиксированное время измерения t'_{uzm} подчиняется закону Пуассона, для которого справедливо соотношение $u(N) = \sqrt{N}$.

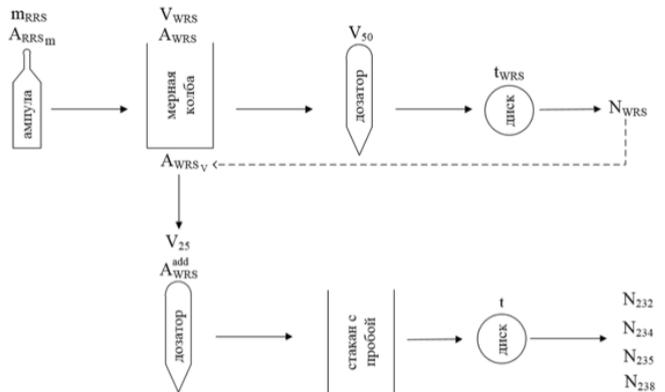


Рис. 1. Процедура подготовки пробы для спектрометрических измерений
Fig. 1. Sample preparation procedure for spectrometric measurements

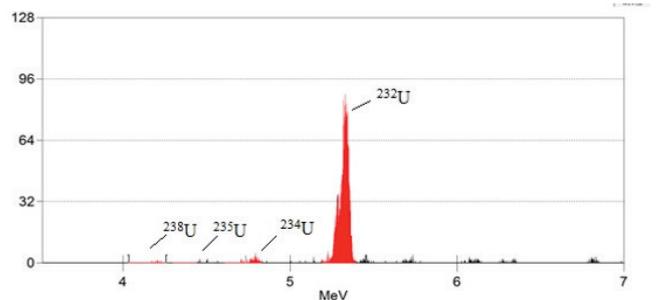


Рис. 2. Спектр активности радионуклидов урана, на мишени
Fig. 2. Activity spectrum of uranium radionuclides contained on the target

Тогда

$$u(N_{back/238}) = \sqrt{N_{WRS/238}^{add} + N_{camera/238}} \quad (14)$$

и для суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U получим:

$$u(N_{back/\sum Ri}) = \sqrt{\sum_i N_{WRS/Ri}^{add} + N_{camera/Ri}}, \quad (15)$$

где индекс i обозначает суммирование числа импульсов, измеренных в соответствующих энергетических диапазонах радионуклидов R_i : ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U , а индекс $\sum Ri$ – их сумму.

Заменяя обозначение y_{back} в уравнениях (6) и (8) на $N_{back/\sum Ri}$, получим уравнения для вычисления значения порога принятия решения и предела детектирования суммарной активности указанных альфа-излучающих радионуклидов урана $y_{\Sigma}^{\#}$ в единицах числа импульсов, измеренных в энергетических диапазонах радионуклидов ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U :

$$y^* = k_{1-\alpha} \cdot u(N_{back/\sum Ri}), \quad (16)$$

$$y_{\Sigma}^{\#} = k_{1-\alpha} \cdot u(N_{back/\sum Ri}) + k_{1-\beta} \cdot u(y_{\Sigma}^{\#}). \quad (17)$$

Для вычисления значения предела обнаружения $y_{\Sigma}^{\#}$ в единицах активности нужно разделить полученное значение в импульсах $y_{\Sigma}^{\#}$ (имп) на коэффициент: $R_{chem} \cdot \epsilon_{\alpha-det} \cdot t_{изм}$:

$$y_{\Sigma}^* (\text{Бк}) = \frac{y_{\Sigma}^{\#} (\text{имп})}{R_{chem} \cdot \epsilon_{\alpha-det} \cdot t_{изм}}, \quad (18)$$

$$y_{\Sigma}^{\#} (\text{Бк}) = \frac{y_{\Sigma}^{\#} (\text{имп})}{R_{chem} \cdot \epsilon_{\alpha-det} \cdot t_{изм}}. \quad (19)$$

Таблица 1

Исходные данные для определения зависимости порога принятия решения и предела детектирования от времени измерения $t_{изм}$
Input data for determining the dependence of the decision threshold and the detection limit on the measurement time $t_{изм}$

Параметр	Измеряемые радионуклиды урана		
	^{234}U	^{235}U	^{238}U
$n_{WRS/Ri}^{add}$, имп/с	4,63E-05	0,0	0,0
$n_{cam/Ri}$, имп/с	0,0	0,0	0,0
R_{chem} , отн.ед.	0,428	0,428	0,428
$\epsilon_{\alpha-det}$, имп/(Бк·с)	0,102	0,102	0,102

Таблица 2

Результаты расчета порога принятия решения y_{Σ}^* и предела детектирования $y_{\Sigma}^{\#}$ от времени измерения $t_{изм}$ для определения суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U
The results of calculating the decision threshold y_{Σ}^* and the detection limit $y_{\Sigma}^{\#}$ from the measurement time, to determine the total activity of alpha-emitting uranium radioisotopes ^{234}U , ^{235}U and ^{238}U

$t_{изм}$, ч	y_{Σ}^* , мБк		$y_{\Sigma}^{\#}$, мБк	
	На мишени	В СКМ	На мишени	В СКМ
1	22	70	52*	165
3	8,6	28	19*	61
6	4,3	14	10*	30
12	2,5	7,9	5,2	17
24	1,5	4,9	3,0*	9,5
36	1,2	3,7	2,2	7,0
48	1,0*	3,1	1,8	5,7

Примечание: * – Требуемые значения y_{Σ}^* и $y_{\Sigma}^{\#}$ при измерении пробы (мишени) за реальное время измерения пробы
* – Required values y_{Σ}^* and $y_{\Sigma}^{\#}$ when measuring a sample (target) in real time of sample measurement

Используя уравнения (18) и (19), можно определить зависимость порога принятия решения и предела детектирования от времени измерения $t_{изм}$, при известных исходных данных, что позволяет планировать время измерения $t'_{изм}$, при котором активность радионуклидов урана в пробе может быть определена достоверно или при котором будет обеспечен критерий достаточности метода измерения (необходимый в том случае, когда активность не выявляется, то есть результат измерения меньше y^*). Для этого необходимы исходные данные конкретной процедуры спектрометрического измерения: скорость образования числа фоновых импульсов $n_{WRS/Ri}^{add}$ и $n_{cam/Ri}$ в энергетических диапазонах радионуклидов ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U ; химический выход R_{chem} и энергетическая эффективность альфа-детектора, $\epsilon_{\alpha-det}$. В табл. 1 представлен пример таких исходных данных.

При определении порога принятия решения y_{Σ}^* по формуле (16) учитывают, что значение $N_{WRS/Ri}^{add} = n_{WRS/Ri}^{add} \cdot t_{изм}$, $N_{camera/Ri} = n_{cam/Ri} \cdot t_{изм}$, а сумма $N_{WRS/Ri}^{add} + N_{camera/Ri}$ для каждого радионуклида урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U не должна быть меньше 1 при любом значении $t_{изм}$ [4]. Также при анализе результатов расчета необходимо учитывать требования критерия достаточности (1) для случая, когда активность не выявляется. Как было отмечено выше, в этом случае достаточным является значение $y^* = 4$ мБк в СКМ для суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов урана. Однако для анализа пробы обычно берут часть объема СКМ. В рассматриваемом примере принято отношение объема СКМ к объему пробы равное $1,6/0,5$ (литров) = 3,2, тогда для измеряемой пробы достаточным является значение $y^* = 4/3,2 = 1,25$ мБк в 0,5 л пробы.

Для приведенных в табл. 1 исходных данных получим следующую зависимость порога принятия решения y_{Σ}^* и предела детектирования $y_{\Sigma}^{\#}$ от времени измерения, $t_{изм}$, для определения суммарной активности указанных альфа-излучающих радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U (табл. 2).

Из табл. 2 видно, что для принятых исходных данных (табл. 1) и учитывая, что практически реальное время измерения пробы составляет значения до 6 ч (рабочее время), 1 сут, 2 сут и т. д., продолжительность измерения пробы для достижения требований критерия достаточности ($y^* = 4/3, 2 = 1,25$ мБк) практически равна 2 сут, но если в течение 1 (3, 6 или 24) часов выявляется суммарная активность радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U более 52 (19, 10 или 3) мБк соответственно, то этого времени измерения будет достаточно для достоверного определения данной искомой величины. Необходимо отметить, что указанные значения достаточного времени измерения определяют в процессе измерения пробы и дают минимально возможное значение $t'_{изм}$ для данной пробы, но не ограничивают его, если увеличение времени измерения пробы возможно в рамках ИДК с учетом принципа оптимизации уровня облучения персонала [1].

Из приведенных в табл. 1 значений исходных данных следует, что значения y^*_Σ и $y^\#_\Sigma$ для описанного выше процесса измерения зависят, практически, от параметров $N_{WRS/Ri}^{add}$ и R_{chem} и $\epsilon_{\alpha-det}$. При этом параметры R_{chem} и $\epsilon_{\alpha-det}$ не могут быть изменены, а параметр $N_{WRS/Ri}^{add}$ зависит от количества добавленного репера ^{232}U . Это дает возможность оптимизировать количество добавляемого в пробу репера, с учетом требуемого значения неопределенности $u(R_{chem})$, с целью уменьшения значений величин y^*_Σ и $y^\#_\Sigma$ и, тем самым, уменьшения необходимого времени измерения пробы.

Как результат измерений необходимо рассчитать значения активности радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U в пробе и их неопределенности, в качестве которых указываются *пределы доверительного интервала*, определяемые по формулам (9) – (11). С учетом модели (12) активность отдельного радионуклида (например, ^{238}U) в пробе определяется по следующей формуле:

$$A_{238} = \frac{N_{238} - N_{back/238}}{\epsilon_{\alpha-det} \cdot R_{chem} \cdot t} - A_{WRS/232}^{add} \cdot k_{238}, \quad (20)$$

где A_{238} – активность радионуклида ^{238}U в пробе, мБк;

Таблица 3

Исходные данные для определения измеренных значений активности радионуклидов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U и соответствующих пределов доверительного интервала
Input data for determining the measured values of the activity of uranium radionuclides ^{234}U , ^{235}U and ^{238}U and the corresponding limits of the confidence interval

Параметр	Измеряемые радионуклиды урана		
	^{234}U	^{235}U	^{238}U
N_{Ri} , имп	48	0	5
$N_{back/Ri}$, имп	4	1*	1*
$\epsilon_{\alpha-det}$, имп/(Бк·с)	0,102	0,102	0,102
$u(\epsilon_{\alpha-det})$, имп/(Бк·с)	0,00427	0,00427	0,00427
R_{chem} , отн.ед.	0,428	0,428	0,428
$u(R_{chem})$, отн.ед.	0,0298	0,0298	0,0298
$A_{WRS/232}^{add}$, Бк	0,38	0,38	0,38
$u(A_{WRS/232}^{add})$, Бк	0,0186	0,0186	0,0186
k_{Ri} , отн.ед.	0,000598	0,0	0,0
$u(k_{Ri})$, отн.ед.	0,000299	0,0	0,0

Примечание: * – если $N_{back/Ri} = 0$, то принимают $N_{back/Ri} = 1$ [4]
 * – if $N_{back/Ri} = 0$, than take $N_{back/Ri} = 1$ [4]

N_{238} – число импульсов от пробы, определяемое спектрометром в энергетическом интервале радионуклида ^{238}U за время измерения активности пробы;

$N_{back/238}$ – число фоновых импульсов, определяемое спектрометром в энергетическом диапазоне ^{238}U за время измерения активности пробы;

$\epsilon_{\alpha-det}$ – эффективность регистрации альфа-детектора;

R_{chem} – химический выход;

t – время измерения пробы, с;

k_{238} – коэффициент пропорциональности, связывающий содержание радионуклидов ^{238}U и ^{232}U в аликвоте рабочего радиоактивного раствора (PPP);

$A_{WRS/232}^{add}$ – активность добавленного в пробу PPP в энергетическом диапазоне радионуклида ^{232}U , мБк.

Неопределенность расчетного значения величины A_{238} с учетом формулы (4) выражается следующим образом:

$$u_c(A_{238}) = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_{\alpha-det}^2 \cdot R_{chem}^2 \cdot t^2} \left[\frac{N_{238} + N_{back/238} + (N_{238} - N_{back/238})^2}{\left(\frac{u^2(\epsilon_{\alpha-det})}{\epsilon_{\alpha-det}^2} + \frac{u^2(R_{chem})}{R_{chem}^2} \right)} \right] + k_{238}^2 \cdot u^2(A_{WRS/232}^{add}) + (A_{WRS/232}^{add})^2 \cdot u^2(k_{238})^2}, \quad (21)$$

где $u(\epsilon_{\alpha-det})$, $u(A_{WRS/232}^{add})$ и $u(k_{238})$ – стандартные неопределенности указанных в скобках величин; значения этих величин и их стандартные неопределенности определяют в результате независимых измерений; химический выход R_{chem} и его стандартную неопределенность $u(R_{chem})$ определяют по результату измерения спектра активности радионуклидов урана, содержащихся на мишени (как показано, например, на рис. 2, где вместе с измеряемыми радионуклидами урана показан пик реперного радионуклида ^{232}U).

Установление пределов доверительного интервала активности пробы подразумевает определение нижней и верхней границ доверительного интервала в соответствии с описанной выше процедурой по уравнениям (9) – (11). Для этого необходимо определить значения следующих

Таблица 4

Активность радиоизотопов урана (^{234}U , ^{235}U и ^{238}U) в пробе, соответствующие неопределенности и характеристики пределов измерений
 Activity of uranium radioisotopes (^{234}U , ^{235}U и ^{238}U) in a sample, corresponding uncertainties and characteristics of measurement limits

Радионуклид урана	^{234}U	^{235}U	^{238}U	Сумма
Активность, мБк	12,5	0,0	1,3	13,8
Стандартная неопределенность, мБк	2,1	0,65	0,61	2,2
Нижний предел доверительного интервала, мБк	8,4	0,0	0,29	9,8
Верхний предел доверительного интервала, мБк	16,7	1,5	2,5	18,6
Порог принятия решения, мБк	1,2	0,62	0,62	1,5
Предел детектирования, мБк	2,6	1,5	1,5	3,0

параметров исходных данных для каждого радионуклида урана (R_i): N_{R_i} ; N_{back}/R_i ; $\epsilon_{\alpha-det}$; R_{chem} ; k_{R_i} ; $A_{add_{WRS/232}}$; $u(\epsilon_{\alpha-det})$; $u(R_{chem})$, $u(A_{add_{WRS/232}})$ и $u(k_{R_i})$. В табл. 3 представлены значения исходных данных для рассматриваемого примера.

Для приведенных в табл. 3 исходных данных и принятого значения вероятности для доверительного интервала $p = 0,95$, ($\gamma=0.05$) получим следующие результаты определения суммарной активности указанных альфа-излучающих радиоизотопов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U и их неопределенностей (табл. 4).

Заключение

Показано, что обеспечение выполнения критерия достаточности при измерениях активности радионуклидов урана в биологических пробах для целей ИДК достигается за счет правильного выбора продолжительности измерения пробы, которая устанавливается путем анализа значений характеристик пределов измерения суммарной активности рассматриваемых альфа-излучающих радиоизотопов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U – порога принятия решения y^*_{Σ} и предела детектирования $y^{\#}_{\Sigma}$.

Характеристики пределов измерения определяют путем использования модельного подхода к расчету активности радионуклидов в биологической пробе, позволяющего определить зависимость величин y^*_{Σ} и $y^{\#}_{\Sigma}$ от времени измерения, $t_{изм}$, при известных исходных данных, и планировать время измерения $t'_{изм}$, при котором активность радионуклидов урана в пробе может быть определена достоверно, то есть выполняется условие: $A_{\Sigma} \geq y^{\#}_{\Sigma}$, или при котором будет обеспечен критерий до-

статочности метода измерения: $y^*_{\Sigma} \leq 1,25$ мБк в пробе, в том случае, когда $A_{\Sigma} \leq y^*_{\Sigma}$, где A_{Σ} – суммарная активность радиоизотопов урана.

Модель расчета активности радионуклидов в биологической пробе определяется на основе описания процедуры спектрометрического измерения активности радиоизотопов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U , осажденных электролитическим методом на мишени после экстракционно-хроматографического выделения их из пробы мочи с добавленным в нее образцовым радиоактивным раствором (ОРР) радионуклида ^{232}U в качестве репера для определения эффективности выделения радиоизотопов урана (химического выхода).

Показано на конкретном примере, что для достижения требования критерия достаточности ($y^*_{\Sigma} \leq 1,25$ мБк в пробе) необходимое время измерения $t'_{изм}$ практически равно 2 сут, но если в течение 1 (3, 6 или 24) часов выявляется суммарная активность радиоизотопов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U более 52 (19, 10 или 3) мБк соответственно, то этого времени измерения будет достаточно для достоверного определения искомой величины A_{Σ} . Кроме того, анализ исходных данных указывает на возможность уменьшения значений величин y^*_{Σ} и $y^{\#}_{\Sigma}$ и, тем самым, уменьшения необходимой продолжительности измерения пробы $t'_{изм}$, путем оптимизации количества добавляемого в пробу репера.

На основе реального примера измерения активности радиоизотопов урана ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U в пробе проведен расчет значений активности радионуклидов урана и соответствующих характеристик пределов измерений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 16.02.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 16.02.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

Justification and Application of Sufficiency Criterion for Measuring the Activity of Uranium Radioisotopes in Biological Samples

E.A. Dashanova^{1,2}, A.A. Molokanov¹, E.A. Korneva¹

¹A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Contact person: Ekaterina Alexandrovna Dashanova: daschanoff@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: Ensuring the fulfillment of the sufficiency criterion when measuring the activity of uranium radionuclides in biological samples carried out within the individual monitoring programme by calculation of the uncertainty and characteristics limits for measurements.

Material and methods: The sufficiency criterion definition is given, which determines the maximum value of the decision threshold for measurements carried out for the individual monitoring of workers at which the fact of non-exceeding of the annual dose limit or permissible level takes place, taking into account the uncertainty of the dose assessment. A model approach is used to calculate the sufficiency criterion and characteristics limits when measuring the radioactive material excreted by individual workers. The model approach consisted in the development of a calculation model based on the functional dependence of measured input values on the process of radiochemical preparation and subsequent spectrometric measurement of the sample.

Results: A model has been developed for calculating the activity of uranium radionuclides ²³⁴U, ²³⁵U and ²³⁸U in a biological sample based on the description of the procedure for spectrometric measurement, which consisted in the deposition by the electrolytic method on the target after chromatographic extraction of uranium from the urine sample. The reference radioactive solution of the ²³²U radionuclide added to the sample as a reference point for determining the efficiency of uranium radionuclide separation (chemical yield). Equations are obtained for calculating the values of the decision threshold and the detection limit for the total activity of the above alpha-emitting uranium radionuclides. Using these equations, the dependence of the decision threshold and the detection limit on measurement time is determined for the given input data. This allows planning the measurement time at which the activity of uranium radionuclides in the sample can be determined reliably or at which the sufficiency criterion of the measurement method will be provided (necessary in the case when the activity is not detected, that is, the measurement result is less than the decision threshold). The values of the activity of uranium radionuclides ²³⁴U, ²³⁵U and ²³⁸U and the corresponding characteristics limits for the measurement were calculated on the basis of a real example of spectrometric measurement of the activity of uranium radionuclides in a sample.

Conclusion: Ensuring the fulfillment of the sufficiency criterion when measuring the activity of uranium radionuclides in biological samples is achieved by the correct determination of the sample measurement time. This is determined by time dependence analysis of the characteristics limits (the decision threshold and the detection limit) for the measurement of the total activity of the above alpha-emitting uranium radionuclides ²³⁴U, ²³⁵U and ²³⁸U.

Key words: individual monitoring programme, alpha spectrometry, sufficiency criterion, decision threshold, detection limit, confidence interval

For citation: Dashanova EA, Molokanov AA, Korneva EA. Justification and Application of Sufficiency Criterion for Measuring the Activity of Uranium Radioisotopes in Biological Samples. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):70-76.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-70-76

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Гигиенические нормативы СП 2.6.1.2523-09. М. 2009. 100 с.
2. МУ 2.6.1.065-14. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования.
3. Молоканов А.А., Кухта Б.А. Развитие системы контроля внутреннего облучения персонала – использование современных технологий // АНРИ. 2018. № 4. С. 2–14.
4. ISO 11929:2010(E). Determination of the Characteristic Limits (Decision Threshold, Detection Limit and Limits of the Confidence Interval) for Measurements of Ionizing Radiation – Fundamentals and Application. Geneva. 2010.
5. ISO/IEC Guide 98-3:2008(E). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements (GUM:1995) // Uncertainty of measurement. Geneva. Switzerland. 2008.
6. ГОСТ 34100.3-2017/ ISO/IEC Guide 98-3:2008 // Неопределенность измерения. Часть 3. / Руководство по выражению неопределенности измерений. Москва. Стандартинформ. 2018.

REFERENCES

1. Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Hygienic Standards SP 2.6.1.2523-09. Moscow. 2009. 100 p. (In Russian).
2. MU 2.6.1.065-14. Dosimetric Control of Occupational Internal Exposure. General Requirements (In Russian).
3. Molokanov AA, Kukhta BA. Development of the Internal Dose Assessment System for the Monitoring of Workers – Use of Modern Technologies. ANRI. 2019; (4) : 38-50. (In Russian).
4. ISO 11929:2010(E). Determination of the Characteristic Limits (Decision Threshold, Detection Limit and Limits of the Confidence Interval) for Measurements of Ionizing Radiation – Fundamentals and Application. Geneva. 2010.
5. ISO/IEC Guide 98-3:2008(E). Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements (GUM:1995). Uncertainty of measurement. Geneva. Switzerland. 2008.
6. State Standard 34100.3-2017/ ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of Measurement. Part 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. Moscow, Publ, Standardinform. 2018. (In Russian).

А.Г. Цовьянов¹, А.Ю. Комаров¹, П.П. Ганцовский¹, А.Г. Алексеев²,
М.Р. Попченко¹, В.Е. Журавлева¹, Н.А. Богданенко¹

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ДОЗИМЕТРИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

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

² Институт физики высоких энергий РАН, Московская обл. Протвино

Контактное лицо: Артём Юрьевич Комаров: komarov_artiom@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Основные средства и методы дозиметрии нейтронного излучения.

Рассмотрение различных средств и методов регистрации высокоэнергетического нейтронного излучения:

- Активационный
- Трековый
- Пузырьковые детекторы
- Тканезквивалентная пропорциональная камера
- Замедлитель+конвертор

Сравнение приведенных методов и средств измерений доз высокоэнергетического нейтронного излучения.

Ключевые слова: дозиметрия вторичные нейтроны, протонные ускорители, радиационная безопасность

Для цитирования: Цовьянов А.Г., Комаров А.Ю., Ганцовский П.П., Алексеев А.Г., Попченко М.Р., Журавлева В.Е., Богданенко Н.А. Средства и методы дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения на протонных ускорителях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.77–85.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-77-85

Введение

Источниками ионизирующего излучения высоких энергий (ИИВЭ) являются ускорители, основанные на различных физических принципах разгона первичных излучаемых частиц. Различные ускорители характеризуются типом ускоряемых частиц, физическими параметрами пучка (энергией, интенсивностью и др.), а также конструкцией.

Развитие ускорительной физики и техники является важнейшим условием развития ядерной физики и физики элементарных частиц [1]. Исследовательские протонные ускорители продолжают расти по энергии и интенсивности, являясь базой для огромного класса экспериментов, в том числе и со встречными пучками. Энергии первичных пучков ускоряемых протонов варьируют в широких пределах, позволяя решать широкий круг задач. Из табл. 1 видно, что на современных протонных ускорителях достигаются огромные энергии. Проведение различных экспериментов с перестройкой или разрушением внутренней структуры ядра требует большой энергии ускоряемого пучка — сотни ГэВ и даже единицы ТэВ.

В медицине используются коллимированные протонные пучки с более низкой энергией, позволяющие подавлять жизнедеятельность злокачественных клеток при минимальном повреждении здоровых тканей. Из табл. 2 видно, что энергии первичного протонного пучка в таких ускорителях обычно варьируются в пределах от нескольких МэВ до 1 ГэВ. Протонная лучевая терапия во всем мире признана одним из самых перспективных

Таблица 1

Сравнительные характеристики некоторых известных протонных ускорителей
Comparative characteristics of some known proton accelerators

Ускоритель	Энергия пучка, ГэВ
КЕК, Tokyo	12
SLAC, Stanford	25
ИФВЭ, Серпухов, Россия	76
SPS, CERN	450
LHC (Large Hadron Collider), CERN	
Tevatron, Fermilab	
	1000

направлений лучевого лечения онкологических заболеваний. Благодаря свойству протонов создавать в конце своего пробега в веществе максимальное выделение энергии становится возможным прецизионно формировать выделение дозы излучения в глубоко расположенной опухоли при минимальном облучении здоровых тканей, окружающих опухоль. [http://sites.lebedev.ru/ru/PhTC/]. В физико-техническом Центре ФИАН создан дешевый, малогабаритный, с низким электропотреблением комплекс протонный терапии «ПРОМЕТЕУС», не требующий больших эксплуатационных расходов, позволяющий решить проблему массовости лечения онкологических больных (рис. 1). Комплекс выполнен на основе самых современных научно-технических достижений. Протонная лучевая терапия продолжает развиваться в ИТЭФ (Москва), ОИЯИ (Дубна), ПИЯФ (Гатчина), МИБС (Санкт-Петербург), в протонном центре в Дмитровграде.

При поглощении первичного пучка ускоренных протонов в материалах мишени и защиты генерируется вторичное излучение. Сложность состава и спектра, а также импульсный характер излучения создают большие трудности при определении степени радиационной опасности

Таблица 2

Энергии и область применения различных ускорителей в медицине [2]
Energy and scope of various accelerators in medicine [2]

Тип ускорителя	Частицы	Энергия, МэВ	Применения
Линейный	e, p	От 4 до 800	e-терапия п-терапия X-терапия Диагностика
Циклотрон	p, d	От 10 до 600	Диагностика п-терапия n-терапия
Синхротрон	p, ионы	От 70 до 670	п-терапия i-терапия



Рис. 1. Комплекс протонной терапии «ПРОМЕТЕУС»
Fig. 1. Complex of proton therapy "PROMETEUS"

вторичного излучения [3]. В работах [4–6] показано, что на ускорителях протонов за биологической защитой преобладает нейтронное излучение с энергий более 20 МэВ – высокоэнергетическое нейтронное излучение, обладающее наибольшей проникающей способностью из образующихся вторичных излучений и, как следствие, представляющее наибольшую опасность для обслуживающего персонала за защитой при нормальной эксплуатации установок (рис. 2).

Целью данной работы является обзор и сравнение различных существующих методов дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения, экспериментального и серийно выпускаемого оборудования, предназначенного для регистрации нейтронного излучения с энергией свыше 20 МэВ.

Основные средства и методы дозиметрии нейтронного излучения

При определении эквивалентных доз внешнего нейтронного облучения персонала проводятся:

- индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) внешнего облучения с применением индивидуальных дозиметров нейтронов;
- ИДК по результатам дозиметрического контроля рабочих мест (ДКРМ), включающим: измерение мощности дозы внешнего облучения или плотности потока нейтронов носимыми приборами, а также времени пребывания работника на рабочем месте [7].

При определении дозы аварийного нейтронного облучения сопоставляют результаты, полученные в результате проведения дозиметрического контроля с использованием индивидуальных дозиметров и контроля радиационной обстановки стационарными средствами измерения [8]. Стационарными средствами измерения являются радиационные мониторы и автоматизированные системы непрерывного радиационного контроля (АСРК).

Так как нейтроны не обладают электрическим зарядом, то их детектирование возможно только посредством упругого и неупругого взаимодействия с ядрами. При упругом рассеянии нейтронов регистрируются ядра отдачи, а в случае детектирования посредством ядерных реакций регистрируются образующиеся вторичные частицы, ядерные фрагменты и гамма-кванты [9]. Рассмотрим приборы, внесенные в государственный реестр средств измерений (СИ), в том числе наиболее распространенные средства и методы детектирования нейтронного излучения.

Большое распространение при дозиметрии нейтронного излучения получили приборы, основанные на использовании детекторов тепловых нейтронов, помещенные в замедлители различной конфигурации и размеров. Такие

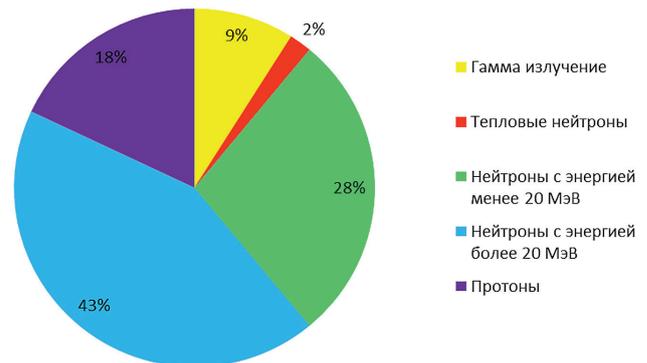


Рис. 2. Усредненный процентный вклад в суммарную дозу от каждой компоненты вторичного излучения в помещениях протонного ускорителя на 7 ГэВ, оцененный с помощью активационных детекторов [3]
Fig. 2. Average percentage contribution to the total dose from each component of the secondary radiation in the premises of the 7 GeV proton accelerator, estimated using activation detectors [3]

приборы могут использоваться при ДКРМ, а также входить в состав стационарных средств измерений. В целях дозиметрического контроля на ускорителях протонов возможно применение спектрометрических методов детектирования нейтронного излучения. Восстановление спектров нейтронов по показаниям многосферного спектрометра относится к классу обратных задач, а именно, к отысканию неизвестной причины по ряду известных следствий, и сводится к решению системы алгебраизированных уравнений [10]. Энергетические зависимости чувствительности (ЭЗЧ) таких устройств определяются толщиной замедляющего слоя и наличием поглотителя тепловых нейтронов внутри него. К приборам, основанном на таком методе, относятся как многосферные спектрометры Боннера, так и приборы на основе одного замедлителя. К таким приборам относятся дозиметр ДКС-96Н и основанный на нем дозиметр-спектрометр нейтронов ДСН-01, дозиметр-радиометр МКС-АТ 1117 с блоками детектирования БДКН-01 и БДКН-03 и БДКН-06 (в спектрометрическом исполнении), многосферный спектрометр Боннера СБ-РСУ-01 на основе детектора тепловых нейтронов серийного прибора РСУ-01 [11] и другие.

Правильность и точность получаемой с помощью таких средств измерений дозиметрической информации во многом обуславливается достоверным знанием ЭЗЧ детекторов тепловых нейтронов в замедлителях соответствующих размеров. Для детекторов тепловых нейтронов, помещенных в замедлители большого размера, характерны пики чувствительности к быстрому нейтрону до 10 МэВ. С увеличением диаметра (размера) замедляющего слоя, без специальных технических дополнений конструкции таких приборов, ЭЗЧ начинает резко спадать (пример: рис. 3).

В качестве средства измерения в оценке доз при аварийной нейтронной дозиметрии применяют комплексы «Кордон-А», предназначенные для измерения поглощенной дозы (кермы) нейтронного излучения. В дозиметре используются мишени на основе ^{235}U (для регистрации нейтронов с энергией более 0,4 эВ) и ^{232}Th (для регистрации нейтронов с энергией более 1,2 МэВ). Мишени с детекторами помещены в кадмиевый контейнер, а вся сборка – в пластмассовый корпус. Образованные нейтронами осколки деления от каждой мишени регистрируются двумя трековыми детекторами – тонкими (толщиной около 6 мкм) полиэтилентерефталатными (ПЭТФ) пленками, при этом первый детектор размещается вплотную к мишеням, а второй детектор за поглотителем из ПЭТФ толщиной около 5 мкм. Диапазон энергий нейтронного излучения составляет $4 \times 10^{-7} - 20$ МэВ [12]. Индивидуальные аварийные дозиметры ГНЕЙС позволяют определять отдельные компоненты дозы гамма- и бета-излучений, тепловых и медленных нейтронов, а также промежуточных и быст-

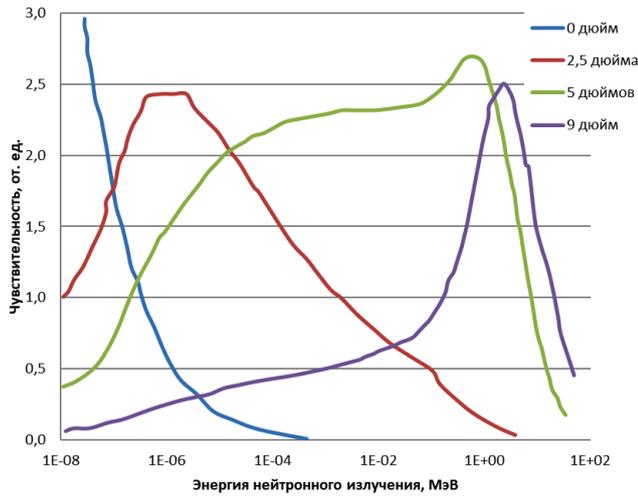


Рис. 3. Матрица чувствительности ³He спектрометра Боннера GSF для шаров различного диаметра (в дюймах) [11]
 Fig. 3. Matrix of sensitivity of ³He spectrometer Bonner GSF for balls of different diameters (in inches) [11]

рых нейтронов. Аварийными дозиметрами ГНЕЙС дополнительно оснащают персонал в условиях, когда помимо бета- и гамма-излучения возможно воздействие нейтронного излучения [13]. Для измерения дозы гамма-излучения и её распределения по телу дозиметры размещают на груди и на спине. Для этого в кассете ГНЕЙС содержится 8 дозиметров. Для гамма-излучения в ней имеются два одинаковых дозиметра ИКС.

Для проведения индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) в смешанных гамма-нейтронных полях применяются индивидуальные дозиметры, основанные на термолюминесцентном методе регистрации ионизирующего излучения и фотографическом методе с использованием ядерных эмульсий, реже используют электронные полупроводниковые дозиметры (ППД). В термолюминесцентных дозиметрах (ТЛД) используется эффект отражения и замедления падающих на тело человека нейтронов с последующей их регистрацией – так называемый альбедный эффект. На основе альбедного эффекта с парой ТЛД на основе лития-6 и лития-7 созданы дозиметры ДВГН-01, ДВНГ-М. Из электронных дозиметров известны такие прямопоказывающие дозиметры, как EPD-N2 и PDM-303, в которых в качестве детектора используется ППД с двумя типами радиаторов: изотоп лития ⁶Li для регистрации тепловых нейтронов и водородосодержащего материала для регистрации быстрых нейтронов по протонам отдачи (табл. 3).

На основании данных об энергетических диапазонах различных индивидуальных дозиметров можно сделать вывод о том, что для эффективного контроля облучения персонала нейтронами широкого энергетического диапазона таких дозиметров недостаточно, так как они не справляются с оценкой индивидуальных доз от нейтронов с энергией выше 20 МэВ. Для некоторых из них, таких как альбедные дозиметры, ЭЗЧ спадает с увеличением энергии нейтронного излучения, для других, таких как EPD-N2 ЭЗЧ, не представлена свыше 15 МэВ (примеры ЭЗЧ известных индивидуальных дозиметров представлены на рис. 4). Также известно, что дозиметр PDM-303 обладает повышенной чувствительностью к высокоэнергетическим нейтронам, завывая показания на опорных полях ускорителя У-70 до 700 %, что требует введения корректирующих калибровочных коэффициентов [14]. Как следствие, отсутствие промышленных средств, позволяющих в полном объеме проводить ИДК в полях нейтронного излучения, вынудило научные центры разрабатывать собственные методики проведения ИДК,

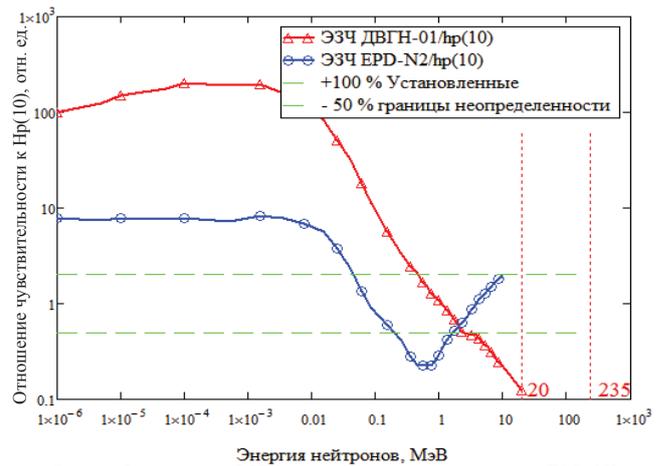


Рис. 4. Отношение ЭЗЧ индивидуальных дозиметров EPD-N2 и ДВГН-01 к удельному эквиваленту индивидуальной дозы моноэнергетических нейтронов [14]
 Fig. 4. The ratio of the ESP of individual dosimeters EPD-N2 and DVGН-01 to the specific equivalent of the individual dose of monoenergetic neutrons [14]

основанные на различных модификациях известных методов и средств измерений нейтронов [15].

Стоит отметить, что в готовящемся проекте «Специальные санитарные правила в области радиационной безопасности», включающем в себя все обновленные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности с различными источниками ионизирующего излучения, отсутствует раздел, посвященный обеспечению радиационной безопасности на ускорителях протонов, хотя такой нормативный документ был принят еще в СССР [16], на данный момент уже утративший силу.

В связи с отсутствием в настоящее подобных отечественных нормативных документов, относящихся к нормированию воздействия высокоэнергетического нейтронного излучения, практически не ведется разработка соответствующих средств дозиметрического контроля. Отсутствие государственных эталонов высокоэнергетического нейтронного излучения приводит к тому, что энергетический диапазон большинства серийно выпускаемых в настоящий момент переносных и индивидуальных дозиметров ограничен 14 МэВ по нейтронному излучению [17]. Спектры различных поверочных установок отличаются от реальных спектров за защитой протонных ускорителей, а также они имеют ограничение по энергии нейтронного излучения, не превышающего 14 МэВ. На примере организации радиационного контроля в ИФВЭ анализ на основе функций чувствительности всех трех групп применяемых дозиметров (индивидуальные дозиметры, радиационные мониторы, АСРК) показывает, что калибровка на УКПН в реальных условиях дает погрешность измерения эквивалентной дозы более 100 % для радиационных мониторов и более 1000 % для дозиметров ИДК [18]. В связи с этим представляется не-

Таблица 3

Энергетический диапазон измерения некоторых индивидуальных дозиметров нейтронного излучения
 Energy range of measurement of some individual neutron dosimeters

Название индивидуального дозиметра	Энергетический диапазон
ДВГН-01	0,025 эВ – 20 МэВ
ДВС-02Д	0,025 эВ – 20 МэВ
EPD-N2	0,025 эВ – 15 МэВ
Harshaw 6600	От тепловых до 10 МэВ
Кордон-А	4×10 ⁻⁷ – 20 МэВ

обходимым рассмотрение и сравнение различных известных методов и средств дозиметрии нейтронного излучения, с возможностью измерения высокоэнергетического нейтронного излучения.

Средства и методы регистрации высокоэнергетического нейтронного излучения

Активационный. Весьма распространенный метод определения эквивалентной дозы в практике радиационного контроля и в исследовательских работах основан на измерении флюенса высокоэнергетических нейтронов с помощью активационных углеродных детекторов по реакции $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ [19]. Радионуклид ^{11}C имеет период полураспада около 20 мин и пороговую энергию образования около 20 МэВ, а сечение реакции имеет почти постоянное значение примерно 20 мбарн для нейтронов с энергией выше 20 МэВ [20]. В качестве детектора высокоэнергетических нейтронов используют пластины или цилиндры из естественного графита. Позитроны распада ^{11}C могут регистрироваться любым тонкостенным бета-счетчиком. Для увеличения чувствительности такого детектора могут использоваться жидкие сцинтилляторы.

В работе [4] были исследованы дозные поля излучений за защитой синхротрона на 7 ГэВ и компонентный состав и вклад в дозовую нагрузку на персонал для различных видов и энергий вторичного излучения. Нейтронное излучение с энергией более 20 МэВ исследовали методом пороговых детекторов по реакции $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$ путем облучения пластического сцинтилляционного блока на основе полистирола и измерения степени его активации детектором с облученным блоком в качестве сцинтиллятора. Показано, что вклад нейтронов с энергией более 20 МэВ в дозовую нагрузку на персонал составляет более 40 %.

Известны также висмутовые активационные детекторы. На висмуте наблюдается целый ряд пороговых реакций от $(n,2n)$ до $(n,9n)$, некоторые из которых имеют сравнительно большое сечение, дающее возможность оценивать флюенс высокоэнергетических нейтронов с энергией от 50 МэВ до нескольких ГэВ при больших периодах облучения, например, на установках по изучению радиационной стойкости материалов [21].

Трековый. Известны ядерные фотоэмульсии CR-39, на которых облучение нейтронами с энергией 20–50 МэВ сопровождается звездообразованием в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах эмульсии. Чтобы повысить чувствительность к нейтронам в энергетическом диапазоне от 50 до 100 МэВ, применяются радиаторы из полиэтилена с железом и алюминием [22].

Известна методика комбинированного дозиметра на основе детекторов нейтронов с сильно отличающимися функциями чувствительности – альбедного дозиметра ДВГН-01 и ядерной фотоэмульсии МК-20 (рис. 5) [23].

На основе ядерной эмульсии МК-20, помещенной в корректирующем пакете в свободную полость кассеты ИФК-2,3, разработан метод определения эквивалентной дозы нейтронов по числу треков и так называемый метод ИФКн [24, 25].

Для использования в качестве калибровочного прибора и исследования чувствительности индивидуальных дозиметров нейтронов за защитой протонных ускорителей может использоваться пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов (ПДСН), в состав которого входят мишени в контакте с лавсановыми трековыми детекторами, содержащих делящиеся изотопы ^{235}U и др., и мишени из висмута ^{209}Bi , имеющие различные энергетические зависимости чувствительности (рис. 6), покрывающие весь измеряемый энергетический диапазон прибора [26].

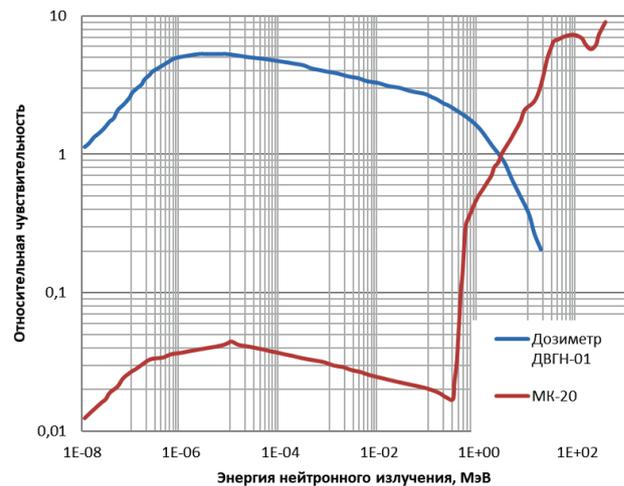


Рис. 5. ЭЗЧ дозиметра ДВГН-01 и ядерной эмульсии МК-20
Fig. 5. EDS dosimeter DVGN-01 and nuclear emulsion MK-20

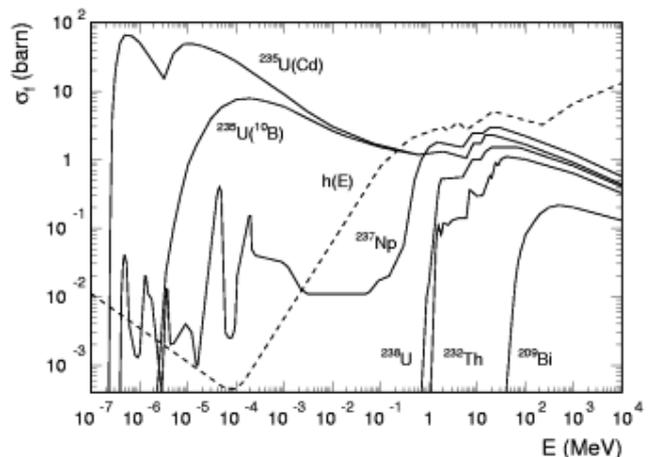


Рис. 6. ЭЗЧ деления нуклидов, используемых в ПДСН и удельного эквивалента кермы нейтронов [11]
Fig. 6. EDS of fission of nuclides used in PDSN and specific equivalent of neutron kerma [11]

На практике известны комбинированные индивидуальные пленочно-термолюминесцентные дозиметры, чувствительные к нейтронам с энергией более 10 МэВ. Диапазон ЭЗЧ дозиметра NTA позволяет измерять индивидуальный эквивалент дозы нейтронного излучения в полях в диапазоне энергий 10–60 МэВ [27].

Также известны дозиметры, основанные на флуоресцентных трековых детекторах ядерных частиц – FNTD, таких как производимые фирмой Landauer и обладающие рядом важных преимуществ в измерении быстрых нейтронов и высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц. Дозиметры, в состав которых входят кристаллы оксида алюминия, легированного магнием, и устройства визуализации новых типов имеют эффективность обнаружения нейтронов, сравнимую с пленками CR-39. Кроме того, FNTD чувствительны к нейтронам с высокой энергией (20–100 МэВ), тогда как детекторы CR-39 теряют свой отклик из-за низкой чувствительности к протонам отдачи с высокой энергией [28].

Тканеэквивалентная пропорциональная камера.

В работах [29, 30] проведено изучение ЭЗЧ тканеэквивалентных пропорциональных камер к нейтронному излучению. Корпус тканеэквивалентных камер (ТЭПК) был изготовлен из капролона (материала, эквивалентного биологическим тканям) с внутренним диаметром 10,8 см и толщиной 0,2 см. Камера имеет газонепроницаемую алюминиевую крышку толщиной 0,2 см и наполнена метаном под давлением, соответствующим 2 мкм ткани.

Расчет энергетического отклика нейтронов ТЭПК проводился в энергетическом диапазоне от 20 МэВ до 5 ГэВ. Настоящие данные согласуются с результатами проведенных измерений. Измерения с тканеэквивалентной пропорциональной камерой позволяет получить правильную оценку амбиентной дозы (неопределенности менее 15 %) для нейтронов с энергией ниже 200 МэВ. Такие камеры можно использовать в качестве эталонного дозиметра для калибровки различных дозиметров нейтронного излучения в единицах амбиентной дозы для применения в нейтронных полях высоких энергий.

Пузырьковые детекторы. Детекторы пузырьков представляют собой суспензии чрезмерно расширенных капель галогенуглерода и/или углеводородов (диаметром около 20 мкм), которые испаряются под действием протонов отдачи с высокой ЛПЭ от нейтронных взаимодействий. Перегретые капли диспергированы в гелеобразной среде, содержащейся во флаконе, и действуют как постоянно чувствительные миниатюрные пузырьковые камеры. Общее количество пара, образовавшегося в результате зарождения капель под действием излучения, пропорционально дозе нейтронного облучения. Как средства измерений к данному методу известны дозиметры двух типов производства Bubble Technology Industries, Канада: модель BDPND (рис. 7) для быстрых нейтронов и модель BDT для тепловых нейтронов (Vanhavere et al, 1998). В технических характеристиках указано, что верхний энергетический предел измерения таких дозиметров составляет 15 МэВ, однако известны методы повышения чувствительности к высокоэнергетическому нейтронному излучению путем использования дополнительных свинцовых конверторов. В работах [31, 32] исследованы ЭЗЧ пузырьков детекторов на ускорителях протонов с применением свинцовых конверторов нейтронов толщиной от 0,2 до 4 см.

Замедлитель + конвертор. Перспективным методом дозиметрии нейтронного излучения на ускорителях заряженных частиц является метод, основанный на регистрации тепловых нейтронов водородосодержащими замедлителями с дополнительными вставками из тяже-

лых материалов с большой атомной массой. Обычно используется несколько шаровых или цилиндрических полиэтиленовых замедлителей, как в спектрометре Боннера, с дополнительным шаром со вставкой из тяжелого металла, либо используется один шар с дополнительным слоем тяжелого материала [33]. Множественное рождение нейтронов во взаимодействии первичных нейтронов с ядрами металла в реакциях расщепления (p, Xn) обуславливает увеличение плотности потока тепловых нейтронов в центре таких дозиметров и, соответственно, увеличению ЭЗЧ для нейтронов высоких энергий, по сравнению с обычными полиэтиленовыми замедлителями. Причем среднее число вторичных нейтронов возрастает с энергией первичного высокоэнергетического нейтрона. ЭЗЧ таких дозиметров практически всегда находится в энергетическом диапазоне от тепловых нейтронов до нескольких ГэВ. В качестве металлических вставок обычно используются металлы, такие как свинец, вольфрам и медь. Детекторами тепловых нейтронов в таких замедлителях зачастую являются пропорциональные счетчики на основе BF_3 или 3He . В условиях импульсных полей ускорителей также целесообразно использовать и накопительные детекторы тепловых нейтронов, такие как термолюминесцентные детекторы [34].

Для улучшения ЭЗЧ детектора тепловых нейтронов в таких комбинированных полиэтиленовых замедлителях в области промежуточных энергий возможно размещение кадмиевых или борных поглотителей тепловых нейтронов на некотором расстоянии от детектора [35]. Помимо улучшения ЭЗЧ такое дополнение позволяет также уменьшить вес и размеры прибора в целом. С целью улучшения ЭЗЧ в области промежуточных энергий, для оперативной оценки дозы в области энергий нейтронов от 10^{-2} МэВ до 1 ГэВ так же может применяться комбинация двух замедлителей – полиэтиленовых шаров, один из которых включает свинцовую вставку [36].

В работе [37] приводятся результаты исследований по сравнению откликов некоторых подобных дозиметров, проведенное в области высоких энергий на установке CERF в ЦЕРН (спектральная плотность нейтронов, рассчитанная с помощью программного комплекса

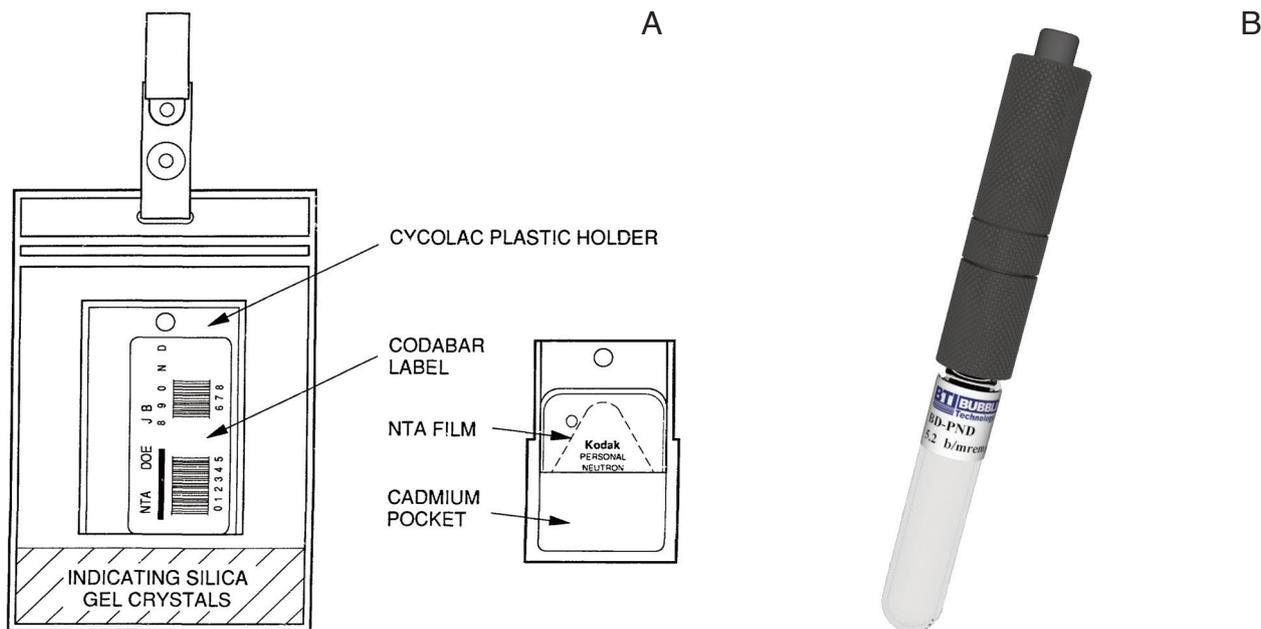


Рис.7. А – Дозиметр Los Alamos NTA
 В – Модель пузырькового детектора BDPND для быстрых нейтронов [Электронный ресурс: <http://bubbletech.ca/product/bd-pnd/>]
 Fig. 7. А – Dosimeter Los Alamos NTA
 В – Model of the bubble detector BDPND for fast neutrons [Electronic resource: <http://bubbletech.ca/product/bd-pnd/>]

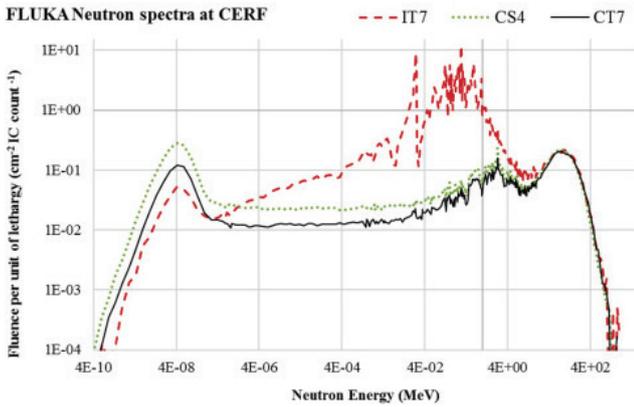


Рис. 8. Спектральная плотность нейтронов, полученная FLUKA-моделированием для положения за железной защитой (красный), за бетонной защитой по центру (синий) и за бетонной защитой (зеленый). Статистическая неопределенность значений флюенса обычно ниже 1 %

Fig. 8. Spectral density of neutrons obtained by FLUKA-modeling for the position behind the iron shield (red), behind the concrete shield in the center (blue) and behind the concrete shield (green). The statistical uncertainty of the fluence values is usually below 1 %

FLUKA, представлена на рис. 8). В эксперименте использовались такие приборы как: спектрометр Боннера с расширенным энергетическим диапазоном, нейтронный дозиметр Linus от CERN, нейтронный дозиметр Lupine, нейтронный дозиметр FHT 762 Wendi-II (рис. 9), а также нейтронный дозиметр LB6411, не регистрирующий высокоэнергетические нейтроны (ЭЗЧ дозиметров в сравнении с амбиентным эквивалентом дозы представлены на рис. 10).

По результатам облучения на опорном поле нейтронный дозиметр Wendi II показывает завышенную оценку дозы на бетонном щите в 22 % и недооценку дозы за железной защитой 11 %. Lupine показывает отклонение в $\pm 12\%$ за бетонной защитой, и занижает дозу за железной защитой до 16 %. Linus показывает хорошую согласованность с результатами расчетов по FLUKA (до $\pm 5\%$ за железной и бетонной защитой)[38].

Сравнение методов и средств измерений доз высокоэнергетического нейтронного излучения

В сравнительной табл. 4 представлены энергетические диапазоны средств измерения доз нейтронного излучения и их возможное применение для радиационного контроля на ускорителях протонов.

Дозиметры EPD-N2 и PDM-303 возможно использовать в высокоэнергетических полях нейтронного излучения за защитой протонных ускорителей только при введении поправочного коэффициента. При этом необходима информация о спектре нейтронного излучения для конкретных рабочих мест, где будет использован данный дозиметр, что требует либо применения спектрометра, чувствительного к высокоэнергетическому нейтронному излучению, либо специальных расчетных программ [31]. При оценке плотности потока высокоэнергетических нейтронов активационными углеродными детекторами минимально детектируемая плотность потока 100 нейтрон/кв.см. \times с при неопределенности 50 % и 2 нейтрон/кв.см. \times с. при ошибке 20 % при активации органического сцинтиллятора. Чувствительность метода при использовании висмутовых счетчиков и камер деления – 100 н/кв.см. \times с при ошибке 50 % и энергетическом пороге регистрации нейтронов 50 МэВ. Такие активационные детекторы могут быть чувствительны и к импульсному излучению, т.к. являются накопительными. При больших плотностях потока и больших энергиях первичного пучка на исследовательских ускорителях создаются приемлемые условия для оценки вклада в дозу

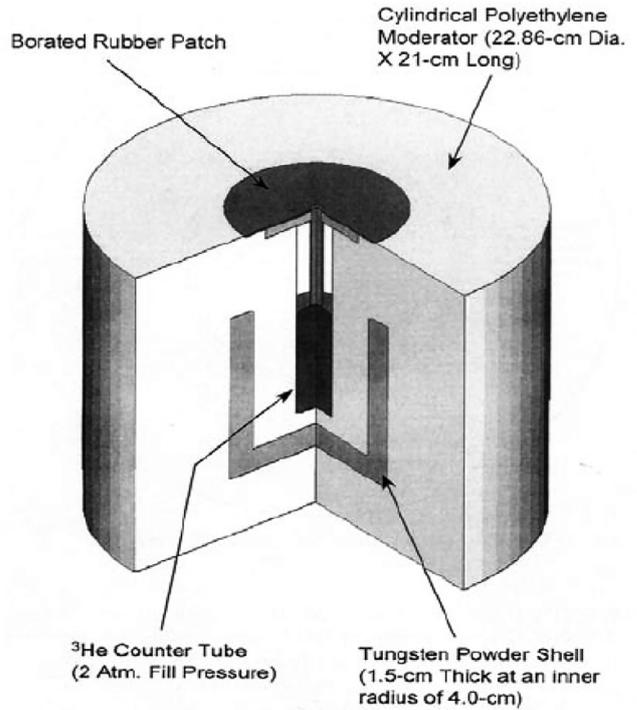


Рис. 9. Схематическое изображение дозиметра Wendi II [30]
Fig. 9. Schematic representation of the dosimeter Wendi II [30]

от высокоэнергетической компоненты. Однако на медицинских ускорителях энергия и величина плотности потока вторичного нейтронного излучения гораздо меньше, особенно за биологической защитой установок на рабочих местах персонала. С учетом низкого сечения данных активационных детекторов (до одного барна), время их экспонирования должно быть достаточно большим, что приводит к невозможности использования такого средства измерения в качестве индивидуального дозиметра нейтронного излучения.

Рассмотренные средства, основанные на методе трековых детекторов, представляют возможность расширения диапазона энергий регистрируемого нейтронного излучения для индивидуальных дозиметров. Однако такие типы дозиметров в основном имеют верхнюю границу регистрации энергий нейтронов только до 100 МэВ, являющуюся достаточно низкой. Также процесс подсчета треков достаточно трудоемкий. Такие дозиметры обычно имеют чувствительность измерения, достаточную для проведения ИДК на протонных ускорителях, но следует отметить, что нижняя граница измерения эквивалентной

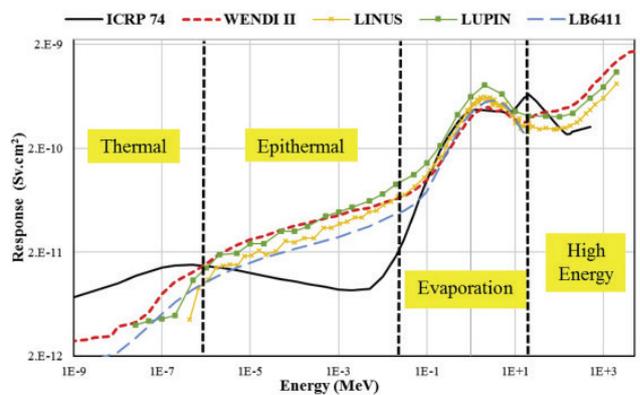


Рис. 10. Функции энергетического отклика Linus, Wendi II, Lupine и LB6411 вместе с коэффициентами конверсии эквивалентной дозы по ICRP 74

Fig. 10. Energy response functions Linus, Wendi II, Lupine and LB6411 together with ICRP 74 equivalent dose conversion factors

Таблица 4

Энергетические диапазоны рассмотренных дозиметров нейтронного излучения и их возможное применение в радиационном контроле на ускорителях протонов
Energy ranges of the considered neutron radiation dosimeters and their possible application in radiation monitoring at proton accelerators

Дозиметры	Энергетический диапазон	Возможное применение средства в радиационном контроле
EPD-N2 и PDM-303	От тепловых до 15 МэВ, необходим поправочный коэффициент	Индивидуальный дозиметр
Углеродные активационные детекторы и сцинтилляторы	От 20 МэВ до нескольких ГэВ	Оценка флюенса высокоэнергетических нейтронов при проведении ДКРМ. Возможность использования для оценки аварийных доз от высокоэнергетических нейтронов
Висмутовые активационные мишени	От 50 МэВ до нескольких ГэВ	Оценка флюенса высокоэнергетических нейтронов при проведении ДКРМ. Возможность использования для оценки аварийных доз от высокоэнергетических нейтронов
Эмульсии МК-20	От нескольких МэВ до ГэВ с применением ДВГН-01 от тепловых до ГэВ	Индивидуальный дозиметр быстрых и высокоэнергетических нейтронов с возможностью оценки аварийных доз
NTA	10–60 МэВ	Индивидуальный дозиметр
FNTD	От тепловых до 100 МэВ	Индивидуальный дозиметр возможностью оценки аварийных доз
Пузырьковые детекторы (BDPND и BDT)	От тепловых до 15 МэВ, с применением свинцового конвертора до ГэВ	Индивидуальный дозиметр
FHT 762 WENDI-II (Termo Scientific)	От тепловых до 5 ГэВ	Радиационный монитор в составе стационарного средства измерения; Переносной дозиметр при проведении ДКРМ
LUPINE (Else Nuclear)	От тепловых до 10 ГэВ	Радиационный монитор в составе стационарного средства измерения; Переносной дозиметр при проведении ДКРМ

дозы нейтронного излучения для такого метода является достаточно высокой, не менее 0,1 мЗв. Из преимуществ таких дозиметров можно отметить, что они, являясь накопительными, обладают возможностью измерения дозы нейтронного излучения в импульсных полях. Также некоторые из них, например основанные на технологии FNTD, имеют большую верхнюю границу измерения дозы – до 30 Зв, что является необходимым параметром, если дозиметр применяется для оценки вклада в дозу при аварийном облучении.

В качестве индивидуальных дозиметров могут использоваться пузырьковые детекторы BDPND и BDT с дополнительными свинцовыми конверторами нейтронов, обладающие удовлетворимой чувствительностью к нейтронному излучению. Из преимуществ таких детекторов можно отметить, что они не чувствительны к гамма-, рентгеновскому и мюонному излучению. Основным недостатком данных детекторов является то, что при использовании дополнительных конверторов из свинца увеличивается вес дозиметра. Также данные детекторы не могут быть применены для оценки аварийных доз облучения, т.к. верхняя граница дозового диапазона составляет примерно 5 мЗв [39].

Дозиметры, основанные на полиэтиленовых замедлителях с конвертором, имеют лучшую чувствительность к нейтронному излучению из всех рассмотренных методов в широком диапазоне энергий нейтронного излучения – от тепловых до нескольких ГэВ. В отличие от других приведенных методов измерения, метод с использованием тепловых детекторов нейтронов за замедлителями и конверторами обладает достаточно низкой границей измерения мощности дозы нейтронного излучения, до 0,01 мкЗв/ч. Однако в технических характеристиках, таких как Wendy II и Lupine, указан предел измерения мощности дозы нейтронного излучения 100 мЗв/ч, соответственно такие дозиметры не могут применяться при оценке вклада в дозу при аварийном облучении, а также из-за наличия электронно-измерительной аппаратуры не могут применяться и в импульсных полях.

Заключение

На основании проведенного обзора по средствам и методам дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения на протонных ускорителях возможно сделать следующие выводы.

В настоящее время отечественные производители приборов и систем радиационного контроля не могут предоставить необходимые средства измерения с возможностью корректного измерения дозы нейтронного излучения свыше 20 МэВ.

Предложен ряд частных методических решений, позволяющих использовать рассмотренные типы дозиметров в радиационном контроле на протонных ускорителях как временное решение в отсутствии нормативной базы и аттестованного эталона для нейтронного излучения с энергией свыше 20 МэВ.

Для разработки соответствующей санитарно-гигиенической нормативной базы необходимо ее гармонизировать с международными рекомендациями, относящимся к дозиметрии нейтронного излучения с энергией более 20 МэВ.

В связи с отсутствием средств дозиметрического контроля на протонных ускорителях с возможностью корректного измерения дозы нейтронного излучения с энергией свыше 20 МэВ, остается неясной позиция выполняющих экспертизу органов санитарно-эпидемиологического надзора при выдаче санитарно-эпидемиологического заключения для таких объектов, хотя в обязанности таких надзорных организаций входит требование к эксплуатирующим органам обеспечить объективный радиационный контроль на протонных ускорителях.

Из этого следует, что необходим комплекс работ по разработке и введению новых средств измерений, способных корректно измерять дозу нейтронного излучения с энергией более 20 МэВ, и на основе полученных результатов возможно разработать специальные санитарные правила и нормы по радиационной безопасности для ускорителей протонов, учитывающих энергетические особенности нейтронного излучения на таких объектах.

Means and Methods of Dosimetry of High-Energy Neutron Radiation on Proton Accelerators

A.G. Tsovyanov¹, P.P. Gantsovskii¹, A.Yu. Komarov¹, A.G. Alexeev²,
M.R. Popchenko¹, V.E. Zhuravleva¹, N.A. Bogdanenko¹

¹A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

²Institute of Physics High Energy of the RAS, Protvino, Russia

Contact person: Artyom Yurievich Komarov: komarov_artiom@mail.ru

CONTENTS

The main common means and methods of neutron radiation dosimetry.

Consideration of various means and methods for detecting high-energy neutron radiation:

- Activation
- Tracking
- Bubble detectors
- TEPC
- Moderator + converter

Comparison of the above methods and instruments for measuring doses of high-energy neutron radiation.

Key words: *dosimetry, high-energy radiation, proton accelerators, radiation safety*

For citation: Tsovyanov AG, Gantsovskii PP, Komarov AYu, Alexeev AG, Popchenko MR, Zhuravleva VE, Bogdanenko NA. Means and Methods of Dosimetry of High-Energy Neutron Radiation on Proton Accelerators. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):77-85.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-77-85

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скринский А.Н. Ускорительные и детекторные перспективы физики элементарных частиц УФН. Т. 138 С. 3–43. 1982. DOI: 10.3367/UFN.0138.198209a.0003
2. Агафонов А.В. Ускорители в медицине // Матер. 15-го совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.2. 1991.
3. Князев В.В., Комочков М.М., Лебедев В.Н., Мещерова И.В., Мошаров А.И. Радиационная безопасность на ускорителях протонов высокой энергии // Атомная энергия. 1969. Т. 27, № 3.
4. Егорова М.С. Характеристики вторичного излучения от протонного ускорителя на 7 ГэВ. М.: Институт биофизики МЗ СССР, 1966.
5. Алейников В.Е., Комочков М.М. Дозиметрические характеристики полей излучения ядерно-физических установок ОИЯИ и адекватность показаний детекторов дозе радиации. 1981.
6. Alexeev AG, Kharlampiev SA. Dosimetric Characteristics of the IHEP Neutron Reference Fields // Rad. Prot. Dosim. 1997. V.70, No. 1-4. P. 341-344.
7. МУ 2.6.5.028-2016. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования.
8. МУ 2.6.5.026-2016. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования: Методические указания.
9. Юревич В.И. Спектрометрия высокоэнергетических нейтронов. Дубна: ОИЯИ, 2012.
10. Красавин Е.А., Борейко А.В., Колтовая Н.А., Говорун Р.Д., Комова О.В., Тимошенко Г.Н. Радиобиологические исследования в ОИЯИ. Дубна: ОИЯИ, 2015. 182 с.
11. Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Купцов С.И., Сухарев М.М. Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01: Препринт ИФВЭ 2007–21. Протвино, 2007. 12 с.
12. Комплекс аварийной нейтронной дозиметрии “КОРДОН-А”: Описание типа средства измерения.
13. Рекомендации по приборному обеспечению дозиметрического и радиометрического контроля в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99.
14. Алексеев А.Г., Бараненков Н.Н., Быстров Ю.В. Исследование чувствительности индивидуального нейтронного дозиметра PDM-303 к высокоэнергетическому нейтронному излучению // Матер. XVI совещания по ускорителям заряженных частиц, 20–22 октября 1998 г. Протвино: ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, 1998.
15. Мокров Ю.В. Разработка методов и средств метрологического обеспечения радиационного контроля нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах: Автореф. Дубна, 1998.
16. Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей протонов с энергией более 100 МэВ.
17. Цолянов А.Г., Ганцовский П.П., Шандала Н.К., Шинкарев С.М., Романов В.В. Проблемы обеспечения радиационной безопасности персонала при эксплуатации терапевтических ускорителей протонов на примере центра протонной терапии в Дмитровграде // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 2 С. 33-40. DOI: 10.12737/article_5ca5e40c3f79b9.76178616
18. Алексеев А.Г., Быстров Ю.В., Головачик В.Т., Харлампиев С.А. Дозиметр смешанного излучения на основе ионизационных камер для метрологического обеспечения радиационного контроля на ускорителе: Препринт ИФВЭ 98-68. Протвино, 1998.
19. Комочков М.М., Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1986.
20. Егорова М.С. Радиационно-дозиметрическая характеристика условий труда на протонном синхротроне с энергией 7 ГэВ. М.: Институт биофизики МЗ СССР, 1967.
21. Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А. Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ. Протвино: ГНЦ РФ ИФВЭ, 2000.
22. Kazumasa S, Takeshi I, Toshiko K. Design of a High Energy Neutron Dosimeter Using CR-39 with Multi-Layer Radiator // Radiation Measurements. 2011. V.46, Issue 12, December. P. 1778-1781.
23. Голдобин В.Н., Широков А.Ю., Мышкина Н.В., Пелешко В.Н. Гигиеническая оценка условий труда персонала института физики высоких энергий и мониторинг некоторых показателей здоровья // Медицина экстремальных ситуаций. 2018. Т. 20. № 1.
24. Комочков М.М., Мокров Ю.В. Индивидуальный дозиметрический контроль в ОИЯИ. Сообщения объединенного института ядерных исследований. Р16-94-178. Дубна, 1994.
25. Гельфанд Е.К., Комочков М.М., Манько Б.В., Салацкая М.Я., Сычев Б.С. Использование метода ИФКн для определения эквивалентной дозы излучения за защитой ускорителей протонов // Атомная энергия. 1980. Т.49. Вып. 2. С. 108-112.
26. Санников А.В. Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях: Автореф. Протвино, 2006.
27. Clinton P., Anderson Meson., Michael W., Mallett Dennis G., Vasilik George J., Littlejohn Joseph R. High-Energy Neutron Dosimetry at TKE Physics Facility Cortez. Los Alamos National Laboratory, 1990.
28. Akselrod M.S. Fundamentals of Materials, Techniques, and Instrumentation for OSL and FNTD Dosimetry Concepts and Trends in Medical Radiation Dosimetry // Proceedings of SSD Summer School. AIP Conference Proceedings. 2011. V.1345, Issue 1. P. 274-302.
29. Alexeev A.G. Application of Tissue Equivalent Proportional Counter in IHEP Radiation Protection: IHEP Preprint 95-69. Protvino Publ., 1995.
30. Alexeev A.G., Kharlampiev S.A. Energy Response of Tissue Equivalent Proportional Counter for Neutron Above 20 MeV: IHEP Preprint 97-18. Protvino Publ., 1997.
31. Nunomiya T., Nakao N., Kim E., Kurosawa T., Taniguchi S., Sasaki M., Iwase H., Nakamura T., Uwamino Y., Shibata T., Ito S., Perry D.R. & Wright P. Measurements of Neutron Attenuation through Iron and Concrete at ISIS // Journal of Nuclear Science and Technology. 2000. Suppl. 1 (March). P. 158-161.
32. Improved Response of Bubble Detectors' to High-Energy Neutrons Stefano Agosteo Marco Silari and Luisa Uirid? Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Nucleare. Milan, Italy CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland.
33. Крочков В.П. Адронный дозиметр: Патент на изобретение. SU 1521057.
34. Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э. Пассивный дозиметр нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей. Протвино, 2019.
35. Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. Оптимизация конструкции дозиметра нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей. Протвино, 2014.
36. Бескровная Л.Г., Гусева С.В., Тимошенко Г.Н. Метод мониторинга полей нейтронов вокруг высокоэнергетических ускорителей // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т.15, №3(215). С. 286-294.
37. Dinara N., Pozzia F., Silaria M., Puzob P., Chiriottic S., Saint-Hubert M.De., Vanhaverec F., Hoeyc O.Van, Orchardd G.M., Wakerd A.J. Instrument Inter-comparison in the High-Energy Field at the CERN-EU Reference Field (CERF) Facility and Comparison with the 2017 FLUKA Simulations.
38. Olsher, et al. // Health Physics. 2000. V. 79, No. 2. P. 170ff.
39. Bhaskar Mukherjee, Wolfgang Clement, Stefan Simrock. Neutron Field Characterisation in a High-Energy Proton-Synchrotron Environment Using Bubble Detectors // Radiation Measurements. 2008. V. 43, Issues 2-6, February-June. P. 554-557.

REFERENCES

1. Skirnskiy AN. Accelerator and Detector Prospects of Elementary Particle Physics. DOI: 10.3367/UFNr.0138.198209a.0003 (In Russian).
2. Agafonov AV. Accelerators in Medicine 15th Meeting on Charged Particle Accelerators 1997. Vol. 2. (In Russian).
3. Knyazev VV, Komochkov MM, Lebedev VN, Mescherova IV, Mosharov AI. Radiation Safety at High-Energy Proton Accelerators. Atomic Energy. 1969;27;3 (In Russian).
4. Egorova MS, et al. Characteristics of Secondary Radiation from a 7 GeV Proton Accelerator. Moscow, Institute of Biophysics, Ministry of Health of the USSR Publ., 1966 (In Russian).
5. Aleinikov VE, Lumps MM. Dosimetric characteristics of radiation fields of JINR nuclear physics facilities and adequacy of detector readings to radiation dose. 1981 (In Russian).
6. Alexeev AG, Kharlampiev SA. Dosimetric Characteristics of the IHEP Neutron Reference Fields. Rad. Prot. Dosim. 1997;70:1-4:341-344.
7. MU 2.6.5.028-2016. Determination of Individual Effective and Equivalent Doses and Organization of Control of Occupational Exposure in the Conditions of Planned Exposure. General Requirements (In Russian).
8. MU 2.6.5.026-2016. Dosimetric Control of External Occupational Exposure. General Requirements. Methodical Instructions (In Russian).
9. Yurevich VI. Spectrometry of High-Energy Neutrons. JINR. 2012 (In Russian).
10. Krasavin EA, Boreiko AV, Koltovaya NA, Govorun RD, Komova OV, Timoshenko GN. Radiobiological research at JINR Dubna. JINR. 2015. 182 p. (In Russian).
11. Sannikov AV, Peleshko VN, Savitskaya EN, Kuptsov SI, Sukharev MM. Multiball Neutron Spectrometer Based on the RSU-01 Serial Instrument: IHEP. Preprint 2007–21. Protvino Publ., 2007. 12 p. (In Russian).
12. Complex of Emergency Neutron Dosimetry "CORDON-A". Description of the Type of Measuring Instrument (In Russian).
13. Recommendations for Instrumentation of Dosimetric and Radiometric Control in Accordance with NRB-99 and OSPORB-99 (In Russian).
14. Alekseev AG, Baranenko NN, Bystrov YuV. Investigation of the Sensitivity of an Individual Neutron Dosimeter PDM-303 to High-Energy Neutron Radiation. XVI Meeting on Charged Particle Accelerators. SSC RF Institute for High Energy Physics, October 20-22, Protvino, 1998 (In Russian).
15. Mokrov YV. Development of Methods and Means of Metrological Support for Radiation Monitoring of Neutron Radiation at Accelerators and Pulsed Reactors. Abstract. Dubna Publ., 1998 (In Russian).
16. Sanitary Rules for the Placement and Operation of Proton Accelerators with Energies above 100 MeV (In Russian).
17. Tsovyanov AG, Gantsovsky PP, Shandala NK, Shinkarev SM, Romanov VV. Problems of Ensuring Radiation Safety of Personnel when Operating Proton Therapeutic Accelerators Using the Example of the Proton Therapy Center in Dmitrovgrad. Med. Radiology and Radiation Safety. 2019;64;2:33-40. DOI: 10.12737/article_5ca5e40c3f79b9.76178616 (In Russian).
18. Alekseev AG, Bystrov YV, Golovachik VT, Kharlampiev SA. Mixed Radiation Dosimeter Based on Ionization Chambers for Metrological Support of Radiation Monitoring at an Accelerator. IHEP Preprint 98-68. Protvino Publ., 1998 (In Russian).
19. Komochkov MM, Lebedev VN. A Practical Guide to Radiation Safety at Charged Particle Accelerators. Voscov, Energoatomizdat Publ., 1986 (In Russian).
20. Egorova MS. Radiation-Dosimetric Characteristics of Working Conditions at a Proton Synchrotron with an Energy of 7 GeV. Moscow, Institute of Biophysics, Ministry of Health of the USSR Publ., 1967 (In Russian).
21. Krupny GI, Stetsenko GN, Yanovich AA. Methodical Problems the Use of Threshold Activation Detectors in Radiation Researches at the Ihep Accelerator Complex. IHEP Preprint 2000–30. Protvino Publ., 2000 (In Russian).
22. Kazumasa S, Takeshi I, Toshiso K. Design of a High Energy Neutron Dosimeter Using CR-39 with Multi-Layer Radiator Radiation Measurements. 2011;46(12):1778-1781.
23. Goldobin VN, Shirokov AY, Mynkina NV, Peleshko VN. Hygienic Assessment of the Working Conditions of the Staff of the Institute of High Energy Physics and Monitoring of Some Health Indices. Emergency Medicine. 2018;20(1) (In Russian).
24. Komochkov MM, Mokrov YV. Individual Dosimetric Control at JINR. Communications of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna Publ., 1994. P. 16-94-178 (In Russian).
25. Gelfand EK, Komochkov MM, Manko BV, Salatskaya MY, Sychev BS. Using the IFcN Method to Determine the Equivalent Radiation Dose behind the Shielding of Proton Accelerators. Atomic Energy. 1980;49(2):108-112 (In Russian).
26. Sannikov AV. Development of Methods for Spectrometry of Neutron Radiation at Large Proton Accelerators. Abstract. Protvino Publ., 2006 (In Russian).
27. Clinton P, Anderson Meson, Michael W, Mallett Dennis G, Vasilik George J, Littlejohn Joseph R. High-Energy Neutron Dosimetry at TKE Physics Facility Cortez. Los Alamos National Laboratory. 1990.
28. Akselrod MS. Fundamentals of Materials, Techniques, and Instrumentation for OSL and FNTD Dosimetry Concepts and Trends in Medical Radiation Dosimetry. Proceedings of SSD Summer School. AIP Conference Proceedings. 2011;1345(1):274-302.
29. Alexeev AG. Application of Tissue Equivalent Proportional Counter in IHEP Radiation Protection. IHEP Preprint 95-69. Protvino Publ., 1995.
30. Alexeev AG, Kharlampiev SA. Energy Response of Tissue Equivalent Proportional Counter for Neutron Above 20 MeV. IHEP Preprint 97-18. Protvino Publ., 1997.
31. Nunomiya T, Nakao N, Kim E, Kurosawa T, Taniguchi S, Sasaki M, Iwase H, Nakamura T, Uwamino Y, Shibata T, Ito S, Perry D R & Wright P. Measurements of Neutron Attenuation through Iron and Concrete at ISIS. Journal of Nuclear Science and Technology. 2000;Suppl. 1 (March):158-161.
32. Improved Response of Bubble Detectors' to High-Energy Neutrons Stefano Agosteo Marco Silari and Luisa Uirid? Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Nucleare. Milan, Italy CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland.
33. Kryuchkov VP. Hadron Dosimeter. Invention Patent. SU 1521057 (In Russian).
34. Mamaev AM, Peleshko VN, Savitskaya EN, Sannikov AV, Sukharev MM, Sukhikh SE. Extended Energy Range Passive Neutron Dosimeter for High Energy Accelerators. Protvino, 2019 (In Russian).
35. Peleshko VN., Savitskaya EN., Sannikov AV. Optimization of the Design of a Neutron Dosimeter with an Extended Energy Range for High-Energy Accelerators. Protvino, 2014 (In Russian).
36. Beskrovnaya LG., Guseva SV., Timoshenko GN. A Method for Monitoring Neutron Fields Around High-Energy Accelerators. Letters to ECHAYA. 2018;15;3(215):286-294 (In Russian).
37. Dinara N, Pozzia F, Silaria M, Puzob P, Chiriottic S, Saint-Huberte MDe, Vanhaverec F, Hoeyc OVan, Orchardd GM, Wakerd AJ. Instrument Intercomparison in the High-Energy Field at the CERN-EU Reference Field (CERF) Facility and Comparison with the 2017 FLUKA Simulations.
38. Olsher, et al. Health Physics. 2000;79;2:170ff.
39. Bhaskar Mukherjee, Wolfgang Clement, Stefan Simrock. Neutron Field Characterisation in a High-Energy Proton-Synchrotron Environment Using Bubble Detectors. Radiation Measurements. 2008;43;Issues 2-6, February-June:554-557.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 30.03.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 30.03.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

М.Ю. Калинина, А.С. Кретов, А.Н. Царев, М.А.Солорева, Е.А.Денисова

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ПЕРСОНАЛА ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

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

Контактное лицо: Андрей Сергеевич Кретов: and2610@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Связь между уровнем здоровья работника и его профессиональной надежностью в настоящий момент очевидна и не требует дополнительных доказательств. Реализация мероприятий, направленных на снижение рисков развития нештатных ситуаций по вине человеческого фактора на объектах использования атомной энергии, является важным элементом системы радиационной защиты.

В рамках достижения вышеуказанных целей организации в соответствии с Федеральным законом от 21.11.1995 № 170-ФЗ выполнение отдельных видов работ в области использования атомной энергии требует оформления специальных разрешений Ростехнадзора. Обязательным условием получения такого разрешения для специалиста является отсутствие психофизиологических противопоказаний по результатам психофизиологического обследования.

В данном исследовании проведен анализ результатов психофизиологических обследований (далее – ПФО) сотрудников объектов использования атомной энергии, проведенных специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России в 2020 г.

Ключевые слова: работники, психофизиологические обследования, психофизиологические противопоказания, радиационная безопасность, объекты использования атомной энергии, атомная промышленность

Для цитирования: М.Ю. Калинина, Кретов А.С., Царев А.Н., Солорева М.А., Денисова Е.А. Анализ результатов психофизиологических обследований персонала объектов использования атомной энергии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.86–88.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-86-88

Введение

Связь между уровнем здоровья работника и его профессиональной надежностью в настоящий момент очевидна и не требует дополнительных доказательств. Реализация мероприятий, направленных на снижение рисков развития нештатных ситуаций по вине человеческого фактора на объектах использования атомной энергии, является важным элементом системы радиационной защиты [1].

В рамках достижения вышеуказанных целей организации в соответствии с Федеральным законом от 21.11.1995 № 170-ФЗ выполнение отдельных видов работ в области использования атомной энергии требует оформления специальных разрешений Ростехнадзора. Обязательным условием получения такого разрешения для специалиста является отсутствие психофизиологических противопоказаний по результатам психофизиологического обследования [2].

Материал и методы

В данном исследовании проведен анализ результатов психофизиологических обследований (далее – ПФО) сотрудников объектов использования атомной энергии, проведенных специалистами ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России в 2020 г.

До 1 января 2021 г. порядок проведения психофизиологического обследования и оценки его результатов был установлен постановлением Правительства Российской Федерации от 01.03.1997 № 233 и Методическими указаниями по проведению медицинских осмотров и психофизиологических обследований работников объектов использования атомной энергии Минздрава России от 08.06.1999 № 32-023/20.

В соответствии с указанными регламентами ПФО проводилось с использованием аппаратно-программного комплекса «ПФС-Контроль». Объем предъявляемых тестов включал психофизиологические методики (простая зрительно-моторная реакция, сложная зрительно-моторная реакция, реакция на движущийся объект), а также психодиагностические методики (методика многостороннего исследования личности, 16-факторный опросник Кетелла и тест Равена).

Результаты и обсуждение

Общее количество работников, прошедших ПФО, составило 505 чел., из них 423 мужчины и 82 женщины. Распределение по возрасту сотрудников, прошедших ПФО, представлено на рис. 1. Количество обследуемых от 18 до 35 лет составило 126 чел., от 35 до 60 – 288 чел. и старше 60 – 91 чел.

Соотношение медицинских заключений, вынесенных по результатам ПФО, представлено на рис. 2. Доля работников, в отношении которых были зарегистрированы психофизиологические противопоказания, составила 9,5% (48 пациентов).

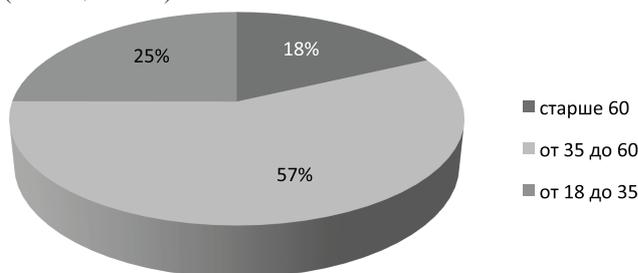


Рис. 1. Распределение сотрудников, прошедших ПФО, по возрасту
Fig. 1. Distribution of employees who have passed the PPhE, by age

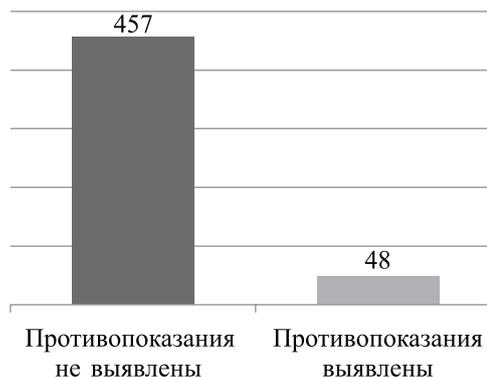


Рис. 2. Медицинские заключения, вынесенные по результатам ПФО
Fig. 2. Medical reports based on the results of the PPhE

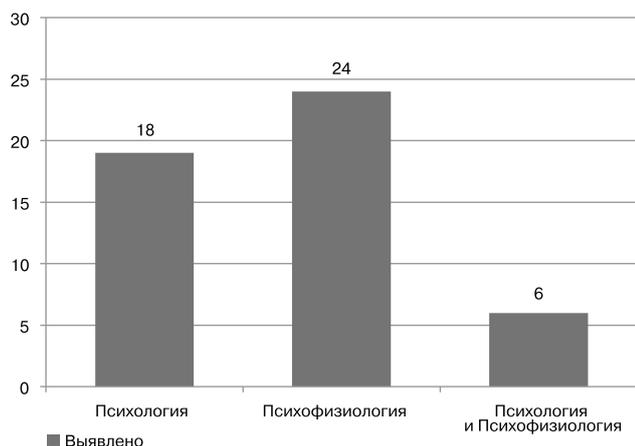


Рис. 3. Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний
Fig. 3. The results of the analysis of the causes of psychophysiological contraindications

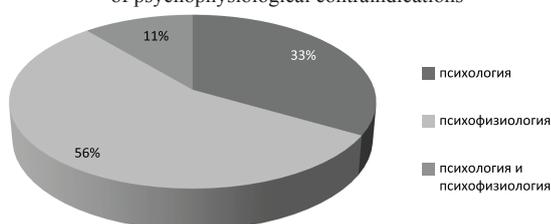


Рис. 5. Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний в возрастной группе от 18 до 35 лет
Fig. 5. Results of the analysis of the causes of psychophysiological contraindications in the age group from 18 to 35 years old

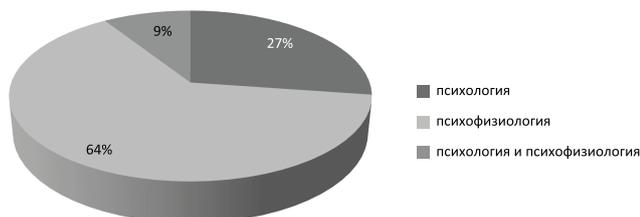


Рис. 7. Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний в возрастной группе старше 60 лет
Fig. 7. Results of the analysis of the causes of psychophysiological contraindications in the age group over 60 years old

По результатам психофизиологических тестов 24 работника имели недопустимые значения, 18 работников имели недопустимые значения только по результатам психологических тестов, 6 работников имели недопустимые значения по результатам психологических и психофизиологических тестов. Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний представлены на рис. 3.

Анализ результатов ПФО в разрезе возрастных групп показывает, что в возрастной группе от 18 до 35 лет противопоказания были выявлены у 9 сотрудников, что составляет 1,8 % от общего числа обследуемых; в возрастной группе от 35 до 60 лет противопоказания были выявлены у 17 сотрудников, что составляет 3,4 %; в возрастной группе старше 60 лет противопоказания были выявлены у 22 сотрудников, что составляет 4,4 %.

Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний в возрастной группе от 18 до 35 лет представлены на рис. 5. По результатам психофизиологических тестов 5 работников (1 % от общего числа обследуемых) имели недопустимые значения, 3 работника (0,6 %) имели недопустимые значения по результатам психологических тестов, 1 работник (0,2 %) имели недопустимые значения по результатам психологических и психофизиологических тестов.

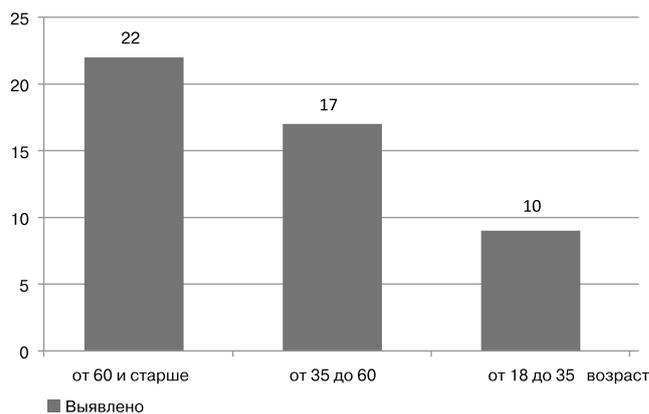


Рис. 4. Результаты анализа результатов ПФО в разрезе возрастных групп.
Fig. 4. Results of the analysis of the results of the PPhE in the context of age groups.

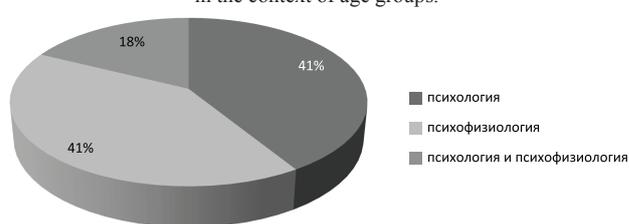


Рис. 6. Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний в возрастной группе от 35 до 60 лет
Fig. 6. Results of the analysis of the causes of psychophysiological contraindications in the age group from 35 to 60 years old

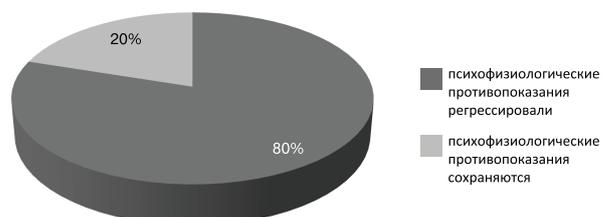


Рис. 8. Результаты повторных ПФО
Fig. 8. Results of repeated PPhE

Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний в возрастной группе от 35 до 60 лет представлены на рис. 6. По результатам психофизиологических тестов 7 работников (1,4 % от общего числа обследуемых) имели недопустимые значения, 7 работников (1,4 %) имели недопустимые значения по результатам психологических тестов, 3 работника (0,6 %) имели недопустимые значения по результатам психологических и психофизиологических тестов.

Результаты анализа причин психофизиологических противопоказаний в возрастной группе старше 60 лет представлены на рис. 7. По результатам психофизиологических тестов 14 работников (2,8 % от общего числа обследуемых) имели недопустимые значения, 6 работников (1,2 %) имели недопустимые значения по результатам психологических тестов, 2 (0,4 %) работника имели недопустимые значения по результатам психологических и психофизиологических тестов.

Работникам, в отношении которых по результатам ПФО вынесено решение о наличии психофизиологических противопоказаний, рекомендовалось проведение дообследования и реабилитационно-восстановительных мероприятий с последующим повторным проведением ПФО. Результаты повторных ПФО представлены на рис. 8. По

итогах повторного ПФО в 80 % случаев показатели тестов вернулись в допустимые значения, что явилось основанием для вынесения медицинского заключения об отсутствии психофизиологических противопоказаний. В 20 % случаев недопустимые значения показателей тестов сохранялись по результатам повторного ПФО, в связи с чем медицинское заключение о наличии психофизиологических противопоказаний не изменилось.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что до 10 % работников объектов использования атомной энергии имеют недопустимые отклонения (психофизиологические противопоказания), что является показанием к проведению реабилитационно-восстановительных мероприятий. По итогам повторных психофизиологических обследований в 2020 г. до 80 % работников имеют положительную динамику и возвращаются к профессиональной деятельности.

Таим образом, обязательные психофизиологическое обследование персонала объектов использования атомной энергии является эффективным элементом системы радиационной защиты, позволяющим влиять на риски развития радиационных аварий по вине человеческого фактора и своевременно осуществлять адресные реабилитационные мероприятия.

Analysis of the Results of Psychophysiological Examinations of Personnel of Nuclear Facilities

M.Yu. Kalinina, A.S. Kretov, A.N. Tsarev, M.A. Soloreva, E.A. Denisova

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

Contact person: Andrey Sergeevich Kretov: and2610@yandex.ru

ABSTRACT

The link between the health level of an employee and his professional reliability is currently obvious and does not require additional proof. The implementation of measures aimed at reducing the risks of developing emergency situations due to the fault of the human factor at nuclear facilities is an important element of the radiation protection system.

In order to achieve the above goals of the organization in accordance with Federal Law No. 170-FZ of 21.11.1995, the performance of certain types of work in the field of atomic energy use requires special permits from Rostekhnadzor. A prerequisite for obtaining such a permit for a specialist is the absence of psychophysiological contraindications based on the results of a psychophysiological examination.

In this study, the analysis of the results of psychophysiological examinations (hereinafter referred to as PPhE) of employees of atomic energy facilities, carried out by specialists of the A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Centre in 2020.

Key words: workers, psychophysiological examinations, psychophysiological contraindications, radiation safety, nuclear facilities, nuclear industry

For citation: Kalinina MYu, Kretov AS, Tsarev AN, Soloreva MA, Denisova EA. Analysis of the Results of Psychophysiological Examinations of Personnel of Nuclear Facilities. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):86-88.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-86-88

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бобров А.Ф. Предупреждение техногенных чрезвычайных ситуаций: информационная технология разработки критериев оценки антропогенных рисков // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2019. № 2. С. 5–16. DOI 10.25016/2541-7487-2019-0-2-05-16.
2. Бушманов А.Ю., Кретов А.С., Щербланов В.Ю., Бобров А.Ф., Кретова Е.Ю. Система организации обязательных медицинских осмотров работников объектов использования атомной энергии // Медицинская радиология и радиационная безопасность 2014. Т. 59. № 4. С. 9 – 17.

REFERENCES

1. Bobrov A.F. Prevention of technological emergency situations: information technology to develop criteria for anthropogenic risks estimation. Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations. 2019. N 2. P. 5–16. DOI 10.25016/2541-7487-2019-0-2-05-16 (In Russian).
2. Bushmanov A.Yu., Kretov A.S., Shcheblanov V.Y., Bobrov A.F., Kretova E.Y. The System of Organization the Obligatory Medical Surveys of Employees of Nuclear Facilities at the Current Stage. Medical Radiology and Radiation Safety. 2014;59(4):9-17. (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 16.02.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 16.02.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

А.В. Иванченко¹, В.А. Башарин², И.С. Драчев¹, А.Б. Селезнев¹, А.Ю. Бушманов³

К ВОПРОСУ О ФАРМАКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В НЕПОРАЖАЮЩИХ ДОЗАХ: ВОЗМОЖНО, НЕОБХОДИМО? СООБЩЕНИЕ 1.

ОБЩИЙ ОБЗОР МЕДИКО-ТАКТИЧЕСКИХ И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ

¹Научно-исследовательский испытательный институт военной медицины МО РФ, Санкт-Петербург.

²Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

³Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва.

Контактное лицо: Александр Викторович Иванченко, ivanchenko2@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Обзор современных представлений о биологическом действии ионизирующих излучений в средних дозах на живой организм и о последствиях облучения в интересах оценки необходимости применения лекарственных средств, пригодных для целей модификации эффектов; побуждение к дискуссии по рассматриваемому вопросу.

Результаты: Оценены условия происхождения и перечень возможных радиационных эффектов от облучения в средних дозах диапазона 0,1–1 Гр, оценены масштабы и феноменология последствий как предмет модификации противолучевыми средствами (ПЛС).

Выводы: Фармакологическая поддержка (применение ПЛС) в условиях кратковременных и протяженных облучений с низкой мощностью дозы и в диапазоне доз 0,2–1 Гр представляется необходимой в связи с реальностью детерминированных эффектов при превышении пределов доз (отчасти преморбидного или доклинического уровня, с выраженными психогенными реакциями – компонентами итогового состояния), а также с возможностью возникновения стохастических эффектов сверх спонтанных, хотя, по приближенным оценкам, с незначительной частотой.

Ключевые слова: облучение, средние дозы, противолучевые средства, дискуссируемость применения

Для цитирования: К вопросу о фармакологической защите при облучении в непоражающих дозах: возможно, необходимо? Сообщение 1. Общий обзор медико-тактических и феноменологических аспектов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.89–100.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-89-100

Введение

Проблема химической (фармакологической) защиты от ионизирующих излучений (ИИ) насчитывает не один десяток лет, а в 80-е годы XX века актуализировалась еще и в части профилактики при облучении в непоражающих дозах в связи с известными последствиями аварии на ЧАЭС и других инцидентов.

Как известно, для высоких (поражающих) доз излучений потребность в применении радиопротекторов является вполне очевидной, что в основном разделяется международным научным сообществом. В то же время для защиты от облучения в меньших дозах, как представляется, необходимы дополнительные аргументы, основанные на критическом анализе проблемы. Требуется учитывать современные обновленные представления об аспектах биологического действия ионизирующих излучений в так называемых малых и средних дозах на живой организм, появление новых лекарственных средств, пригодных для целей модификации, обновленную систематику в организации радиационной безопасности и защиты, к которой «примыкает» специфика радиационных эффектов от низкодозового облучения и др. Дискуссионность вопроса предполагает рассмотрение и оценку масштаба проблемы, а также реалистичность и целесообразность применения противолучевых средств (ПЛС).

Применительно к сообщению № 1 целью исследования явилось рассмотрение современных представлений о биологическом действии ионизирующих излучений в средних дозах на живой организм и о последствиях облучения в интересах оценки необходимости применения лекарственных средств, пригодных для целей модификации эффектов; побуждение к дискуссии по рассматриваемому вопросу.

В последующих сообщениях рассмотрены научные публикации, относящиеся к патогенетическим аспектам и оценке эффективности ПЛС в эксперименте, опыту изучения и оценки эффективности противолучевых средств, перспектив их применения, фармаколога-фармацевтическим, медико-правовым аспектам внедрения и итоговым оценкам.

Диапазоны непоражающих доз облучения

Общеизвестно, что классические радиопротекторы в основном реализуют свое действие при облучении в так называемых больших дозах (вызывающих острые поражения) в виде снижения смертности, снижения тяжести течения поражения, ускорения восстановления и пр. Вынесенный в заглавие статьи оборот «непоражающие дозы» – временный, так как требует уточнения части дозового диапазона, не приводящего к острым поражениям, поскольку диапазон неоднороден и включает в себя понятия «малых доз», а также «средних доз» ионизирующего излучения [1–4].

Существует достаточно представлений, развивающихся и поддерживаемых международными и национальными авторитетными организациями и исследователями, относительно определений так называемых малых доз ионизирующих излучений [2, 5–10].

Как известно, в определении малых доз на сегодня используются микродозиметрический [11–17], радиобиологический, медицинский, эпидемиологический [2–4, 8, 15–19], и даже психологический критерии [2, 8, 20, 21]. Ближе к существу нашей задачи находятся подходы, основанные на медицинском и эпидемиологическом представлениях. Так, малыми дозами называют дозы от 1 до 40 сГр [22], от 50 мГр до 1 Гр [23], 0,5 Гр [24], до 1 Гр [25]. Единства в определении малых доз нет [26, 27].

Малыми дозами применительно к действию ИИ на человека вначале называли дозы, не вызывающие ОЛБ даже легкой степени. Диапазон таких доз при облучении с высокой мощностью доз определяли ниже 1 Гр. Это фактически порог опасного для жизни действия ИИ. При облучении с низкой мощностью дозы эта верхняя граница возрастает. Так обстоит дело, когда критерием эффекта является острое лучевое поражение [28]. Граница соответствует нормативу принятия мер вмешательства при радиационной аварии согласно отечественным НРБ-99/2009 [29].

С другой стороны, медицинское регламентирующее обоснование малых доз предполагает, что они характеризуются минимальными лучевыми эффектами, риском которых нормативно и практически можно пренебречь [3, 30, 31]. Следовательно, при превышении верхнего уровня малых доз риски становятся значимыми, что и влияет на формирование искомого диапазона доз, в котором необходимо применение ПЛС (см. далее). В качестве верхней границы диапазона малых доз предлагаются значения 0,1 – 0,2 Гр [32 – 34].

Как отмечает автор [8], в диапазоне 0,1 – 0,2 Гр излучений «зарегистрированы даже некоторые детерминированные эффекты». Это соответствует требованиям НРБ-99/2009 по контролю последствий при планируемом повышенном облучении: «подвергшиеся однократному облучению в дозе более 100 мЗв в последующем не должны подвергаться облучению в дозе более 20 мЗв в год. Людей, получивших в течение года дозу ≥ 200 мЗв или имеющих медицинские противопоказания согласно списку Минздрава России, к работам, связанным с повышенным облучением, не привлекают. Однократное облучение в дозе более 200 мЗв рассматривают как потенциально опасное для здоровья. Подвергшихся такому облучению немедленно выводят из зоны лучевого воздействия и направляют на медицинское обследование». Документ предполагает риски для здоровья и информирование об этом участников ЛПА, а также исключает облучение лиц моложе 30 лет [29].

Обсуждаемые дозы, согласно публикациям НКДАР [19, 35], приняты как приводящие к значимому повышению частоты aberrаций хромосом в лимфоцитах после облучения (0,2 – 0,4 Гр), к выходу раков (в «японской когорте», 0,2 Гр). А граница малых доз в 0,1 Гр [35] определяется и тем, что это лимит статистического ограничения возможностей эпидемиологии в получении значимого увеличения выхода раков [8, 36–40].

Близкие взгляды имеют место и по отношению к мощности дозы (МД): менее чем 0,1 мГр/мин (длительность облучения не более 1 ч) и острое облучение в дозах менее 100 мГр могут рассматриваться как малые [27, 41].

Категория малой МД в 0,1 мГр/мин теоретически основана на отсутствии опухолеобразования у облученных животных и, по мнению [8], во многом условна (более обоснованной является МД по критерию репарации ДНК: к моменту второго поражения клетки-мишени она должна полностью восстановиться от последствий первого поражения, что соответствует 10^{-3} мГр/мин [2–4, 42, 16].

Таким образом, широко используемый термин «малые дозы» на самом деле мало интересен с точки зрения фармакологической защиты. Необходимо, повидимому, признать предел искомого диапазона непоражающих доз в 1 Гр, а соответствующий задаче радиационной защиты – от значений 0,1 – 1 Гр и выше, так как при превышении нижней границы возможны значимые детерминированные и стохастические эффекты, а ограничение верхней границы – это уровень высокой вероятности развития

детерминированных эффектов (поражений) [43]. При дозах ниже 0,1 Гр сомнительна роль (причинность) радиационного фактора в генезе стохастических эффектов [8], отсутствует доказанная радиационно-индуцированная нестабильность генома (РИНГ) [44].

Таким образом, обозначив границы доз, мы можем понятие «непоражающие дозы» (в рамках настоящего обзора) отождествить с термином и «средние дозы», но вынужденно при цитировании источников употреблять оригинальные обороты (термины), приводимые авторами, хотя в ряде случаев и не соответствующие приведенной общепризнанной систематике.

Сценарии и ситуации облучения, соотношение аспектов применения ПЛС с основами радиационной безопасности (РБ)

На рис. 1 приведено представление диапазонов доз, от облучения в которых следует ожидать декретированные стохастические (линия 1) и/или детерминированные (линия 2) эффекты [45]. Не станем по понятным соображениям рассматривать условия, обозначенные на рисунке зоной III (она же область «не обнаруживаемых стохастических эффектов», здесь место и «очень малых доз» [8]). В настоящее время дозы облучения персонала и населения, обусловленные нормальной эксплуатацией источников излучения, лежат именно в этой области и продолжают уменьшаться по мере совершенствования радиационных технологий. Вопрос о медикаментозной поддержке для этих условий, очевидно, не имеет смысла.

Однако интерес представляют диапазон II и, прежде всего, его часть близ границы с диапазоном I. На схеме эти дозы обозначены замкнутой линией-маркером. Согласно [8] это средние дозы. Более высокие дозы (зона I на рис. 1) находятся вне рамок предмета настоящего анализа, здесь детерминированные эффекты становятся явными и подпадают под определения радиационных поражений [46–49].

Целесообразно рассматривать возможность облучения человека, в связи с событием и ситуацией (и соответственно, с источниками). В отличие от системы радиационной безопасности (РБ) [50], в нашем случае необходимость детализировать группу физических источников излучения вызвана лишь постольку, поскольку это определяет дозу, мощность дозы, фракционирование и длительность облучения (время пребывания в условиях облучения), что будет обсуждено ниже.

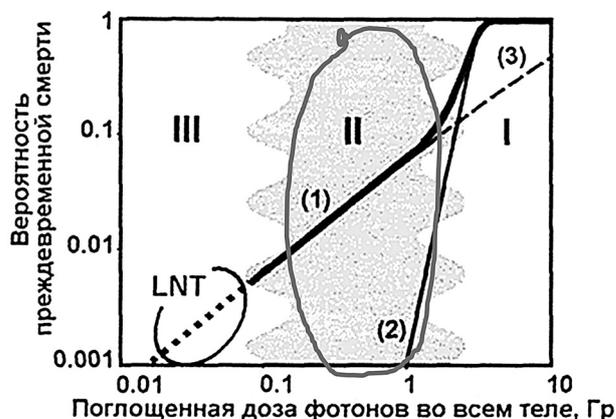


Рис. 1. Эффекты и дозы в радиационной защите и безопасности. Риск преждевременной смерти как функция дозы облучения всего тела (объяснения в тексте). Цит. по [45].
Fig. 1. Effects and doses in radiation protection and safety. Risk of premature death as a function of whole body radiation dose (see text for explanation). Cit. according to [45]

Так, требованиями отечественных документов [29, 51] предусмотрены 2 группы ситуаций облучения, отличающихся уровнями доз, смысловым наполнением дозиметрических величин и типом последствий, соответствующих вышеуказанным диапазонам доз (рис. 2, табл.1).

Речь идет об осуществлении практической деятельности в контролируемых условиях и в случае выхода источника ионизирующего излучения из-под контроля, т.е. в случае радиационной аварии [51]. Контролируемые условия, согласно [29], включают, в частности, и планируемое повышенное облучение (ППО) при предотвращении развития аварии или ликвидации ее последствий (ЛПА). Это весьма редкие, но все-таки возможные события.

При этой ситуации медикаментозная поддержка может быть ориентирована на компенсацию ущерба, который невозможно снизить с помощью вмешательства, то есть влияния на существующую цепь событий, приводящих к облучению. Медикаментозная поддержка не противоречит цели вмешательства – предотвращению детерминированных эффектов, так как должна ослабить повреждения в клетках, приводящих и к стохастическим отдаленным эффектам, и к тканевым реакциям как без клинически значимых последствий (в доклинической форме), так и с таковыми.

Планируемое облучение при ЛПА можно рассматривать как послеаварийное событие (вынужденное пребывание в зоне радиоактивного загрязнения) при надлежащей оценке радиационной обстановки. Здесь, повидимому, возможно и нужно применение средств фармакологической профилактики, ориентированной на эффекты средних доз при различном по длительности облучении (от однократного до относительно протяженного, включая фракционированное).

В ситуации аварии наряду с непосредственно обслуживающим установку персоналом, вовлекаются значительные группы персонала смежных с аварийным помещением, лица, находящиеся поблизости в ближайшие сроки или проживающие в зонах газоаэрозольных вы-

бросов различной интенсивности, а также привлеченные для ликвидации последствий аварии. Ситуация усложняется массовостью, наличием среди участников группы лиц, не имеющих элементарных сведений о характере происшествия, необходимостью привлечения к противоаварийным мероприятиям непрофильных учреждений, трудностями материально-технического обеспечения работ, сложностью срочного выделения малого числа реально облученных и пострадавших среди огромного числа вовлеченных (отношение 1:10, 1:100 и 1:1000) [52], что не может не влиять на принятие решения о медикаментозной поддержке.

Возникает вопрос: на какой объем эффектов (ожидаемых последствий облучения) теоретически ориентирована эффективность медикаментозной поддержки? В части стохастических отдаленных последствий это выглядит так: на какое количество случаев дополнительного рака и наследственных эффектов в соответствии с расчетными коэффициентами, принятыми Публикацией МКРЗ 103 и действующими в России НРБ-99/2009?

Если воспользоваться линейной беспороговой концепцией (ЛБК) выхода отдаленных последствий, то в ситуации планируемого повышенного облучения (ППО, до 200 мЗв в год), то есть при потенциально опасном облучении [29], расчетный объем стохастических эффектов как возможного предмета модификации противолучевыми средствами может составить до 8 случаев рака на 1000 участников ЛПА (до 1 %).

В ситуации аварийного облучения в дозе до 1 Гр (доза декретирована как требующая вмешательства по развитию ОЛБ) расчет стохастических последствий соответствует до ~40 случаев рака на 1000 пострадавших (около 4 %). Можно ожидать тканевые реакции (детерминированные эффекты в доклинической форме): до единиц процентов с начальными проявлениями лучевых реакций или признаками ОЛБ легкой степени, включая первичную реакцию на облучение, психогенные расстройства, возможно и другие.

При этом следует иметь в виду, что в диапазоне доз около 0,2–0,5 Зв математические модели ЛБК для расчетов, достаточно произвольные, в последние годы явились предметом дискуссий [53]. А дозовая область хронического низкоуровневого облучения, в рамках которой как бы имеется некий порог индукции стохастических эффектов облучения, находится в пределах 0,2–0,5 Зв [54, 55].

Полученные расчеты скорее всего отражают завышенные радиационных рисков в области малых доз, которое вытекает из ЛБК: как острого облучения (100–200 мГр), так и пролонгированного – в пределах 2–3 порядков сверх фонового облучения [56] (по данным [57] часть участников ЛПА на ЧАЭС, хотя и относительно небольшая, получила дозы, превышавшие 250 мГр, данные о дополнительных раках и лейкозах по этой когорте описаны в литературе).



Рис.2. Соотношение ситуаций облучения и направленности индивидуального дозиметрического контроля при них [51]
Fig. 2. Correlation between exposure situations and the direction of individual dosimetric control during them [51]

Таблица 1

Ситуации облучения и интегральные ожидаемые эффекты неповреждающих доз [5–7, 29]
Exposure situations and integral expected effects of non-damaging doses

Диапазон доз	Ситуации облучения	Ожидаемые последствия
До 0,2 Зв нормируемой величины индивидуальной эквивалентной или эффективной дозы	Контролируемое планируемое повышенное при предотвращении развития аварии; при ЛПА	Непревышение уровня индивидуального пожизненного риска стохастических отдаленных последствий соответственно пределам доз для ситуации
До 1 Гр поглощенной дозы	То же при выходе облучения из под контроля	Возможность развития клинически не значимых проявлений тканевых реакций, повышенный риск стохастических отдаленных последствий (в ВС РФ – клинически значимые эффекты от 0,5 Гр)

Применительно к авариям уместно отметить, что типы эффектов не имеют резкого разграничения (на приведенной схеме рис.1 – зубчатая граница), так как с ростом поглощенной дозы для каждой клетки-мишени вероятность рака как стохастического эффекта увеличивается до уровня, при котором клетка не выдерживает повреждения и гибнет, то есть формируется эффект детерминированный [5].

Таким образом, формально медикаментозная поддержка может быть ориентирована на предотвращение развития смертельного рака (как основного феномена стохастических эффектов) у не более 1–4 % участников событий (даже меньше) при условии получения названных доз, а также на предотвращение тканевых реакций.

Следует отметить, что в соответствии с [29] планируемое повышенное облучение рассматривается в дозе, накопленной в течение года (с момента начала ППО), что играет важную роль в уточнении медико-тактических требований к применению средств медикаментозной поддержки.

Вопрос о сценариях будет не полон, если не учесть долю пострадавших при авариях, не вошедших в отчетность по категории «количество лиц с клинически значимыми последствиями в виде ОЛБ I–IV степени тяжести».

Так, в статьях [58,59] приводятся данные, например, по авариям на АПЛ: из 133 моряков 48 чел. не имели такого «диагноза». Что было установлено при диагностике и как квалифицирован статус пострадавших? Обнаружили бы эффективность «классические радиопротекторы», будь они применены по правилам, но при дозах, не приведших к острому поражению?

По данным [60], уже в первые сутки аварии на ЧАЭС на месте была отобрана группа лиц, нуждающихся в специализированном исследовании и лечении. Всего было обследовано для свыше 3 тыс чел., с подозрением на ОЛБ направлено в стационар 350 чел. Как известно, диагноз ОЛБ был поставлен меньшему количеству пострадавших – 134. Чем же характеризовались остальные участники события? Данные в публикациях не встретились.

Радиационные эффекты как объект фармакологической модификации

Как отмечено в [8], диапазон непоражающих (средних) доз эклектичен по эффектам: стимулирующим и повреждающим, стохастическим и детерминированным, причем на всех уровнях. Авторами предложено подразделить этот диапазон доз на два поддиапазона: 0,1–0,5 Гр и 0,5–1 Гр.

Для первого поддиапазона ни стохастические, ни детерминированные эффекты не выражены особенно отчетливо, тем более, что наиболее реальный порог для радиационно-индуцированной нестабильности генома (основного молекулярного механизма индукции стохастических эффектов) находится в районе 0,5 Гр [1–4, 61]. По мере приближения к нижней границе диапазона средних доз (0,1 Гр) прямые мишенные эффекты облучения все менее рассматриваются в качестве механизма индукции мутаций в онкогенах и генах-супрессорах, поскольку слишком мала вероятность поражения нужной мишени квантом излучения. Равным образом не рассматривается и возможность косвенного эффекта облучения. Отсутствует при дозах около 0,1 Гр и механизм, связанный с немисшенным эффектом (нестабильностью генома, РИНГ) [1–4, 35].

В то же время для поддиапазона 0,5–1 Гр все последствия регистрируются более четко. В общем среди радиобиологических эффектов отмечают отчетливые проявления повреждений и прекращение проявлений адаптации и стимуляции [2, 3, 10, 17, 33, 35, 36, 40, 46, 47, 61–68]. При этом важна роль активных форм кислорода в генезе РИНГ [69]. Так, формируется хронический

лучевой синдром, начало проявления признаков которого наблюдается начиная с дозы в 0,7 Гр [70]. Среди детерминированных эффектов отмечают супрессию в системе кроветворения [8, 23, 46–49, 70], изменения в сердечно-сосудистой системе [109]. Важным моментом, свидетельствующим о различиях в генезе повреждений в диапазоне больших (поражающих) и средних (непоражающих) доз, является практически отсутствующий эффект радиопротекторов («классических») во втором случае [47, 71].

Рассмотрим более подробно названные феномены.

Клинические и субклинические эффекты при остром (кратковременном) облучении

Донозологические изменения состояния здоровья, по мнению авторов [10], при облучении в дозах 0,25–0,5 Гр отождествляют с так называемым «чернобыльским синдромом», из-за наличия дополнительных нелучевых факторов сопровождавшегося заметными изменениями иммунного статуса и гематологических показателей, наподобие легкой ОЛБ, что было названо «лучевыми реакциями».

При ЛПА на ЧАЭС у лиц, получивших суммарные дозы 0,05–0,35 Гр, наблюдали проявления астено-вегетативного синдрома (общая слабость, усталость, нарушения сна, снижение аппетита и др.), а также обострения имевшихся заболеваний и изменения лабораторных гематологических показателей (транзиторные отклонения от нормы) [10]. Среди субклинических проявлений называют и нестойкую лейкопению, разнонаправленные изменения эндокринной системы, изменения иммунологических показателей [72] и др.

У участников ЛПА на ЧАЭС однократное γ - β -облучение в дозах порядка 0,1–0,9 Гр вызывало снижение уровня эритроцитов и гемоглобина на 40-е сутки, а у участников испытаний ядерного оружия на Новоземельском полигоне при дозах более 0,4 Гр возникала относительно длительная (с 15 по 30 сутки) тромбоцитопения [73]. Однако есть проблемы с достоверностью: по мнению [74], большинство этих параметров в доварийный период у пациентов не исследовали, и они не имеют адекватного возрастного и динамического контроля.

Детерминированные эффекты возникают после гибели критического числа функциональных клеток в органах и тканях. В источниках [33 и др.] приведены пороговые дозы для возникновения эффектов, в частности: рвоты и временного угнетения кроветворения (острое облучение) – 0,5 Гр, временной олигоспермии (острое облучение) – 0,15–0,5 Гр.

Порогом ОЛБ легкой степени принято считать дозу 1 Гр [29]. Строго говоря, такая поглощенная доза является лишь нормативом для соблюдения «дисциплины безопасности» в системе радиационной защиты. Ввиду гетерогенности популяции человека вероятность возникновения ОЛБ I степени при остром облучении в данной дозе не равна единице, как и не равна нулю, вероятность численно приближается к 0,5. И лишь с дальнейшим ростом дозы вероятность острой лучевой болезни равна единице, при этом событием является категория «ОЛБ I степени и тяжелее». Истинным порогом острого эффекта приблизительно является доза 0,5 Гр (табл.1).

Клинические и субклинические отсроченные эффекты при пролонгированном (хроническом) облучении

В контексте отсроченных эффектов прежде всего следует рассматривать результаты многолетних наблюдений за переоблученным населением Уральского региона, подвергшегося хроническому радиационному воздействию

в широком диапазоне доз (бассейн реки Течи и Восточно-Уральский радиоактивный след, ВУРС). Значительная неоднородность облучения позволила выделить группы людей, подвергшихся преимущественно внешнему и внутреннему облучению [76]. Для радиационной ситуации в бассейне р.Течи дозы на костный мозг и на поверхности костей (за счет инкорпорированных радиоизотопов стронция) составили для основных жителей, облучившихся в период максимальных сбросов, 0,2–0,5 Гр. У лиц без диагноза хронической лучевой болезни (ХЛБ) ориентировочная оценка доз не превышала 200 мЗв (в среднем около 30 мЗв). У этой когорты контакт с источником излучения был менее 3 лет, отмечены доклинические эффекты [76].

Уже в ранние сроки после начала облучения (в 1951 г.), в частности, у обследуемых отмечены быстрая утомляемость, общая слабость, бессонница, головная боль и головокружение, ослабление памяти, боли в костях, желудке, кишечнике, тошнота. Констатировали поражение кроветворения (лейкопения и тромбоцитопения), повышение проницаемости сосудов и астенический синдром, что у части облученных лиц позволило установить диагноз ХЛБ. Гематологический синдром являлся ведущим для обоснования диагноза (порог пролонгированного облучения, приводящий к видимому подавлению гемопоэза, оценивался как 0,4 Гр). У 63,3 % с диагнозом ХЛБ дозы на красный костный мозг составили менее 0,5 Гр.

Значительно чаще, чем хроническая лучевая болезнь или клинически значимые изменения, у жителей прибрежных сел в первые годы после начала облучения выявлялись изменения со стороны отдельных органов и систем. Отмечались статистически значимые отличия от необлученных людей по некоторым параметрам, характеризующим состояние кроветворения, иммунитета, нервной и костной систем. Изменения, как правило, находились в пределах физиологических колебаний конкретных параметров.

Первые медицинские осмотры жителей прибрежных сел, проведенные в 1951 г. и 1952 г., позволили выявить объективные изменения в состоянии здоровья жителей прибрежных сел. У жителей верховья реки (дозы внешнего гамма-облучения до 1 Зв/год) отмечены лучевые реакции. В периферической крови наиболее часто отмечалось снижение числа лейкоцитов, нейтрофилов со сдвигом лейкоцитарной формулы влево и тромбоцитов. Реже отмечали анемию и лимфопению как правило транзиторного характера. Пороговая мощность эквивалентной дозы на красный костный мозг (ККМ), вызывающая устойчивое снижение числа лейкоцитов и тромбоцитов в периферической; крови, составила около 400–500 мЗв/год [76]. Это согласуется с положениями Публикации МКРЗ [93] о пороге мощности дозы для подавления гемопоэза, составляющем 40 сЗв/год (здесь и далее дозиметрические единицы цитируем по источнику) при протяженном или сильно фракционном облучении за много лет.

В первые годы после начала облучения изменения показателей иммунной системы у части жителей возникали достаточно рано, через 2–4 года отмечались признаки снижения антиинфекционной резистентности и аллергической перестройки организма [77].

При изучении иммунологической реактивности организма облученных людей (средняя накопленная доза за 6 лет на ККМ 85 сЗв, диапазон доз от 35,0 до 145,0 сЗв) было выявлено выраженное подавление барьерных антимикробных функций кожи и слизистых, понижение фагоцитарной активности нейтрофилов, угнетение способности продуцировать антитела после вакцинации. Снижение содержания лизоцима в слюне у этих людей

было выражено так же сильно, как у больных хронической лучевой болезнью [61, 77]. Пороговая доза облучения ККМ, вызывавшая угнетение иммунитета (по критерию аутомикрофлоры кожи), оценена как 30–40 сЗв/год в условиях многолетнего облучения. Следует отметить, что лабораторные изменения иммунитета отмечались и у практически здоровых людей, подвергшихся радиационному воздействию.

У жителей прибрежных сел реки Течи в первые годы в ряде случаев выявлялись преимущественно, функциональные сдвиги в состоянии нервной системы. Увеличилась численность лиц, предъявляющих жалобы на головную боль, головокружение, повышенную утомляемость, общую слабость, раздражительность, нарушение сна, боли в костях. Объективные данные и результаты инструментального исследования свидетельствовали о наличии у части обследуемых изменений функции черепно-мозговых нервов, двигательной, чувствительной рефлекторной сфер, вегетативной системы. Сочетание определенных жалоб и объективных симптомов позволило выделить четыре неспецифических неврологических синдрома: вегетативной дисфункции, астенического, остеоалгического, органического поражения нервной системы.

Анализ динамики неврологических изменений у людей, подвергшихся хроническому радиационному воздействию, показал, что сначала появлялись признаки вегетативной дисфункции (неустойчивость артериального давления и частоты пульса, изменение кожно-сосудистых реакций и функции потовых желез, сдвиги желудочной секреции и др.), к которым в дальнейшем присоединялись признаки астенического состояния. Наиболее ранними реакциями нервной системы были нарушение функции обонятельного и вкусового анализаторов, изменение биоэлектрической деятельности коры головного мозга, возникновение патологических кожно-сосудистых реакций и снижение вибрационной чувствительности [77–79].

После аварии на ЧАЭС производились оценки функционального состояния жителей загрязненных территорий. Так, в Гомельской области у 30–40 % обследованных жителей наблюдалось снижение работоспособности и адаптационных возможностей организма, у 51 % обследуемых отмечено снижение уровня гемоглобина ниже 110 г/л (что наряду с некоторым увеличением числа ретикулоцитов может свидетельствовать о незначительном раздражении красного ростка костного мозга), установлены существенные сдвиги в клеточном и гуморальном звене иммунного ответа, снижение активности практически всех показателей неспецифической резистентности [80].

По данным [81], при оценке клеточного и гуморального иммунитета у участников ЛПА (суммарная доза 25–30 бэр, наблюдение до 5 лет) не установлено достоверных изменений количественного состава и формулы клеток периферической крови, за исключением фракции больших гранулоцитарных лимфоцитов (БГЛ). Сразу после облучения содержание БГЛ снизилось более чем в 3 раза, отмечались нарушения их ультраструктуры, снижение титра антител сыворотки крови к бактериальным антигенам, что сохранялось в течение года. Спустя 5 лет после аварии большинство показателей клеточного и гуморального иммунитета не отличалось от нормальных значений. Вместе с тем, сохранялась тенденция к повышению пролиферативной активности лимфоцитов, отмечено снижение титра антител к раково-эмбриональным антигенам.

Сходные данные приводят авторы по уровню заболеваемости ОРВИ и частоте вирусносительства у лиц, подвергшихся в прошлом действию ионизирующих излучений в малых дозах [82], по выявлению нарушения в метаболизме железа и диспротеинемии (по составу бел-

ков острой фазы), высокому уровню циркулирующих иммунных комплексов, существенно сниженным показателям антиоксидантной активности сыворотки крови [81].

Авторы [83] приводят данные о действии излучения в малых дозах на систему иммунитета человека, касающиеся двух групп: а) участников ЛПА на ЧАЭС, дозы 0,1–0,5 Гр: установлено снижение переваривающей способности фагоцитов, бактерицидной активности сыворотки крови и комплемента (альтернативный путь активации); содержание лимфоцитов колеблется, наблюдается изменение удельного веса отдельных фракций, увеличение коэффициента СД4/СД8; концентрация иммуноглобулинов крови снижается, а затем увеличивается; данные о заболеваемости инфекциями крайне противоречивы; б) населения, проживающего на территориях, загрязненных радионуклидами (15–40 Ки/км²): выявлено нарушение иммунологических показателей, колебание фагоцитарной реакции с увеличением ее активности в отдаленные сроки, снижение уровня лизоцима, увеличение и в дальнейшем снижение концентрации IgG и IgM в сыворотке крови, появление патологических субстанций (Р- и С-реактивного белка), увеличение NK-киллеров на фоне снижения СД8+ лимфоцитов по сравнению с «чистыми» населенными пунктами; среди населения зафиксировано повышение случаев инфекционной заболеваемости, а также аллергозов. Делается вывод о том, что изменения показателей иммунитета после воздействия на людей излучения в малых дозах, выраженные слабо, отличались нестабильностью и волнообразностью течения; в некоторых случаях отмечен эффект гормезиса.

Опыт ЛПА на ЧАЭС в течение периода около двух месяцев после облучения показал, что лучевой фактор играет весьма существенную роль в генезе ранних иммунологических проявлений «чернобыльского» или «постчернобыльского синдрома». Вместе с тем, ведущая роль в формировании такого синдрома принадлежит нерadiационным факторам (дозы до 30 сГр), а облучение рассматривается как дополнительное условие развития общесоматических заболеваний наряду с социальными и психологическими факторами [84].

У летчиков, участвовавших в ЛПА на ЧАЭС (дозы от 5 до 50 сГр), отмечены колебания в показателях крови, более заметные через 2–3 года с нормализацией к 4–5 году (адаптация и репарация) [85].

Соответствующие результаты [86] получены в эксперименте (протяженное облучение в течение 6 мес в дозе ~0,2–0,3 видовой ЛД_{50/30}, крысы): наблюдали снижение адгезивной способности лейкоцитов, что связывают со специфическими нарушениями клеточных мембран иммунных клеток.

Отсроченные последствия у участников ЛПА на ЧАЭС

Общеизвестны (по крайней мере в нашей стране) события, когда в ходе ЛПА ввиду особых обстоятельств выхода за рамки контролируемого процесса облучения участники подвергались облучению с различной длительностью в том числе или преимущественно в средних дозах. Преобладающим по длительности периодом облучения в 1986–89 гг., как известно, был период до 2 мес.

Неспецифические соматические последствия, по данным [108], наблюдали спустя месяцы после контролируемого облучения при ЛПА на ЧАЭС. У участников работ обнаруживался симптомокомплекс усталости, утомляемости, нарушения сна, головных болей, диспептических расстройств, обострения имевшихся хронических соматических заболеваний. Отмечены транзиторные изменения гематологических показателей и иммунного статуса

(проходящая цитопения, снижение количества естественных клеток-киллеров в периферической крови, изменение ферментативной активности и структуры лейкоцитов).

По данным [87], показатели заболеваемости среди ликвидаторов превышали таковые для населения России (по основным классам болезней и значимо при эффективных дозах более 20 сЗв). Клинические данные об изменениях в основных регуляторных системах организма после облучения в дозах, не вызывающих острую или хроническую лучевую болезнь, указывали на то, что функциональные изменения деятельности основных физиологических систем чаще всего характеризовались как полисиндромные. Это проявлялось в первичных функциональных отклонениях на уровне многих физиологических систем организма, развитии донозологических состояний. В структуре неврологической заболеваемости особое место занимали синдром вегетативной дистонии (стойкие и выраженные нарушения выявлены при дозах 25 – 50 сГр). Однако рост заболеваний объяснялся и тем, что уровень, полнота и качество диспансеризации ликвидаторов значительно отличался от общероссийской практики.

По данным [88], радиобиологические последствия аварии на ЧАЭС, установленные в короткие сроки на уровне преморбидных и морбидных состояний, подтверждаются и через длительное время, а также подтверждаются молекулярно-биологическими методами. Через 20 и более лет после аварии в крови ликвидаторов частота встречаемости лимфоцитов с абберациями хромосом или микроядрами (МЯ) не увеличена, но в спектре аббераций хромосом достоверно выше частота аббераций хромосомного типа. В ДНК лимфоцитов ликвидаторов существенно возрастает количество двунитевых разрывов ДНК и существенно повышена концентрация активных форм кислорода. Делаются выводы о нестабильности генома, возникшей в стволовых клетках во время облучения, что проявляется в виде повреждений генетического аппарата через весьма длительные сроки после аварии; о возникновении популяции клеток, более чувствительных к дополнительным воздействиям и с пониженной способностью к адаптивному ответу.

Отдаленные стохастические эффекты

Рассмотрим вопрос лишь в общих чертах, так как это – самостоятельная проблема. Среди стохастических эффектов острого и хронического облучения в средних дозах – увеличение частоты раков и лейкозов [3, 4, 8, 17, 46, 47]. У участников ЛПА на ЧАЭС в 1986–88 гг., получивших (цитируем) «высокие дозы облучения» обнаружены «повышенные уровни заболевания лейкозом; статистически значимое увеличение на 18 % заболеваемости всеми типами солидных раков» (цит. по [89]).

Вместе с тем, нельзя не отметить, что у большинства участников ЛПА были ограничения по суммарной поглощенной дозе в 25 бэр, обнаружить при таком уровне доз эффекты (в следовательно, и эффекты возможной защиты) практически невозможно (требуются значительные выборки цитогенетических показателей, чего не было) [90].

Влияние на радиационные эффекты дополнительных факторов труда и среды обитания

Нерадиологический ущерб от психогенных последствий

Подобный ущерб проиллюстрируем цитатой: «Само понятие «малые дозы» является неоднозначным и критерии его определены недостаточно четко... Отсутствие единства в определении основного понятия, которое ис-

пользуют специалисты, обосновывая свои выводы о ничтожности радиационного воздействия, для большинства населения уже само может стать основой психологического стресса и тревожных интерпретаций пострадавшими» (цит. по [8, 34, 36]).

Реальный ущерб для жизни и здоровья людей, оказавшихся в ареале радиоактивных осадков Чернобыля, вышел далеко за рамки радиологического ущерба от этой катастрофы [53, 91]. Гиперболизация вреда вызвала с точки зрения радиологии ничем не обоснованные массовые переселения людей, социально-психологические, стрессовые ситуации и другие отрицательные последствия. Так было и на Южном Урале у жителей сел бассейна р.Течи, когда в большинстве случаев неврологические изменения были связаны не столько с облучением, сколько с ситуационно обусловленным психологическим стрессом в связи со сложившейся радиационной обстановкой, переселением, нарушением привычного образа жизни, связанного с введением санитарно-охранного режима [76].

В реальной жизни с комбинацией ионизирующего излучения и психотравмирующих факторов, обусловленной работой на радиоактивно загрязненной местности, недостаточной квалификацией врачей в области радиобиологии, профессиональными и бытовыми вредностями, сопутствующими заболеваниями а также радиофобией и эгоистически-рентными установками происходил и происходит рост психоневрологических нарушений, что требует профилактики и реабилитационных мероприятий для ликвидаторов [92].

Так, отмечено, что плановая работа персонала с источниками ИИ в течение года (дозы порядка 2,5 мЗв/год), не вызывая роста соматической патологии у персонала, сопровождалась изменениями функционального состояния организма: повышенной утомляемостью, головной болью, раздражительностью, нарушением сна, появлением тревожности, снижением активности ЦНС и устойчивости сердечно-сосудистой системы к физической нагрузке, угнетением клеточных и гуморальных факторов неспецифической защиты. Рассматривается ведущая роль длительного психоэмоционального напряжения в генезе таких изменений [75].

Спустя 5–6 лет после работ на ЧАЭС у участников ЛПА повышалась частота заболеваний нервной системы, органов кровообращения, дыхания и пищеварения. Все это происходило на фоне отсутствия роста лейкозов и солидных раков (кроме опухолей щитовидной железы). Решающую роль в возрастании частоты соматических последствий могли сыграть и дополнительные нелучевые факторы – социальные и психологические (психоэмоциональный и ситуационный стресс), химические (испарение материалов, заброшенных в реактор для его подавления). Впрочем, не исключена и роль повышенной информативности диагностики у специфического контингента ликвидаторов по сравнению с диагностикой у других когорт [108].

Синергизм

Следует отметить радиофобию, как вполне реальный феномен, который связывают с радиационными авариями, испытанием ядерного оружия и даже эксплуатацией АЭС, отмечая, что эффекты радиофобии и ионизирующей радиации могут взаимодействовать синергически [40].

Дополнительное воздействие нерадиационных факторов понижает порог дозы, вызывающей ХЛБ (0,5 Гр согласно [93]). Так, например, у жителей прибрежных сел р.Течи имевшиеся заболевания (паразитарные инвазии, бруцеллез, туберкулез, малярия) могли модифицировать порог дозы. Эти же факторы становились причи-

ной ошибок в установлении диагноза ХЛБ ввиду сходства симптоматики и затруднений при осуществлении дифференциальной диагностики [76].

В эксперименте показано, что у животных, подвергшихся сочетанному воздействию гамма-облучения в дозе около видовой $LD_{25/30}$ и эмоционального стресса наблюдали торможение пострадиационного восстановления костномозгового кровотока. Выявлена возможность коррекции феномена применением феназепамы и афобазола [94, 95]. Отмечено повышение уровней ППОЛ при комбинации облучения в малых дозах и иммобилизационного стресса [96]. Показано нарушение развития адаптационных реакций на эмоциональный стресс в системе крови и ее компенсаторных возможностей у крыс, облученных в дозе 0,9 Гр [97]. Отмечено усиление фагоцитарных функций альвеолярных макрофагов при комбинации облучения в дозе 1 Гр (крысы) и иммобилизационного стресса [98].

Известно, что на канцерогенность ионизирующего излучения в малых дозах указывают и результаты оценки комбинированного действия радона и курения. У шахтеров урановых рудников доза облучения легких не превышает 0,02 Зв в год и сама по себе мало влияет на заболеваемость раком легких. Однако у курящих шахтеров заболеваемость раком легких значительно больше, чем в необлученной курящей группе сравнения [99].

Согласно [7], в числе агентов и факторов, усиливающих радиационные ответы – цитотоксические агенты (антиметаболиты, алкилирующие агенты); антиангиогенные препараты; антибиотики; сопутствующие заболевания. В эксперименте на крысах стрессорное воздействие (эмоциогенный фактор) после хронического гамма-облучения в видовой дозе $\sim 0,15-0,2 LD_{50/30}$ приводило к напряжению симпат-адреналовой системы в ранние и отдаленные сроки [100].

Следует отметить и особенности радиобиологических эффектов при облучении в космосе, где реальна реакция организма на комбинированное воздействие, включая микрогравитацию, хронический стресс, гипомагнитную среду, специфическую среду обитания [101].

Перечень агентов, усиливающих радиационные эффекты, может быть расширен за счет производственных факторов (например, на предприятиях судостроения и судоремонта при утилизации АПЛ, судов с ЯЭУ, кондиционировании и утилизации радиоактивных отходов и др.) [102–106] и нелучевых факторов радиационной аварии [60].

У участников ЛПА на ЧАЭС кроме излучений актуальными факторами являлись курение, хроническая алкогольная интоксикация, несбалансированное питание, низкая физическая активность, хронический поставарийный стресс, нерациональный режим труда и отдыха [107].

Основываясь на молекулярных и клеточных механизмах злокачественного роста, можно полагать, что независимо от специфики первичных механизмов инициирования теми или иными индукторами опухолевого процесса на молекулярно-клеточном уровне, конечный результат в виде экспрессии измененных злокачественных клеток принципиально не зависит от специфики канцерогенных или мутагенных факторов, его спровоцировавшего. Подтверждением этому служит, в частности, тот факт, что все виды раков, вызванных излучением, биохимически, иммунологически и гистологически неотличимы от раков, возникающих вследствие других причин [53].

Заключение

Итоги анализа литературы показывают, что на данном этапе рассмотрения вопроса и в соответствии с задачей сообщения №1 фармакологическая поддержка (приме-

нение ПЛС) в условиях кратковременных и протяженных облучений с низкой мощностью дозы и в диапазоне доз 0,2–1 Гр представляется **необходимой**. Основанием для такого вывода является возможность облучения, настроенность требований системы радиационной безопасности на консерватизм и ограничение доз, реальность детерминированных эффектов при превышении пределов доз (отчасти преморбидного или доклинического уровня, с выраженными психогенными реакциями – компонентами итогового состояния). Не исключены и случаи симптомокомплекса острых лучевых поражений легкой степени с симптоматикой, требующей коррекции в ранние сроки. Фатальные последствия не ожидаются. Возможны

стохастические эффекты сверх спонтанных, хотя, по приближенным оценкам, частота их незначительна.

Убедительно значение нерадиогенных эффектов при воздействии ионизирующих излучений, в основном как последствий психоэмоционального стресса. Это позволяет предполагать, что целевое применение противолучевых средств участниками ЛПА может рассматриваться как фактор, обеспечивающий не только радиомодифицирующий эффект (что, собственно требует специальной оценки), но и «нерадиологический эффект» (психогенный).

Вопрос о **возможности** применения ПЛС – предмет дальнейшего анализа.

Discussion

Medical Radiology and Radiation Safety. 2021. Vol. 66. № 4. P. 89–100

To the Question About Pharmacological Protection During Irradiation in Non-infecting Doses: Maybe, Necessary?

Part 1.

General Overview of Medical-tactical and Phenomenological Aspects

A.V. Ivanchenko¹, V.A. Basharin², I.S. Drachev¹, A.B. Seleznev¹, A.Yu. Bushmanov³

¹Scientific Research Testing Institute of Military Medicine, St. Petersburg, Russia.

²S.M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia.

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

Contact person: Alexander Viktorovich Ivanchenko, ivanchenko2@yandex.ru

ABSTRACT

Purpose: Review of modern concepts of the biological effect of ionizing radiation in medium doses on a living organism and the consequences of radiation in order to assess the need for the use of drugs suitable for the purpose of modifying the effects; stimulation of discussion on the issue under consideration.

Results: The conditions of origin and the list of possible radiation effects from irradiation at medium doses of the 0.1–1 Gy range were assessed, the scale and phenomenology of the consequences were assessed as a subject of modification by antiradiation agents.

Conclusions: Pharmacological support (use of PLC) under conditions of short-term and prolonged irradiation with a low dose rate and in the dose range of 0.2–1 Gy seems to be necessary due to the reality of deterministic effects when the dose limits are exceeded (partly at the premorbid or preclinical level, with pronounced psychogenic reactions – components of the final state), as well as with the possibility of stochastic effects in excess of spontaneous ones, although, according to approximate estimates, with an insignificant frequency.

Key words: irradiation, average doses, antiradiation agents, disputable use

For citation: Ivanchenko A.V., Basharin V.A., Drachev I.S., Seleznev A.B., Bushmanov A.Yu. To the Question About Pharmacological Protection During Irradiation in Non-infecting Doses: Maybe, Necessary? Part 1. General Overview of Medical-Tactical and Phenomenological Aspects. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):89-100.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-89-100

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котеров А.Н. Заклинания о нестабильности генома после облучения в малых дозах. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2004. Т. 49. №4. С.55–72
2. Котеров А.Н. Малые дозы ионизирующей радиации: подходы к определению диапазона. В кн.: Радиационная медицина. Под ред. Л.А.Ильина. Т.1. М.: ИздАТ, 2004. С.871–925
3. Котеров А.Н. Малые дозы и малые мощности доз ионизирующей радиации: регламентация и реалии XXI века.// Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2009.Т. 54. № 3. С.5–26
4. Котеров А.Н. Малые дозы радиации: факты и мифы. Основные понятия и нестабильность генома. М.: Изд-во ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России, 2010, 283 с. (<http://fmbcfmba.org/default.asp?id=6000>)
5. Рекомендации-2003 Европейского Комитета по радиационному риску. Выявление последствий для здоровья облучения ионизирующей радиацией в малых дозах для целей радиационной защиты. Регламентированное издание. Брюссель. 2003. Перевод с англ. М. 2004
6. Москалев А.А., Шапошников М.В. Генетические механизмы воздействия ионизирующих излучений в малых дозах. – СПб.: Наука, 2009. – 137 с.
7. Публикация 118 МКРЗ. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты. Перевод с англ. Челябинск. 2012. 384 с.
8. Котеров А.Н. От очень малых до очень больших доз радиации: новые данные по установлению диапазонов и их экспериментально-эпидемиологические обоснования // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2013. Т. 58. № 2. С. 5–21.
9. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). Под ред. В.К. Мазурика и М.Ф. Ломанова. М. Физматлит. 2004.
10. Воронцов И.В., Жилиев Е.Г., Карпов В.Н., Ушаков И.Б. Малые радиационные воздействия и здоровье человека (очерки системного анализа). – М.; Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002.- 276 с.
11. Kellerer A.M. 5th Symposium on Microdosimetry.// EUR 5452. Eds J.Booz, H.G.R.Smith. – Luxembourg: Commission of the European Communities, P. 409-442
12. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU, 1983. Microdosimetry, Rep. 36/ – Bethesda:ICRP.
13. Bond V.P., Feinengen L.E., Booz J. What is low dose of radiation?// In./ J. Radiat. Biol., 1988, T. 53, № 1, C. 1–12
14. Booz J., Feinengen L.E. A microdosimetric understanding of low-dose radiation effects. // Int. J. Radiat. Biol., 1988, T. 53, № 1, C. 13–21
15. United Nations. UNSCEAR 1986. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. B. Dose-relationships for radiation-induced cancer. - United Nations, New York, 1986, P. 165-262
16. United Nations. UNSCEAR 1994. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. B. Adaptive responses to radiation in cells and organisms. - United Nations, New York, 1994, P. 185-272
17. United Nations. UNSCEAR 2000. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. G. Biological effects at low radiation doses. – New York, 2000, P. 73-175
18. National Council on Radiation and Measurements. Influence of dose and distribution in time on dose-response relationship for low-LET radiations. 1980. NCRP Report 64. Prepared by NCRP Scientific Committee 40. – Bethesda, Maryland, USA: TCK3ю 1980
19. United Nations. UNSCEAR 2006. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I. Annex. A. Epidemiological studies of radiation and cancer. - United Nations, New York, 2008, P. 17-322
20. Румянцева Г.М., Чинкина О.В., Бежина Л.Н. Радиационные инциденты и психическое здоровье населения. – М.: ФГУ ГНЦ ССП, 2009, 288 с.
21. Румянцева Г.М., Чинкина О.В., Шишков С.Н. Экспертная оценка психических нарушений у лиц, подвергшихся радиационному воздействию повышенного уровня: Руководство для врачей и психологов. – М.: ФГУ ГНЦ ССП, 2011, 260 с.

22. Кудяшева А. Действие малых доз ионизирующего излучения. // Вестник ИБ, 2009, №2. С.2-6
23. Иванов И.В. Исходная реактивность организма и радиационные воздействия в малых дозах. – М.: Изд-во РМАПО, 2010, 272 с.
24. Репин М.В., Репина Л.А. Быстрый анализ дисцентриков в лимфоцитах крови человека после воздействия ионизирующих излучений в малых дозах. // Радиационная биология. Радиоэкология, 2011, №4 (51). С.411-418
25. Beinke C., Neineke V. Highpotential for methodical improvements of FISH-based translocation analysis for retrospective radiation biodosimetry. // Health Phys., 2012, 103, No.2, P.127-132
26. Smith G.M. What is low dose? // J.Radiol. Prot., 2010, 30, No. 1, P. 93-101
27. Wakoford R., Tawn E.J. The meaning of low dose and low dose-rate. // J. Radiol. Prot., 2010, 30, No. 1, P. 1-3
28. Рождественский Л.М. Основы биологического действия ионизирующего излучения (дуальный характер действия радиации на биообъекты). Лекция 1. ФМБЦ им. А.И.Бурназяна. https://ozlib.com/857156/tehnika/osnovy_biologicheskogo_deystviya_ioniziruyushchego_izlucheniya_dualnyy_harakter_deystviya_radiatsii_bioobek#293
29. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09
30. Терацкий С.А. Критический характер современных концепций и подходов к оценке биологического действия малых доз ионизирующего излучения. // Радиационная биология. Радиоэкология, 1995, №5(35). С.563-571
31. Готлиб В.Я., Пелевина И.И., Конопля Е.Ф. и др. Некоторые аспекты биологического действия малых доз радиации. // Радиобиология, 1991, №3(31). С.318-325
32. Koterov A.N., Biryukov A.P. The possibility of determining of anomalies and pathologies in the offspring of liquidators of Chernobyl accident by non-radiation factors. // Int. J. Low Radiation (Paris), 2011, 8, No. 4, P. 256-312
33. Котеров А.Н., Жаркова Г.П., Бирюков А.П. Тандем радиационной эпидемиологии и радиобиологии для практики радиационной защиты. // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2010, №4(55). С.55-84
34. III Международный симпозиум «Хроническое радиационное воздействие: медицинские-биологические эффекты». // Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2006, №2(51). С.24-30
35. United Nations. UNSCEAR 2012. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Biological mechanism of radiation action at low doses. - United Nations, New York, 2012, 45pp.
36. Tubiana M., Arengo A., Auerbeck D., Masse R. Low-dose risk assessment: comments on the summary of the international workshop. // Radiat. Res., 2007, 167, No. 6, P. 742-744
37. Martin C.J., Sutton D.G., Wright E.G. The radiobiology/radiation protection interface in health-care. // J. Radiat. Prot., 2009, 29, 2A, P. A1-A20.
38. Dauer L.T., Brooks A.L., Hoel D.G. et al. Review and evaluation of updated researches on the health effects associated with low dose ionizing radiation. // Radiat. Prot. Dosim., 2010, No. 2, P. 103-136.
39. Auerbeck D. Does scientific evidence support a change from the LNT model for low-dose radiation risk extrapolation? // Health Phys., 2009, 97, No. 5, P.493-504
40. Петин В.Г., Пронкевич М.Д. Анализ действия малых доз ионизирующего излучения на онкозаболеваемость человека. // Радиация и риск, 2012, 21, №1, С.39-57
41. Muirhead C.R., Cox R., Statler J.W/et al. Estimates of late radiation risks to the UK population. // Doc. NRRP, 1993, 4, P.13-157
42. United Nations. UNSCEAR 2000. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. F. Influence of dose and dose rate on stochastic effects of radiation. - New York, 1993, P. 619-727
43. BEIR VII Report 2006. Phase 2. Health Risks from Exposure to Low Levels Ionizing Radiation. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels Ionizing Radiation, National Research Council. <http://www.nap.edu/catalog/11340.html>
44. Котеров А.Н. Радиационно индуцированная нестабильность генома при действии малых доз радиации в научных публикациях и в документах международных организаций. Мед. радиология и радиац. безопасность. 2009, №4(54), С.5- 13
45. Кутыков В.А. Величины в радиационной защите и безопасности. Научно-информационный журнал по радиационной безопасности АНРИ (Аппаратура и новости радиационных измерений). №3 (50), 2007, С.2-25
46. Цыб А.Ф., Будагов Р.С., Замулаева И.А. и соавт. Радиация и патология: Учебн. Пособие. Под ред. А.Ф.Цыба. - М.: Высш. шк., 2005, 341 с.
47. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. - М. Высш. шк., 2004, 549 с.
48. Гуськова А.К., Галстян И.А., Гусев И.А. Авария на Чернобыльской атомной станции (1986-2011 гг.): последствия для здоровья, размышления врача. Под ред. А.К.Гуськовой. – М.: ФМБЦ им. А.И.Бурназяна, 2011, 254 с.
49. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека (очерки). – М.: Медицина, 1971, 380 с.
50. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
51. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования. Методические указания. МУ 2.6.1.25-2000
52. Гуськова А.К. Уроки полувекowego развития радиационной медицины и принципы целевой подготовки медицинских специалистов для ее нужд. Материалы Российск. научн. конф. Медицинские аспекты радиационной и химической безопасности». 11-12 октября 2001 г. СПб. ВМедА. 2001. С.26-32
53. Л.А. Ильин. Фундаментальные основы регламентации допустимых уровней радиационного воздействия на человека и биоту. Лекция 6. ФМБЦ им. А.И.Бурназяна. https://ozlib.com/857245/tehnika/fundamentalnye_osnovy_reglamentatsii_dopustimyh_urovney_radiatsionnogo_vozdeystviya_cheloveka_biotu
54. Ильин Л.А. Реалии и мифы Чернобыля. - 2-е изд. - М.: Alara Limited, 1996.
55. Ильин Л. А. Радиационные аварии: медицинские последствия и опыт противорадиационной защиты. // Мед. радиология и радиац. безопасность, 1998, № 1, с. 8-17.
56. Рождественский Л.М. Порог стохастических эффектов ионизирующего излучения: аргументы «ПРО» и «CONTRA». Прикладная реализация. Радиационная биология. Радиоэкология, 2011, том 51, №5, С.576-594
57. Ильин Л.А., Крючков В.П., Осанов Д.П., Павлов Д.А. Уровни облучения участников ликвидации последствий Чернобыльской аварии в 1986—1987 г. и верификация дозиметрических данных // Радиационная биология. Радиоэкология, 1995, №6 (35). С. 803-828.
58. Ильин Л.А., Соловьев В.Ю. Непосредственные медицинские последствия радиационных инцидентов на территории бывшего СССР. // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2004, №6(49). С.37-48
59. Соловьев В.Ю., Барабанова А.В., Бушманов А.Ю., Гуськова А.К., Ильин Л.А. Анализ медицинских последствий радиационных инцидентов на территории бывшего СССР (по материалам регистра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России). Мед. радиология и радиационная безопасность, 2013, №1(58). С.36-42
60. Гуськова А.К. Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Основные итоги и нерешенные проблемы. Мед. радиология и радиационная безопасность. 2010, №3(55). С.17-28
61. Алексеева О.Г. Состояние иммунитета при острой и хронической лучевой болезни. Дисс. докт. мед. наук. – М., 1961. - 437 с.
62. Tubiana M. Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: The joint report of the Academie des Sciences (Paris) and of the Academie Nationale de Medicine. //Int.J.Radiat.Oncj. Biol. Phys., 2005, 63, No. 2, P. 317-319
63. Кузин А.М. Радиационный гормезис. // В кн.: Радиационная медицина. Руководство 64. для врачей-исследователей, организаторов здравоохранения и специалистов по радиационной безопасности. Под общ. ред. акад. РАМН Л.А. Ильина. Т. 1. Теоретические основы радиационной медицины. — М.: Изд. АТ, 2004, С. 861-871.
64. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. Радиационное воздействие на организм: положительные эффекты. - М.: Информ-Атом, 2005, 246 с.
65. Pollycove M., Feinendegen L.E. Radiation hormesis: the biological response to low doses of ionizing radiation. // Health Effects of Low-Level Radiation, BNES, 2002, P.1-12
66. UNSCEAR 2006. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. C. Non targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation. - UN. - New York, 2009, P. 1-79.
67. Sutherland B.M., Bennett P.V., Cintron-Torres N/ et al. Clustered DNA damages induced in human hematopoietic cells by low doses of ionizing radiation. // J/Radiat. Res., 2002, 43, Suppl, P.S149-S152
68. Литтл Д.Б. Неминутные эффекты ионизирующих излучений: выводы применительно к низкодозовым воздействиям. // Радиационная биология. Радиоэкология, 2007, №3(47). С.262-272
69. Мазурик В.К., Михайлов В.Ф., Ушенкова Л.Н. и др. Взаимосвязь содержания активных форм кислорода и состояния структуры ДНК в клетках костного мозга у мышей в динамике после общего воздействия γ -излучения. Радиационная биология. Радиоэкология, 2003, №6(43). С.625-632
70. Радиационная медицина. Под ред. Л.А.Ильина. Т.1. Теоретические основы радиационной медицины. - М.: Изд. АТ, 2004, С.871-925
71. Гребенюк А.Н., Легеза В.И., Назаров В.Б., Тимошевский А.А. Медицинские средства профилактики и терапии радиационных поражений. Учебное пособие. - СПб: ООО «Издательство ФОЛИ-АНТ», 2011, 92 с.
72. Ставицкий Р.В., Лебедев Л.А., Мехеичев А.В. и соавт. Некоторые вопросы действия малых доз ионизирующего излучения. // Мед. радиол. и радиационная безопасность. 2003, 48, №1(48). С. 30-39
73. Суворова Л.А., Нугис В.Ю. Динамика показателей периферической крови после однократного облучения человека в малых дозах. Мед. радиология и радиационная безопасность. 2009, №5(54). С.42-48
74. Гуськова А.К. Радиация и мозг человека. Мед. радиология и радиационная безопасность. 2001, №5(46). С. 47-55
75. Астров В.В. Обоснование целесообразности использования новых адаптогенов при профессиональном облучении в малых дозах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. Научно-исследовательский институт военной медицины МО РФ. Санкт-Петербург. 1996
76. Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю., и соавт. Здоровье населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях уральского региона. /Под ред. проф. А.В. Аклеева. – М.: РАДЭКОН, 2001. – 194 с.
77. Санитарные последствия сброса промышленных сточных вод базы 10 в реку Теча. Отчет о НИР /ИБФ МЗ СССР. – М., 1957. – 323 с.
78. Изучение последствий воздействия продуктов деления урана в прибрежных районах рек Т, И, То. Отчет о НИР /ИБФ МЗ СССР – М., 1965. -134 с.
79. Изучение санитарно-гигиенической обстановки и состояния здоровья населения в районе, загрязненном жидкими радиоактивными отходами комбината №817: Отчет о НИР /ИБФ МЗ СССР – М., 1961. -348 с.
80. Антушевич А.Е., Бойко В.Н., Боткевич Л.Г. и др. Влияние малых доз ионизирующих излучений на состояние здоровья людей. В сб.: Восстановительные и компенсаторные процессы при лучевых поражениях. Материалы конф. СПб. 1992. С.6-8
81. Легеза В.И., Абдуль Ю.А., Жилыев Е.Г. Динамика восстановления иммунологических сдвигов при облучении в «малых дозах». В сб.: Восстановительные и компенсаторные процессы при лучевых поражениях. Материалы конф. СПб. 1992. С.116-118
82. Цыбалова Л.М., Голованова А.К., Веселкова А.В. и др. Острые респираторные заболевания и вирусносительство у испытуемых ядерного оружия и ликвидаторов радиационных аварий в отдаленный период. Материалы Российск. Научн. Конф. Медицинские аспекты радиационной и химической безопасности». 11-12 октября 2001 г. СПб. ВМедА.2001. С.175-176
83. Шальнова Г.А., Уланова А.М., Мальцев В.Н. Реакция системы иммунитета на действие ионизирующего излучения в малых дозах. VI Съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность): Тез. Докл. Т.II (секции VII-XIV). М., 25-28 октября 2010 г. – М.: РУДН, 2010. - С.97
84. Васин М.В. Средства профилактики и лечения лучевых поражений: Учебн. Пособие. М.: Бюро оперативной полиграфии ГНИИИ военной медицины МО РФ, 2000. 264 с.

85. Ушаков И.Б., Солдатов С.К. Адаптационно-компенсаторные механизмы восстановления гематологических показателей у ликвидаторов-летчиков после аварии на Чернобыльской АЭС. В сб.: Восстановительные и компенсаторные процессы при лучевых поражениях. Материалы конф. СПб. 1992. С.201

86. Лукина Е.А., Левина А.А., Шефель Ю.В. и др. Дисфункция системы мононуклеарных фагоцитов у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС. В сб.: Восстановительные и компенсаторные процессы при лучевых поражениях. Материалы конф. СПб. 1992. С.121-122

87. Клинические аспекты действия малых доз радиации на человека. Материалы интерна, студентам и врачам / Отдаленные последствия облучения организма в малых дозах / Клинические аспекты действия малых доз радиации на человека. <http://www.medintern.ru/terms-823-1.html>

88. Пелевина И.И., Алещенко А.В., Антошина М.М. и др. Молекулярно-биологические особенности отдаленных последствий Чернобыльской аварии. VI Съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность): Тез. Докл. Т.П (секции VII-XIV). М., 25-28 октября 2010 г. – М.: РУДН, 2010.-С.9

89. Радиационная медицина. Под ред. Л.А.Ильина. Т.3. Радиационная гигиена. М.: ИздАТ, 2002. С.608

90. Рождественский Л.М. Острые вопросы обеспечения радиационной безопасности при радиационных авариях: радиобиологическое, радиационно-медицинское и организационное обеспечение мер противодействия при аварии на Чернобыльской АЭС. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2017. Т. 62, №2. С.66–70.

91. Гуськова А.К. Медицинские последствия аварии на ЧАЭС: основные итоги и нерешенные проблемы. Актуальные проблемы токсикологии и радиобиологии: Тез. Докл. Российской науч. Конф. С международн. участием, СПб, 19-20 мая 2011 г. – СПб: 2011, С.4-5

92. Ушаков И.Б., Федоров В.П. Нейроморфологические корреляты психоневрологических расстройств у ликвидаторов радиационных аварий. VII Съезд по радиационным исследованиям. Радиобиология. Радиоэкология. Радиационная безопасность. М. 21-24 октября 2014 г. Тез. Докл. М. 2014. С.126

93. Дозовые зависимости нестохастических эффектов, основные концепции и величины, используемые в МКРЗ. Публикации 41, 42 МКРЗ. Пер. с англ. Публ. 41, 42. 1987. 88 с.

94. Мороз Б.Б., Дешевой Ю.Б. Модифицирующее действие γ -облучения в низких дозах на реакции гемопозитической системы при эмоциональном стрессе. Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность. М., 14-17 октября 1997 г. Тез. Докл. Т.1 С.159-160

95. Дешевой Ю.Б., Мороз Б.Б., Лебедев В.Г. и др. Эмоциональный стресс и радиационная патология. IV Съезд по радиационным исследованиям. М. 20-24 ноября 2001 г. Тез. Докл., Т.2. М.2001. С. 362

96. Гришко Г.Н. Состояние свободнорадикальных процессов и антиоксидантной системы в плазме и эритроцитах крови при изолированном и комбинированном действии малых доз радиации и стресса. IV Съезд по радиационным исследованиям. М. 20-24 ноября 2001 г. Тез. Докл., Т.2. М.2001. С.384

97. Дешевой Ю.Б., Мороз Б.Б., Лыщикова А.В. и др. Костномозговое крово-

рение при эмоционально-стрессовых реакциях различной интенсивности на фоне действия ионизирующей радиации в низкой дозе. Радиационная биология. Радиоэкология, 2004, №1(44). С.56-61

98. Ролевич И.В., Маленченко А.Ф., Сушко С.Н. и др. Реакция альвеолярных макрофагов на комбинированное воздействие ионизирующего излучения и стресса. Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность. М., 14-17 октября 1997 г. Тез. Докл. Т.1 С. 69-70

99. Радиация: Дозы, Эффекты.Риск. Изд. «Мир». 1985

100. Ушаков И.Б., Бояринцев В.В., Петров В.М., Штемберг А.С. Вчера, сегодня и завтра космической радиобиологии. Актуальные проблемы токсикологии и радиобиологии: Тез. докл. Российской научной конф. с международн. участием, СПб, 19-20 мая 2011 г. – СПб: «Издательство «Фолиант», 2011. С.10-11

102.Иванченко А.В., Сосюкин А.Е., Василюк В.Б. Перспективные направления ранней диагностики производственно обусловленной патологии у работников предприятий атомного судостроения и судоремонта. –Актуальные проблемы токсикологии и радиобиологии: Тез. докл. Российской науч. конф. с международн. участием, СПб, 19-20 мая 2011 г. – СПб: ООО «Издательство Фолиант», 2011. - С.5

103.Витвицкий В.Н., Соболева Л.С., Шевченко В.А. Модификация мутагенных эффектов гамма-излучений солями хрома (VI) и свинца (II). Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность. М., 14-17 октября 1997 г. Тез. Докл. Т.2 С.222-223

104.Иванов С.Д., Кованько Е.Г. Развитие отдаленных эффектов радиационно-химических воздействий. Радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность. М., 14-17 октября 1997 г. Тез. Докл. Т.2. С.224-225

105.Салтанова И.В., Скурат В.В. Проблемы оценки экологического риска при комбинированном действии радиации и химического канцерогена. IV Съезд по радиационным исследованиям. М. 20-24 ноября 2001 г. Тез. Докл., Т.2. М.2001. С.374

106.Ролевич И.В., Морзак Г.И. Влияние длительного комбинированного радиационно-химического действия и эмоционального стресса на процессы адаптации организма. Малые дозы. Материалы международн. Научн. Конф. посвященной 25-летию Института радиобиологии (Гомель, 26-28 сентября 2012 г.). Минск. Институт радиологии. 2012. С.112-114.

107.Коваленко А.Н. Экзо- и эндогенные факторы, способствующие развитию органических изменений в головном мозге пострадавших, в связи с аварией на ЧАЭС: анализ проблемы (обзор литературы). //АМН Украины, 2000, т.6, №4. С.686-702

108. Лебеза В.И. Медицинские последствия воздействия радиации на организм малых доз ионизирующего излучения. В кн.: Клиническая радиология: Учебное пособие// Под ред. Ю.Ш.Халимова. – СПб: Фолиант, 2020. - 224 с.

109. Азизова Т.В., Власенко Е.В., Григорьева Е.С. и соавт. Показатели заболеваемости и смертности от ишемической болезни сердца в когорте рабочих ПО «Маяк», подвергшихся хроническому облучению // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2011. Т. 56. № 3. С.28–36

REFERENCES

1. Koterov AN. Spells about genome instability after low-dose irradiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2004; 49(4): 55-72. (In Russian).

2. Koterov AN. Low Doses of Ionizing Radiation: Approaches to Determining the Range. In the book: Radiation Medicine. Ed. L.A. Ilyin. Vol. 1. М.: Изд.АТ, 2004, S. 871-925. (In Russian).

3. Koterov AN. Low doses and low dose rates of ionizing radiation: regulation and realities of the XXI century. Medical Radiology and Radiation Safety. 2009; 54. (3): 5-26. (In Russian).

4. Koterov AN. Small doses of radiation: facts and myths. Basic concepts and genome instability. - М.: Publishing house of FMBC im. A.I.Burnazyan FMBA of Russia, 2010, 283 p. (In Russian). (<http://fmbcfmba.org/default.asp?id=6000>)

5. Recommendations-2003 of the European Committee on Radiation Risk. Identification of health consequences of exposure to ionizing radiation in low doses for the purposes of radiation protection. Regulated edition. Brussels. 2003. Translated from English. М. 2004. (In Russian).

6. Moskalev AA, Shaposhnikov MV. Genetic mechanisms of exposure to ionizing radiation in low doses. - SPb.: Nauka, 2009.137 p. (In Russian).

7. ICRP Publication 118. ICRP report on tissue reactions, early and long-term effects in normal tissues and organs - threshold doses for tissue reactions in the context of radiation protection. Translation from English. Chelyabinsk. 2012. 384 p. (In Russian).

8. Koterov AN. From very small to very large doses of radiation: new data on the establishment of ranges and their experimental epidemiological justification. Medical Radiology and Radiation Safety. 2013; 58(2): 5-21. (In Russian).

9. Kudryashov YB. Radiation biophysics (ionizing radiation). Ed. VK. Mazurik and M.F. Lomanov. M. Fizmatlit. 2004. (In Russian).

10. Vorontsov IV, Zhilyaev EG, Karpov VN, Ushakov IB. Small Radiation Impacts and Human Health (Essays on Systems Analysis). - М.: Voronezh: Voronezh State University, 2002. - 276 p. (In Russian).].

11. Kellerer AM. 5th Symposium on Microdosimetry. EUR 5452. Eds J.Booz, H.G.R.Smith. – Luxembourg: Commission of the European Communities, P. 409-442

12. International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU, 1983. Microdosimetry, Rep. 36/ - Bethesda:ICRP.

13. Bond VP, Feinengen LE, Booz J. What is low dose of radiation? In./J. Radiat. Biol., 1988, 53, No. 1, P. 1-12

14. Booz J, Feinengen LE. A microdosimetric understanding of low-dose radiation effects. Int. J. Radiat. Biol., 1988, 53, No. 1, P. 13-21

15. United Nations. UNSCEAR 1986. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. B. Dose-relationships for radiatijn-induced cancer. - United Nations, New York, 1986, P. 165-262

16. United Nations. UNSCEAR 1994. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. B. Adaptive responses to radiation in cells and organisms. - United Nations, New York, 1994, P. 185-272

17. United Nations. UNSCEAR 2000. Rep. to the General Assembly, with Scientific

Annexes. Annex. G. Biological effects at low radiations doses. – New York, 2000, P. 73-175

18. National Council on Radiation and Measurements. Influence of dose and distribution in time on dose-response relationship for low-LET radiations. 1980. NCRP Report 64. Prepared by NCRP Scientific Committee 40. – Bethesda, Maryland, USA: TCKЭю 1980

19. United Nations. UNSCEAR 2006. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I. Annex. A. Epidemiological studies of radiation and cancer. - United Nations, New York, 2008, P. 17-322

20. Rumyantseva GM, Chinkina OV, Bezina LN. Radiation incidents and public mental health. - М.: FGU GNTs SSP, 2009, 288 p. (In Russian).

21. Rumyantseva GM, Chinkina OV, Shishkov SN. Expert Evaluation of Mental Disorders in People Exposed to Elevated Radiation Exposures: A Guide for Physicians and Psychologists. - М.: FGU GNTSSSP, 2011, 260 p. (In Russian).

22. Kudyasheva A. The effect of small doses of ionizing radiation. Bulletin IB, 2009; 2: 2-6. (In Russian).

23. Ivanov IV. Initial reactivity of the organism and radiation exposure in small doses. - М.: Publishing house of RMAPO, 2010, 272 p. (In Russian).

24. Repin MV, Repina LA. Rapid analysis of dicentric in human blood lymphocytes after exposure to ionizing radiation in low doses. Rad. biology. Radioecology, 2011; 4 (51): 411-418 (In Russian).

25. Beinke C, Neineke V. Highpotential for methodical improvements of FISH-based translocation analysis for retrospective radiation biodosimetry. Health Phys., 2012, 103, No.2, P.127-132

26. Smith GM. What is low dose? J.Radiol. Prot., 2010, 30, No. 1, P. 93-101

27. Wakoford R, Tawn EJ. The meaning of low dose and low dose-rate. J. Radiol. Prot., 2010, 30, No. 1, P. 1-3

28. Rozhdestvensky LM. Fundamentals of the biological effect of ionizing radiation (the dual nature of the effect of radiation on biological objects). Lecture 1. FMBC them. A.I.Burnazyan. (In Russian). (https://ozlib.com/857156/tehnika/osnovy_biologicalicheskogo_deystviya_ioniziruyuschego_izlucheniya_dualnyy_harakter_deystviya_radiatsii_bioobekt#293)

29. Radiation safety standards NRB-99/2009. Sanitary rules and regulations SanPin 2.6.1.2523-09. (In Russian).

30. Geraskin SA. The critical nature of modern concepts and approaches to assessing the biological effect of small doses of ionizing radiation. Radiats. biol. Radioecology, 1995; 35(5): 563-571. (In Russian).

31. Gotlib VYa, Pevlevina II, Konoplya EF. et al. Some aspects of the biological action of small vnes of radiation. Radiobiology, 1991; 31(3): 318-325. (In Russian).

32. Koterov AN, Biryukov AP. The possibility of determining of anomalies and pathologies in the offspring of liquidators of Chernobyl accident by non-radiation factors. Int. J. Low Radiation (Paris), 2011, 8, No. 4, P. 256-312

33. Koterov AN, Zharkova GP, Biryukov AP. Tandem of radiation epidemiology and radiobiology for the practice of radiation protection. Medical radiol. and radiation.

- Safety, 2010; 4 (55): 55-84 (In Russian).
34. III International Symposium "Chronic Radiation Exposure: Medical and Biological Effects". Medical Radiology and Radiation Safety. 2006; 51(2): 24-30 (In Russian).
 35. United Nations. UNSCEAR 2012. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Biological mechanism of radiation action at low doses. - United Nations, New York, 2012, 45pp.
 36. Tubiana M, Arengo A, Averbeck D, Masse R. Low-dose risk assessment: comments on the summary of the international workshop. Radiat. Res., 2007, 167, No. 6, P. 742-744.
 37. Martin CJ, Sutton DG, Wright EG. The radiobiology/radiation protection interface in health-care. J. Radiat. Prot., 2009, 29, 2A, P. A1-A20.
 38. Dauer LT, Brooks AL, Hoel DG, et al. Review and evaluation of updated researches on the health effects associated with low dose ionizing radiation. Radiat. Prot. Dosim., 2010, No. 2, P. 103-136.
 39. Averbeck D. Does scientific evidence support a change from the LNT model for low-dose radiation risk extrapolation? Health Phys., 2009, 97, No. 5, P.493-504
 40. Petin VG, Pronkevich MD. Analysis of the effect of low dose radiation on human cancer. Radiation and risk, 2012; 21(1): 39-57 (In Russian).
 41. Muirhead CR, Cox R, Statler JW, et al. Estimates of late radiation risks to the UK population. Doc. NRBP, 1993, 4, P.13-157
 42. United Nations. UNSCEAR 2000. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. F. Influence of dose and dose rate on stochastic effects of radiation. - New York, 1993, P. 619-727
 43. BEIR VII Report 2006. Phase 2. Health Risks from Exposure to Low Levels Ionizing Radiation. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels Ionizing Radiation, National Research Council. <http://www.nap.edu/catalog/11340.html>
 44. Koterov AN. Radiation-induced genome instability under the action of low doses of radiation in scientific publications and in documents of international organizations. Medical Radiology and Radiation Safety. 2009; 54(4): 5-13 (In Russian).
 45. Kutkov VA. Quantities in radiation protection and safety. Scientific and informational journal on radiation safety ANRI (Equipment and news of radiation measurements), 2007; 3 (50): 2-25 (In Russian).
 46. Tsyb AF, Budagov RS, Zamulaeva IA. et al. Radiation and pathology: Textbook. Benefit. Ed. A.F. Tsyba. - M.: Higher. shk., 2005, 341 p. (In Russian).
 47. Yarmonenko SP, Vainson AA. Radiobiology of man and animals. - M. Vyssh. shk., 2004, 549 p. (In Russian).
 48. Guskova AK, Galstyan IA, Gusev IA. The accident at the Chernobyl nuclear power plant (1986-2011): health consequences, doctor's thoughts. Edited by A.K. Guskova. - M.: FMBC im. A.I.Burnazyan, 2011, 254 p. (In Russian).]
 49. Guskova AK, Baysogolov GD. Human radiation sickness (essays). - M.: Medicine, 1971, 380 p. (In Russian).]
 50. Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Transl. from English / Ed. M.F. Kiselev and N.K. Shandala. Moscow: Ed. LLC PKF "Alana", 2009. (In Russian).
 51. Ionizing radiation, radiation safety. Dosimetric control of external occupational exposure. General requirements. Methodical instructions. MU 2.6.1.25-2000. (In Russian).
 52. Guskova AK. Lessons from the half-century development of radiation medicine and the principles of targeted training of medical specialists for its needs. Materials of Russian. scientific. conf. Medical aspects of radiation and chemical safety". October 11-12, 2001 St. Petersburg. VMedA. 2001.S. 26-32. (In Russian).
 53. L.A. Ilyin. Fundamentals of regulation of permissible levels of radiation exposure to humans and biota. Lecture 6. FMBC them. A.I.Burnazyan. (In Russian). (https://ozlib.com/857245/tehnika/fundamentalnye_osnovy_reglamentatsii_dopusimyh_urovny_radiatsionnogo_vozdeystviya_cheloveka_biota)
 54. Ilyin LA. Realities and myths of Chernobyl. - 2nd ed. - M.: Alara Limited, 1996. (In Russian).
 55. Ilyin LA. Radiation accidents: medical consequences and experience of anti-radiation protection. Med. Radiology and Radiation. safety, 1998, 1: 8-17. (In Russian).
 56. Rozhdestvensky LM. The threshold of stochastic effects of ionizing radiation: arguments "PRO" and "CONTRA". Applied implementation. Radiation biology. Radioecology, 2011, 5(51): 576-594. (In Russian).
 57. Ilyin LA, Kryuchkov VP, Osanov DP, Pavlov DA. Exposure levels of participants in the elimination of the consequences of the Chernobyl accident in 1986-1987 and verification of dosimetric data. Rad. biology. Radioecology, 1995; 6 (35): 803-828. (In Russian).
 58. Ilyin LA, Soloviev VYu. Immediate medical consequences of radiation incidents on the territory of the former USSR. Medical Radiology and Radiation Safety. 2004; 49(6): 37-48 (In Russian).
 59. Soloviev VYu, Barabanova AV, Bushmanov AYu, Guskova AK, Ilyin LA. Analysis of the medical consequences of radiation incidents on the territory of the former USSR (based on the materials of the register of the Federal State Budgetary Institution SSC FMBC named after A.I.Burnazyan, FMBA of Russia). Medical Radiology and Radiation Safety. 2013; 58(1): 36-42. (In Russian).
 60. Guskova AK. Medical consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Main results and unresolved problems. Medical Radiology and Radiation Safety. 2010; 55(3):17-28 (In Russian).
 61. Alekseeva OG. The state of immunity in acute and chronic radiation sickness. Diss. doct. Med. sciences. - M., 1961. 437 p. (In Russian).
 62. Tubiana M. Dose-effect relationship and estimation of the carcinogenic effects of low doses of ionizing radiation: The joint report of the Academie des Sciences (Paris) and of the Academie Nationale de Medicine./Int.J.Radiat.Oncol. Biol. Phys., 2005, 63, No. 2, P. 317-319
 63. Kuzin AM. Radiation hormesis. In the book: Radiation medicine. Guideline 64. for medical researchers, health care providers and radiation safety specialists. Under total. ed. acad. RAMS L.A. Ilyin. T. I. Theoretical foundations of radiation medicine. - M.: Ed. AT, 2004, S. 861-871. (In Russian).
 64. Buldakov LA, Kalistratova VS. Radiation effects on the body: positive effects. - M.: Inform-Atom, 2005, 246 p. (In Russian).
 65. Polycove M., Feinendegen L.E. Radiation hormesis: the biological response to low doses of ionizing radiation. Health Effects of Low-Level Radiation, BNES, 2002, P.1-12
 66. UNSCEAR 2006. Rep. to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex. C. Non targeted and delayed effects of exposure to ionizing radiation. - UN. - New York, 2009, P. 1-79.
 67. Sutherland BM, Bennett PV, Cintron-Torres N, et al. Clustered DNA damages induced in human hematopoietic cells by low doses of ionizing radiation. J/Radiat. Res., 2002, 43, Suppl. P.S149-S152
 68. Little DB. Non-targeting effects of ionizing radiation: conclusions as applied to low-dose exposures. Radiation Biology. Radioecology, 2007; 3 (47): 262-272 (In Russian).
 69. Mazurik VK, Mikhailov VF, Ushenkova LN, et al. The relationship between the content of reactive oxygen species and the state of the DNA structure in bone marrow cells in mice in dynamics after the general exposure to γ -radiation. Radiation biology. Radioecology, 2003; 6 (43): 625-632 (In Russian).
 70. Radiation medicine. Ed. LA Ilyin. Vol. 1. Theoretical foundations of radiation medicine. M.: Publishing house AT, 2004, pp. 871-925 (In Russian).
 71. Grebenyuk AN, Legeza VI, Nazarov VB, Timoshevsky AA. Medical means of prevention and therapy of radiation injuries. Tutorial. - SPb: LLC "FOLIANT Publishing House". 2011; 92 p. (In Russian).
 72. Stavitsky RV, Lebedev LA, Mekhechev AV, et al. Some questions of the action of small doses of ionizing radiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2003; 48(1): 30-39 (In Russian).
 73. Suvorova LA, Nugis VYu. Dynamics of peripheral blood parameters after a single exposure to a person in low doses. Medical Radiology and Radiation Safety. 2009; 54(5): 42-48 (In Russian).
 74. Guskova AK. Radiation and the human brain. Medical Radiology and Radiation Safety. 2001; 46(5): 47-55 (In Russian).
 75. Astrov VV. Substantiation of the expediency of using new adaptogens during occupational exposure at low doses. Abstract of dissertation for the degree of candidate of medical sciences. Research Institute of Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation. St. Petersburg. 1996. (In Russian).
 76. Akleev AV, Kosenko MM, Krestinina LYu, et al. Health of the population living in the radioactively contaminated territories of the Ural region. Ed. prof. A.V. Akleev. - M.: RADEKON, 2001.194 p. (In Russian).
 77. Sanitary Consequences of Discharge of Industrial Wastewater from Base 10 into the Techa River. Report on R&D. IBF MZ USSR. - M., 1957. 323 p. (In Russian).
 78. Study of the consequences of the impact of uranium fission products in the coastal regions of the rivers T., I., To.: Report on research. IBF MZ USSR. M., 1965. -134 p. (In Russian).
 79. Study of the sanitary and hygienic situation and the state of health of the population in the area contaminated with liquid radioactive waste of the plant No. 817: Report on research. IBF MZ USSR. - M. 1961. -348 p. (In Russian).
 80. Antushevich AE, Boyko VN, Botkevich LG. and other Influence of small doses of ionizing radiation on the state of health of people. In collection: Rehabilitation and compensatory processes in radiation injuries. Materials conf. SPb. 1992.S. 6-8. (In Russian).
 81. Legeza VI, Abdul YuA, Zhilyaev EG. The dynamics of the restoration of immunological shifts under irradiation in "small doses". In collection: Rehabilitation and compensatory processes in radiation injuries. Materials conf. SPb. 1992.S. 116-118. (In Russian).
 82. Tsybalova LM, Golovanova AK, Veselkova AV. et al. Acute respiratory diseases and virus carriers among nuclear weapons testers and liquidators of radiation accidents in the remote period. Materials of Russian. Scientific Conf. Medical aspects of radiation and chemical safety". October 11-12, 2001 St. Petersburg. VMedA. 2001. P.175-176. (In Russian).
 83. Shalnova GA, Ulanova AM, Maltsev VN. The reaction of the immune system to the action of ionizing radiation in small doses. VI Congress on radiation research (radiobiology, radioecology, radiation safety): Abstracts. Report T. II (sections VII-XIV). M., October 25-28, 2010 - Moscow: RUDN, 2010. - P.97. (In Russian).
 84. Vasin MV. Means of prevention and treatment of radiation injuries: Textbook. Benefit. Moscow: Bureau of Operative Printing of the State Research Institute of Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2000.264 p. (In Russian).
 85. Ushakov IB, Soldatov SK. Adaptive-compensatory mechanisms for restoring hematological parameters in liquidators-pilots after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. In collection: Rehabilitation and compensatory processes in radiation injuries. Materials conf. SPb. 1992.S. 201. (In Russian).
 86. Lukina EA, Levina AA, Shefel YuV, et al. Dysfunction of the system of mononuclear phagocytes in liquidators of the consequences of the Chernobyl accident. In collection: Rehabilitation and compensatory processes in radiation injuries. Materials conf. SPb. 1992.S. 121-122. (In Russian).
 87. Clinical aspects of the effect of low doses of radiation on humans. Materials for interns, students and doctors. Long-term effects of exposure to low doses of the body. (In Russian). <http://www.medinterm.ru/terms-823-1.html>.
 88. Pelevina II, Aleshchenko AV, Antoshchina MM, et al. Molecular biological features of the long-term consequences of the Chernobyl accident. VI Congress on radiation research (radiobiology, radioecology, radiation safety): Abstracts. Dokl. T. II (sections VII-XIV). M., October 25-28, 2010 - Moscow: RUDN, 2010.-P.9. (In Russian).
 89. Radiation medicine. Ed. LA Ilyin. T.3. Radiation hygiene. M.: Izd. AT, 2002: S.608. In Russian).
 90. Rozhdestvensky LM. Acute issues of ensuring radiation safety in radiation accidents: radiobiological, radiation-medical and organizational support of countermeasures in the event of an accident at the Chernobyl nuclear power plant. Med. radiology and radiation safety, 2017; 2 (62): 66-70 (In Russian).
 91. Guskova AK. Medical consequences of the Chernobyl accident: main results and unresolved problems. Actual problems of toxicology and radiobiology: Abstracts. Dokl. Russian scientific. Conf. From international Learning, St. Petersburg, May 19-20, 2011 - St. Petersburg: 2011, pp. 4-5. (In Russian).
 92. Ushakov IB, Fedorov VP. Neuromorphological correlates of neuropsychiatric disorders in liquidators of radiation accidents. VII Congress on Radiation Research. Radiobiology. Radioecology. Radiation safety. M. 21-24 October 2014 Abstracts. Dokl. M. 2014.S. 126. (In Russian).
 93. Dose dependences of non-stochastic effects, basic concepts and quantities used in the ICRP. Publications 41, 42 of the ICRP. Per. from English Publ. 41, 42.1987.88 p. (In Russian).
 94. Moroz BB, Deshevoy YuB. Modifying effect of γ -irradiation in low doses on the reactions of the hematopoietic system under emotional stress. Radiobiology, ra-

- radioecology, radiation safety. M., October 14-17, 1997 Abstracts. Dokl. T.1 P.159-160. (In Russian).
95. Deshevoy YB, Moroz BB, Lebedev VG, et al. Emotional stress and radiation pathology. IV Congress on Radiation Research. M. 20-24 November 2001 Abstracts. Doc., Vol. 2. M.2001. P. 362. (In Russian).
 96. Grishko GN. The state of free radical processes and the antioxidant system in blood plasma and erythrocytes under the isolated and combined action of low doses of radiation and stress. IV Congress on Radiation Research. M. 20-24 November 2001 Abstracts. Dokl., Vol. 2. M. 2001.S. 384. (In Russian).
 97. Deshevoy YuB, Moroz BB, Lyshchikova AV, et al. Bone marrow hematopoiesis in emotional stress reactions of varying intensity against the background of the action of ionizing radiation in a low dose. Radiation biology. Radioecology. 2004;1 (44): 56-61. (In Russian).
 98. Rolevich IV, Malenchenko AF, Sushko SN, et al. Response of alveolar macrophages to the combined effects of ionizing radiation and stress. Radiobiology, radioecology, radiation safety. M., October 14-17, 1997 Abstracts. Dokl. Vol. 1 p. 69-70. (In Russian).
 99. Radiation: Doses. Effects. Risk. Ed. "Mir". M. 1985. (In Russian).
 100. Lapsha VI, Bocharova VN, Rolevich IV, et al. Structural and functional changes in the sympathoadrenal system under prolonged exposure to ionizing radiation in low doses and emotional stress. III International Symposium "Mechanisms of Action of Small Doses". M. December 3-6, 2002. Abstracts. Dokl. P.98. (In Russian).
 101. Ushakov IB, Boyarintsev VV, Petrov VM, Shtemberg AS. Yesterday, today and tomorrow of space radiobiology. Actual problems of toxicology and radiobiology: Abstracts. report Russian Scientific Conf. with international participation, St. Petersburg, May 19-20, 2011 - St. Petersburg: "Foliant" Publishing House, 2011. P.10-11. (In Russian).
 102. Ivanchenko AV, Sosyukin AE, Vasilyuk VB. Promising directions of early diagnostics of production-related pathology in workers of nuclear shipbuilding and ship repair enterprises. –Current problems of toxicology and radiobiology: Abstracts. report Russian scientific. conf. from international participation, St. Petersburg, May 19-20, 2011 - St. Petersburg: LLC "Foliant Publishing House", 2011.- P.5. (In Russian).
 103. Vitvitsky VN, Soboleva LS, Shevchenko VA. Modification of mutagenic effects of gamma radiation with chromium (VI) and lead (II) salts. Radiobiology, radioecology, radiation safety. M., October 14-17, 1997 Abstracts. Dokl. T.2 S.222-223. (In Russian).
 104. Ivanov SD, Kovanko EG. Development of long-term effects of radiation-chemical impacts. Radiobiology, radioecology, radiation safety. M., October 14-17, 1997 Abstracts. Dokl. T.2. S.224-225. (In Russian).
 105. Saltanova IV, Skurat VV. Problems of assessing environmental risk under the combined action of radiation and a chemical carcinogen. IV Congress on Radiation Research. M. 20-24 November 2001 Abstracts. Doc., Vol. 2. M.2001. P. 374. (In Russian).
 106. Rolevich IV, Morzak GI. Influence of long-term combined radiation-chemical action and emotional stress on the adaptation processes of the organism. Small doses. International materials. scientific. Conf., dedicated to the 25th anniversary of the Institute of Radiobiology (Gomel, September 26-28, 2012). Minsk. Institute of Radiobiology. 2012.S. 112-114. (In Russian).
 107. Kovalenko AN. Exo- and endogenous factors contributing to the development of organic changes in the brain of victims in connection with the Chernobyl accident: analysis of the problem (literature review). AMS of Ukraine, 2000, Vol. 6, No. 4, pp. 686-702. (In Russian).
 108. Legeza VI. Medical consequences of exposure to low doses of ionizing radiation on the body. In the book: Clinical Radiology: Textbook Ed. Yu.Sh. Khalimov. - SPb: Foliant, 2020 .224 p. (In Russian).
 109. Azizova TV, Vlasenko EV, Grigorieva ES, et al. Indicators of morbidity and mortality from ischemic heart disease in a cohort of workers at the Mayak Production Association exposed to chronic irradiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2011; 56(3): 28-36. (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 16.02.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 16.02.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.

**ОБ УЧАСТИИ СПЕЦИАЛИСТОВ ФГБУ ГНЦ ФМБЦ ИМ. А.И. БУРНАЗЯНА ФМБА РОССИИ
В РАБОТЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ФОРУМА «АРМИЯ-2021»
ON THE PARTICIPATION OF SPECIALISTS FGBU A.I. BURNASYAN FMBC FMBA OF RUSSIA
IN THE WORK OF THE INTERNATIONAL MILITARY-TECHNICAL FORUM «ARMY-2021»**



В Подмоскowie с 22 по 28 августа 2021 г. проходил Международный военно-технический форум «Армия-2021» (Форум), организатором которого выступило Министерство обороны России.

Форум стал уникальной платформой для демонстрации достижений научно-технической мысли, воплощенных в современных и перспективных образцах интеллектуального оружия, военной техники и технологий. В нынешнем году свои достижения представили на Форуме более 1,4 тыс. предприятий.

В павильоне D Форума на двух площадках была развернута экспозиция Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации, на которой были представлены Научно-производственный центр «Фармзащита» ФМБА России, Научно-исследовательский институт гигиены, профпатологии и экологии человека ФМБА России, Научный центр биомедицинских технологий ФМБА России, Государственный научно-исследовательский институт биологического приборостроения ФМБА России, Федеральный центр мозга и нейротехнологий ФМБА России, Национальный медицинский исследовательский центр оториноларингологии ФМБА России, Центр стратегического планирования и управления медико-биологическими рисками здоровью ФМБА России, где были представлены медицинские изделия и препараты, опытный образец мобильного диагностического комплекса оценки состояния вегетативной нервной системы по параметрам зрачковой реакции, комплекс биологического контроля аэрозолей БКА-19, устройство биологического контроля УБК-2, инновационные разработки тест-систем для диагностики новой коронавирусной инфекции, препарат для комплексной терапии новой коронавирусной инфекции (COVID-19) среднетяжелого течения «Лейтрагин».

Стенд был организован при методической поддержке Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА России, экспозиция которого была развернута на стенде Госкорпорации «Росатом» совместно с 12 Главным управлением Министерства обороны Российской Федерации. Экспозиция была посвящена оказанию помощи пострадавшим в результате воздействия радиационных факторов. Были представлены: медицинский специализированный снегоболотоход (реанимобиль), оснащенный комплектом высокотехнологичного медицинского

оборудования для обеспечения полного спектра реанимационных процедур для перевозки пострадавших от воздействия радиации; и макет специализированной асептической палаты для лечения пострадавших с тяжелой степенью острой лучевой болезни.

Реанимобиль предназначен для эвакуации пострадавших любой степени тяжести в кратчайшие сроки из местностей, недоступных для техники повышенной проходимости. Специализированная асептическая палата используется для лечения больных с тяжелой и крайне тяжелой степенью острой лучевой болезни: доза облучения от 6 Гр и выше. В ней проводят интенсивную терапию с использованием антибактериальных, противовирусных, противогрибковых средств, колониестимулирующих факторов, цитокинов, парентерального питания, массивной инфузионной терапии, трансфузии компонентов крови, обеспечена возможность непрерывного мониторинга состояния пациента, проведение необходимых медицинских вмешательств, включая полный спектр реанимационных процедур.

Экспозицию посетил Министр обороны Российской Федерации Сергей Шойгу. Руководитель ФМБА России Вероника Скворцова и Первый заместитель генерального директора ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России Андрей Бушманов рассказали министру о возможностях высокотехнологичной специализированной медицинской помощи, которую могут оказать сотрудники ФМБА России в случае возникновения чрезвычайной ситуации.

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России является центром компетенций Российской Федерации и сотрудничающим центром ВОЗ по вопросам оказания медицинской помощи лицам, пострадавшим в результате воздействия радиационных факторов. Специалисты медицинских бригад ФМБЦ им. А.И. Бурназяна были одними из первых аттестованы в качестве международных медицинских мобильных бригад чрезвычайного реагирования; медики Полевого многопрофильного госпиталя стали ядром формирования сводных мобильных медицинских отрядов ФМБА России.

Сотрудники ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России приняли активное участие в работе круглых столов и научно-практических конференций Форума, в частности, посвященных развитию оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации.



ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС
В ON-LINE КАТАЛОГЕ
«ПРЕССА РОССИИ»
АГЕНТСТВА «КНИГА-СЕРВИС»
71450



ЮБИЛЕЙНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ФГБУ ГНЦ ФМБЦ ИМ. А.И. БУРНАЗЯНА ФМБА РОССИИ: 75 ЛЕТ НА СТРАЖЕ ЗДОРОВЬЯ ЛЮДЕЙ»
02.11.2021 – 03.11.2021, Москва

Anniversary International Scientific and Practical Conference
«BURNASYAN FMBC of FMBA: 75 Years on Guard of People's Health»
02.11.2021 – 03.11.2021, Moscow, Russia

**Юбилейная международная научно-практическая конференция
«ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России:
75 лет на страже здоровья людей»**

приурочена к юбилею Государственного научного центра –
Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА
России, основанного в 1946 году для изучения влияния радиации на человека
и разработки средств защиты персонала атомных производств.
Здесь были заложены основы отечественной радиобиологии и радиотоксикологии,
радиационной медицины и дозиметрии человека, радиационной гигиены и
радиационной эпидемиологии, токсикологии
и гигиены ракетных топлив, созданы первые схемы лечения
лучевой болезни и дозиметрическая аппаратура
для регистрации различных видов излучений.

В соответствии с приказом ФМБА России от 02.09.2021 г. №13кс
конференция будет проводиться 2 – 3 ноября 2021 г. в гибридном формате

Пленарное заседание,

на котором известные ученые обсудят актуальные вопросы медицины,
радиобиологии, радиационной безопасности и аварийной готовности,
пройдет на территории ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Заседания секций:

«Онкология», «Радиобиология и радиационная медицина»,
«Урология и реконструктивная андрология», «Актуальные вопросы подготовки
высококвалифицированных медицинских кадров для системы ФМБА России»,
«Медицина труда и психофизиологическое обеспечение работников атомной
отрасли», «Медицина катастроф, аварийная готовность, реагирование», «Терапия»,
«Радиационная безопасность, гигиена неионизирующих излучений и компонентов
ракетных топлив», «Экстрапирамидные заболевания и общая неврология»,
«Травматология и ортопедия», «Офтальмология», «Актуальные вопросы спортивной
медицины», «Нейрохирургия», «Донорство и трансплантация солидных органов»,
«Гепатопанкреатобилиарная хирургия», «Формирование трехуровневой системы
оказания помощи» – **будут проводиться в виртуальных залах в режиме он-лайн.**

В рамках конференции запланировано также проведение в формате он-лайн
Школы-конференции молодых ученых и специалистов «Ильинские чтения 2021».

**Приглашаем специалистов принять активное участие
в работе конференции!**