

**Научно-практический
журнал**

УЧРЕДИТЕЛЬ:
Федеральное бюджетное
учреждение науки
«Санкт-Петербургский
научно-исследовательский
институт радиационной гигиены
имени профессора П.В. Рамзаева»

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-28716 от 6 июля 2007 г.

В 2015 году журнал был зарегистрирован как сетевое издание Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ЭЛ № ФС77-63702 от 10 ноября 2015 г.

Издается ежеквартально.

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается с письменного разрешения редакции.

Ссылка на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» обязательна.

Журнал включен в перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Журнал индексируется в мультидисциплинарной библиографической и реферативной базе SCOPUS, Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

Корректор А.М. Плаксина
Компьютерная верстка
А.В. Гнездиловой

Адрес редакции:
197101, Санкт-Петербург,
ул. Мира, дом 8
Тел. (812) 233-4283, 233-5016
Тел./Факс (812) 233-4283
E-mail: journal@niirg.ru
Сайт: www.radhyg.ru

Тираж 200 экз.

ISSN 1998-426X



9 771998 426783 >

Индекс для подписки в агентстве
«Роспечать» – **57988**

© «Радиационная гигиена», 2019

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 12 № 2, 2019

Председатель редакционного совета

Онищенко Геннадий Григорьевич — Государственная Дума, д.м.н., профессор, академик РАН (Москва, Российская Федерация)

Главный редактор

Романович Иван Константинович — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Вишнякова Надежда Михайловна — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Редакционный совет

Алексанин Сергей Сергеевич — ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никитина» МЧС России, д.м.н. профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Башкетова Наталия Семеновна — Управление Роспотребнадзора по г. Санкт-Петербургу (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Горбанев Сергей Анатольевич — ФБУН «Северо-западный научный центр гигиены и общественного здоровья», д.м.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Зарединов Дамир Арифович — Министерство здравоохранения Республики Узбекистан, д.м.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан)

Иванов Виктор Константинович — Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр имени П.А. Герцена» Минздрава России, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАН (Обнинск, Российская Федерация)

Ильин Леонид Андреевич — ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, д.м.н., профессор, академик РАН (Москва, Российская Федерация)

Кашпаров Валерий Александрович — Украинский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии, д.б.н. (Киев, Украина)

Марченко Татьяна Андреевна — Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий), д.м.н., профессор (Москва, Российская Федерация)

Мирсаидов Улмас Мирсаидович — Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, д.х.н., профессор, академик АН РТ (Душанбе, Республика Таджикистан)

Надареишвили Давид Киазович — Центр экспериментальной биомедицины им. И. Бериташвили, PhD (Тбилиси, Грузия)

Рожко Александр Валентинович — ГУ «Республиканский научный центр радиационной медицины и экологии человека», д.м.н. (Гомель, Республика Беларусь)

Софронов Генрих Александрович — ФБНУ «Институт экспериментальной медицины», д.м.н., профессор, академик РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Ушаков Игорь Борисович — ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, д.м.н., профессор, академик РАН (Москва, Российская Федерация)

Редакционная коллегия

Алехнович Александр Владимирович — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Минздрава России, д.м.н., профессор (Москва, Российская Федерация)

Аклеев Александр Васильевич — ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» Федерального медико-биологического агентства, д.м.н., профессор (Челябинск, Российская Федерация)

Архангельская Генриэтта Владимировна — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Балонов Михаил Исаакович — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Балтрукова Татьяна Борисовна — ГБОУ ВПО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Вакуловский Сергей Мстиславович — Институт проблем мониторинга окружающей среды (ИПМ) ФГУ НПО «Тайфун», д.т.н., профессор (Обнинск, Российская Федерация)

Гребеньков Сергей Васильевич — ГБОУ ВПО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Ермолина Елена Павловна — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации (Москва, Российская Федерация)

Звонова Ирина Александровна — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.т.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Кадука Марина Валерьевна — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», к.б.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Константинов Юрий Олегович — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», к.т.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Маттссон Ларс Юхан Скорен — Лундский университет, профессор (Мальмё, Швеция)

Омельчук Василий Владимирович — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.м.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Рамзаев Валерий Павлович — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», к.м.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Репин Виктор Степанович — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», д.б.н. (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Рыбников Виктор Юрьевич — ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никитина» МЧС России, д.м.н., д-р психол. наук, профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Санжарова Наталья Ивановна — ФГБУН «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» Федерального агентства научных организаций, д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН (Обнинск, Российская Федерация)

Шандала Наталья Константиновна — ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, д.м.н., профессор (Москва, Российская Федерация)

FOUNDER:
Federal Scientific Organization
«Saint-Petersburg Research Institute
of Radiation Hygiene
after Professor P.V. Ramzaev»

Quarterly published

Editorial office address:
Mira str., 8, 197101,
St.-Petersburg, Russia
Phone: (812) 233-42-83, 233-50-16
Phone/Fax: (812) 233-42-83
E-mail: journal@niirg.ru
Web: www.radhyg.ru

RADIATION HYGIENE

Chairman of Editorial Council
Gennadiy G. Onishchenko

Editor-in-Chief
Ivan K. Romanovich



RADIATION HYGIENE

Vol. 12 № 2, 2019

Chairman of Editorial Council

Gennadiy G. Onishchenko — the State Duma, Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, M.D. Professor (Moscow, Russian Federation)

Editor-in-Chief

Ivan K. Romanovich — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D., Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russian Federation)

Deputy Editor-in-Chief

Nadezhda M. Vishnyakova — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D. (Saint Petersburg, Russian Federation)

Members of Editorial Council

Sergey S. Aleksanin — Federal State Organization «A.M. Nikiforov All-Russia Center of Emergency and Radiation Medicine» of EMERCOM of Russia, M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

Nataliya S. Bashketova — Saint Petersburg Rospotrebnadzor Department (Saint Petersburg, Russian Federation)

Sergey A. Gorbaney — Northwest Public Health Research Center (Saint Petersburg, Russian Federation)

Damir A. Zaredinov — Uzbekistan Republic Healthcare Ministry, M.D., Professor (Tashkent, Uzbekistan Republic)

Valeriy A. Kashparov — Ukrainian Scientific Research Institute of Agricultural Radiology, Doctor of Biology (Kiev, Ukraine)

Ulmas M. Mirsaidov — Agency for Nuclear and Radiation Safety of the Academy of Sciences of Tajikistan Republic, Doctor of Chemistry, Professor, Academician of AS TR. (Dushanbe, Tajikistan Republic)

David K. Nadareshvili — Center of Experimental Biomedicine after I. Beritashvili, PhD (Tbilisi, Georgia)

Viktor K. Ivanov — Medical Radiological Center of Science after A.F. Tsyba — Branch of Federal State Organization «P.A. Herzen Federal Medical Research Center» of Healthcare Ministry», Doctor of Engineering, Professor, corresponding member of the Russian (Obninsk, Russian Federation)

Leonid A. Ilyin — Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia after A.I. Burnasyan, M.D., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Tat'yana A. Marchenko — All-Russian Research Institute on the Problems of Civil Defense and Emergency Situations of the Russian EMERCOM, Doctor of Medical Sciences, Professor (Moscow, Russian Federation)

Aleksandr V. Rozhko — Republican Scientific Center of Radiation Medicine and Human Ecology M.D. (Gomel, Belarus Republic)

Genrikh A. Sofronov — Federal State Scientific Organization «Institute of Experimental Medicine», Member of the Russian Sciences Academy, Professor, Doctor of Medical Sciences, (Saint Petersburg, Russian Federation)

Igor' B. Ushakov — Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia after A.I. Burnasyan, Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Honoured Doctor of the Russian Federation, Medical Major General of the Reserve (Moscow, Russian Federation)

Editorial Board

Aleksandr V. Alekhnovich — Russian Medical Academy of Post-graduate Education, MD, Professor (Moscow, Russian Federation)

Aleksandr V. Akleyev — Urals Research Center for Radiation Medicine of the Federal Medical-Biological Agency, MD, Professor (Chelyabinsk, Russian Federation)

Natalya I. Sanzharova — All-Russia Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, The Federal Agency for Scientific Organizations, Doctor of Biology, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, Russian Federation)

Genrietta V. Arkhangel'skaya — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D. (Saint Petersburg, Russian Federation)

Mikhail I. Balonov — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Biology, Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

Tat'yana B. Baltrukova — Northwest State Medical University after I.I. Mechnikov (Saint Petersburg, Russian Federation)

Sergey M. Vakulovsky — Federal State Budgetary Institution Research and Production Association «Typhoon», Doctor of Engineering, Professor (Kaluga region, Russian Federation)

Sergey V. Grebenkov — Northwest State Medical University after I.I. Mechnikov, M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

Elena P. Ermolina — Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuous Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation (Moscow, Russian Federation)

Irina A. Zvonova — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

Marina V. Kaduka — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of biological science (Saint Petersburg, Russian Federation)

Yuriy O. Konstantinov — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of Engineering (Saint Petersburg, Russian Federation)

Mattsson Lars Juhan Sören — Professor of medical radiation physics department of Lund University (Malmo, Sweden)

Vasily V. Omelchuk — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, M.D. (Saint Petersburg, Russian Federation)

Valeriy P. Ramzaev — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of Medicine (Saint Petersburg, Russian Federation)

Victor S. Repin — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Doctor of Biology (Saint Petersburg, Russian Federation)

Victor Yu. Rybnikov — Federal State Organization «A.M. Nikiforov All-Russia Center of Emergency and Radiation Medicine» EMERCOM of Russia), M.D., Doctor of Psychology, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation (Saint Petersburg, Russian Federation)

Natal'ya K. Shandala — Federal Medical Biophysical Center after A.I. Burnasyan of Federal Medical Biological Agency of Russia, M.D., Professor (Moscow, Russian Federation)

СОДЕРЖАНИЕ

Том 12 № 2, 2019

ОБЗОРЫ

Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В.,
Башкетова Н.С., Историк О.А., Чипига Л.А., Шацкий И.Г.,
Сарычева С.С., Библин А.М., Репин Л.В.

**Современные принципы обеспечения
радиационной безопасности при использовании
источников ионизирующего излучения
в медицине. Часть 2. Радиационные риски
и совершенствование системы радиационной
защиты.....** 6

Мироненко О.В., Балтрукова Т.Б., Башкетова Н.С.,
Горский Г.А., Крюкова Т.В., Федорова Е.А.

**Гигиенические требования к проектированию
центров и отделений позитронно-эмиссионной
томографии.....** 25

Романович И.К., Кормановская Т.А., Королева Н.А.,
Сапрыкин К.А.

**Обоснование методологических и методических
подходов к оценке доз облучения населения,
проживающего в зоне влияния объектов ядерного
и радиационного наследия 34**

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Andersson M., Eckerman K., Pawel D., Almén A., Mattsson S.
**Improved radiation risk models applied to different
patient groups in Sweden.....** 44

Голиков В.Ю.

**Метод и компьютерная программа расчета доз
фотонного излучения в фантомах тела человека 55**

Дёгтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Заляпин В.И.,
Шарагин П.А., Смит М.А., Напье Б.А.

**Методологический подход к разработке
дозиметрических моделей скелета человека для
бета-излучающих радионуклидов 66**

Титов Н.В.

**Возможность применения дозиметров со счетчиком
Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного
излучения..... 76**

Храмцов Е.В.

**Радиационная обстановка на территории
проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1»
до выполнения реабилитационных работ..... 81**

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАДИАЦИОННОЙ ГИГИЕНЕ

Рыбников В.Ю., Тарита В.А., Роголев К.К.

**Подготовка медицинского персонала МЧС России
к реагированию на радиационные аварии с
использованием дистанционного обучения 89**

Киселев С.М., Маренный А.М., Романов В.В.

**Радон. Современные подходы к регулированию
радиационной безопасности населения 94**

ЮБИЛЕЙ..... 103

НЕКРОЛОГ..... 106

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 109**

CONTENTS

Vol. 12 № 2, 2019

REVIEWS

Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovатов A.V.,
Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G.,
Sarycheva S.S., Biblin A.M., Repin L.V.

**Modern principles of the radiation protection from
sources of ionizing radiation in medicine.
Part 2: radiation risks and development
of the system of radiation protection.....** 21

Mironenko O.V., Baltrukova T.B., Bashketova N.S.,
Gorskiy G.A., Kryukova T.V., Fedorova E.A.

**Hygienic requirements to the design of the positron-
emission tomography centers and departments.....** 32

Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Koroleva N.A.,
Saprykin K.A.

**Justification of the methodical approaches
to the assessment of the doses of the public residing
in the zone of influence of the facilities of the nuclear
and radiation legacy.....** 42

RESEARCH ARTICLES

Андерссон М., Эккерман К., Павел Д., Алмен А., Маттссон С.
**Улучшенные модели оценки радиационного риска
для отдельных когорт пациентов в Швеции 44**

Golikov V.Yu.

**Method and software for photon dose calculation
in phantoms of human body 64**

Degteva M.O., Shishkina E.A., Tolstykh E.I., Zalyapin V.I.,
Sharagin P.A., Smith M.A., Napier B.A.

**Methodological approach to development
of dosimetric models of the human skeleton
for beta-emitting radionuclides 74**

Titov N.V.

**Prospects for the use of the dosimeters with
Geiger-Muller counters for the dosimetry
of the pulse emission 80**

Khrantsov E.V.

**Radiation situation on the territory of the peaceful
nuclear explosion «Globus-1» before performing the
rehabilitation works..... 87**

TRAINING SPECIALISTS BY RADIATION HYGIENE

Rybnikov V.Yu., Tarita V.A., Rogalev K.K.

**Training of medical personnel of EMERCOM of Russia
to respond to the emergency situations of radiation
nature using the distance learning 92**

Kiselev S.M., Marennyy A.M., Romanov V.V.

**Radon. Advanced regulatory approaches to public
radiation protection..... 100**

ANNIVERSARY 103

OBITUARY 106

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 109**

Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине.

Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты

Г.Г. Онищенко^{1,6}, А.Ю. Попова^{2,7}, И.К. Романович³, А.В. Водоватов³, Н.С. Башкетова⁴, О.А. Историк⁵, Л.А. Чипига³, И.Г. Шацкий³, С.С. Сарычева³, А.М. Библин³, Л.В. Репин³

¹ Российская академия наук, Москва, Россия

² Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Россия

⁷ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 13.10.2018 г. № 585, основными направлениями обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации при использовании источников ионизирующего излучения в медицине являются гармонизация отечественных нормативно-методических документов с международными рекомендациями, а также разработка новых и совершенствование существующих методов оценки индивидуальных доз облучения пациентов и соответствующих им рисков развития радиационных раков. Данная работа посвящена обоснованию комплекса мероприятий по недопущению необоснованного облучения населения страны при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях. Для этого был выполнен анализ существующих отечественных и зарубежных подходов к оценке радиационных рисков от медицинского облучения и результатов имеющихся эпидемиологических исследований; оценены риски от наиболее распространенных и/или высокодозовых рентгенорадиологических исследований (компьютерная томография, интервенционные исследования, ядерная медицина) для взрослых пациентов и детей. Показано, что данные исследования относятся к категориям «низкого» и «умеренного» радиационного риска. Уровень пожизненного радиационного риска заболеваемости злокачественными новообразованиями в Российской Федерации для компьютерной томографии составляет 1 случай на 3–30 тыс. исследований. Выполненный анализ существующих зарубежных регулирующих и нормативно-методических документов показал наличие существенных различий в практике радиационной защиты в медицине. Так, в зарубежной практике особое внимание уделяется практической реализации принципа обоснования путем применения критериев обоснования назначения рентгенорадиологических исследований и различных методов риск-коммуникации с пациентами. Широко используется принцип оптимизации, основанный на концепции референтных диагностических уровней и программах обеспечения качества проведения рентгенорадиологических исследований. При этом основной объем мероприятий по снижению доз облучения пациентов и повышению качества диагностических изображений выполняется на уровне медицинских организаций медицинскими физиками совместно с медицинским персоналом и производителями оборудования для лучевой диагностики. Отдельно следует отметить отсутствие ограничения доз облучения практически здоровых лиц при проведении скрининговых исследований. По итогам сравнения отече-

Водоватов Александр Валерьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vodovattoff@gmail.com

твенной и зарубежных практик радиационной защиты в медицине были разработаны как общие, так и частные (по отдельным видам лучевой диагностики) основные направления совершенствования системы радиационной защиты пациентов и персонала. Данные направления целесообразно реализовать на практике в виде комплексной программы по оптимизации радиационной защиты населения Российской Федерации при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях. Такая программа может быть разработана и реализована при взаимодействии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Ключевые слова: лучевая диагностика, радиационный риск, оптимизация, обоснование, обеспечение качества, защита пациентов от медицинского облучения.

Введение

В первой части статьи [1] нами представлены тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения населения Российской Федерации в сравнении с мировыми. Согласно выполненной в [1] прогностической оценке трендов изменения коллективной дозы от медицинского облучения, в ближайшее десятилетие ожидается ее рост в два раза за счет увеличения вклада высокодозных исследований и роста средних доз на исследование. Значительный рост индивидуальных доз пациентов и коллективной дозы облучения населения Российской Федерации приведет к значительному росту радиационных рисков.

В Указе Президента Российской Федерации от 13.10.2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»¹ впервые на государственном уровне определены основные направления реализации государственной политики по обеспечению радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения (ИИИ) в медицине. К ним относятся:

- разработка и применение средств и методов оценки индивидуальных доз облучения и радиационных рисков при использовании радиационных технологий медицинского назначения, ядерной медицины и радиофармацевтики, а также при визуализации человека с использованием ионизирующего излучения;
- подготовка в соответствии с международными требованиями стандартов безопасности в области радиационных технологий медицинского назначения, ядерной медицины и радиофармацевтики, а также нормативных документов, регламентирующих вопросы радиационной безопасности при осуществлении медицинской деятельности;
- проведение широкомасштабных исследований уровня облучения и состояния здоровья пациентов и медицинского персонала в условиях массового использования новых методов лучевой диагностики и терапии, в том числе методов, применяемых в ядерной медицине.

Для реализации задач, поставленных Указом Президента Российской Федерации от 13.10.2018 г. № 585, и гармонизации отечественных нормативно-методических документов (НМД) с международными необходимо разработать комплекс мероприятий по недопущению необоснованного облучения населения страны при использовании ИИИ в медицинских целях и закрепить их в Нормам радиационной безопасности, проект которых разрабатывается в настоящее время.

1. Радиационные риски в лучевой диагностике

Медико-биологические последствия облучения человека разделяются на детерминированные (тканевые реакции) и стохастические (вероятностные) [2]. Детерминированные эффекты могут наблюдаться при некоторых процедурах лучевой диагностики: ожоги кожи после интервенционных процедур (ангиография) и выпадение волос на голове после многократных КТ-исследований черепа [3–6]. Данных эффектов можно избежать при грамотном планировании проведения интервенционных исследований (сокращение времени облучения пациента, контроль кожной дозы, облучение анатомической зоны исследования в разных проекциях и др.) и сокращении числа повторных высокодозовых исследований [3–6].

В области радиационной защиты в медицине в первую очередь интерес представляют радиобиологические эффекты облучения в малых дозах, которые вообще не приводят к развитию детерминированных медико-биологических эффектов. Это справедливо практически для всех современных ситуаций облучения персонала и населения, а также для подавляющей части пациентов, проходящих процедуры лучевой диагностики. В современной концепции радиационной защиты к «малым» дозам относят дозы до 0,1 Зв [2]. В этот диапазон попадают все виды и методы лучевой диагностики (МР 2.6.1.0098-15²). Сведения об уровнях радиационного риска от основных видов рентгенодиагностических исследований (РПИ) и соответствующих им диапазонов эффективных доз для пациентов-детей и взрослых пациентов представлены в таблицах 1–3.

¹ Указ Президента РФ от 13.10.2018 № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_308884/ (Дата обращения: 20.04.2019) [The decree of the President of the Russian Federation №585, 13.10.2018, "On the establishment of the Basics of the governmental policy on the provision of the nuclear and radiation safety of the Russian Federation up to 2025 and in the further perspective". – Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_308884/ (Accessed: 06.02.2019)]

² Методические рекомендации «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований». МР 2.6.1.0098-15: <http://niirg.ru/PDF/MR-2.6.1.0098-15.pdf> (Дата обращения: 24.04.2019 г.) [Methodical guidelines "Assessment of the radiation risk of the patients from diagnostic X-ray examinations" MR 2.6.1.0098-15. - Available from: <http://niirg.ru/PDF/MR-2.6.1.0098-15.pdf> (Accessed: 24.04.2019.)]

Таблица 1

Диапазоны эффективной дозы (мЗв), соответствующие уровням радиационного риска

[Table 1]

Effective dose range (mSv), corresponding to different levels of radiation risk

Категория радиационного риска, отн. ед. [Category of radiation risk, rel. units.]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]		
	Дети и подростки (до 18 лет) [Children (under 18 years)]	Взрослые (18–64 года) [Adults (18–64 years)]	Лица старшего возраста (65 лет и более) [Older persons (65 years and over)]
Пренебрежимый [Negligible] ($< 10^{-6}$)	$< 0,01$	$< 0,02$	$< 0,2$
Минимальный [Minimal] ($10^{-6} - 10^{-5}$)	0,01–0,1	0,02–0,2	0,2–2
Очень низкий [Very low] ($10^{-5} - 10^{-4}$)	0,1–1	0,2–2	2–20
Низкий [Low] ($10^{-4} - 10^{-3}$)	1–10	2–20	20–200
Умеренный [Moderate] ($10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$)	10–30	20–60	200–500
Существенный [Significant] ($3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$)	30–100	60–200	–

Таблица 2

Классификация рентгенологических исследований по радиационному риску у пациентов разных возрастных групп

[Table 2]

Classification of the X-ray examinations by the radiation risk for the patients of different age groups

Категория радиационного риска, отн. ед. [Category of radiation risk, rel. units.]	Рентгенологические исследования [X-ray examinations]		
	Дети и подростки (до 18 лет) [Children (under 18 years)]	Взрослые (18–64 года) [Adults (18–64 years)]	Лица старшего возраста (65 лет и более) [Older persons (65 years and over)]
Пренебрежимый [Negligible] ($< 10^{-6}$)	Конечности, прицельные дентальные снимки [Radiography of the extremities [Intraoral dental X-ray images]	Конечности; костная денситометрия; прицельные дентальные снимки [Radiography of the extremities Bone densitometry; Intraoral dental X-ray images]	Череп, ОГК, ШОП, конечности; Костная денситометрия; цифровые флюорограммы; прицельные и панорамные дентальные снимки [Radiography of the skull, chest, cervical spine, extremities; Bone densitometry; Digital fluorography Intraoral and panoramic dental X-ray images]
Минимальный [Minimal] ($10^{-6} - 10^{-5}$)	Череп, ОГК, ШОП; цифровые флюорограммы панорамные дентальные снимки [Radiography of the skull, chest, cervical spine; Digital fluorography Panoramic dental X-ray images]	Череп, ОГК, ШОП; цифровые флюорограммы панорамные дентальные снимки [Radiography of the skull, chest, cervical spine; Digital fluorography Panoramic dental X-ray images]	Ребра и грудина, ГОП, ПОП, БП, таз, почки, мочевыводящая система; плеченные флюорограммы; литотрипсия; маммография; дентальная КТ [Radiography of the ribs and sternum, thoracic spine, lumbar spine, abdomen, pelvis, kidneys, urinary system; Film fluorography; Lithotripsy; Mammography Dental CT]

Категория радиационного риска, отн. ед. [Category of radiation risk, rel. units.]	Рентгенологические исследования [X-ray examinations]		
	Дети и подростки (до 18 лет) [Children (under 18 years)]	Взрослые (18–64 года) [Adults (18–64 years)]	Лица старшего возраста (65 лет и более) [Older persons (65 years and over)]
Очень низкий [Very low] (10^{-5} – 10^{-4})	ГОП, ПОП, БП, таз; плеченные флюорограммы, дентальная КТ, интервенционные исследования (диагностика и терапия) [Radiography of the thoracic spine, lumbar spine, abdo- men, pelvis; Film fluorography Dental CT All types of interventional examinations (diagnostic and therapeutic)]	Ребра и грудина, ГОП, ПОП, БП, таз, почки, мочевыводящая система; плеченные флюорограммы; литотрипсия; маммография дентальная КТ [Radiography of the ribs and ster- num, thoracic pine, lumbar spine, abdomen, pelvis, kidneys, urinary system; Film fluorography; Lithotripsy; Mammography Dental CT]	Рентгеноскопия ОГК, желудка, кишечника КТ черепа, органов грудной клетки, брюшной полости, таза и бедра; интервенционные исследования (диагностика и терапия) [Fluoroscopy of the chest, stomach, intestine CT of the skull; thorax; abdomen; pelvis and hip]
Низкий [Low] (10^{-4} – 10^{-3})	Рентгеноскопия ОГК, желудка, кишечника; КТ черепа, органов грудной клетки, брюшной полости [Fluoroscopy of the chest, stomach, intestine CT of the skull; thorax; abdomen All types of interventional examinations (diagnostic and therapeutic)]	Рентгеноскопия ОГК, желудка, кишечника; КТ черепа, органов грудной клетки, брюшной полости, таза и бедра; интервенционные исследования (диагностика и терапия) [Fluoroscopy of the chest, stom- ach, intestine CT of the skull; thorax; abdomen; pelvis and hip All types of interventional examinations (diagnostic and therapeutic)]	Интервенционные исследования (диагностика и терапия) [All types of interventional examinations (diagnostic and therapeutic)]

ОГК – органы грудной клетки; ШОП – шейный отдел позвоночника; ГОП – грудной отдел позвоночника; ПОП – пояснично-крестцовый отдел позвоночника; БП – брюшная полость; КТ – компьютерная томография
[Note: CT – computed tomography]

Таблица 3

Классификация радионуклидных исследований по радиационному риску у пациентов разных возрастных групп

[Table 3]

Classification of the nuclear medicine examinations by the radiation risk for the patients of different age groups

Категория радиационного риска, отн. ед. [Category of radiation risk, rel. units.]	Радионуклидные исследования [Nuclear medicine examinations]		
	Дети и подростки (до 18 лет) [Children (under 18 years)]	Взрослые (18–64 года) [Adults (18–64 years)]	Лица старшего возраста (65 лет и более) [Older persons (65 years and over)]
Пренебрежимый [Negligible] ($< 10^{-6}$)			Ренография; функция поглощения йода в щитовидной железе [Renography; Iodine uptake in thyroid]
Минимальный [Minimal] (10^{-6} – 10^{-5})	Ренография [Renography]	Ренография; функция поглощения йода в щитовидной железе [Renography; Iodine uptake in thyroid]	СЦГ почек, легких, печени [Scintigraphy of the kidneys, lungs, liver]

Категория радиационного риска, отн. ед. [Category of radiation risk, rel. units.]	Радионуклидные исследования [Nuclear medicine examinations]		
	Дети и подростки (до 18 лет) [Children (under 18 years)]	Взрослые (18–64 года) [Adults (18–64 years)]	Лица старшего возраста (65 лет и более) [Older persons (65 years and over)]
Очень низкий [Very low] (10^{-5} – 10^{-4})	СЦГ почек [Scintigraphy of the kidneys]	СЦГ почек, легких, печени [Scintigraphy of the kidneys, lungs, liver]	СЦГ почек, легких, печени СЦГ и сканирование ЩЖ; СЦГ, ОФЭКТ сердца; ОФЭКТ, ПЭТ головного мозга; СЦГ, ОФЭКТ, ПЭТ всего тела; ПЭТ/КТ головного мозга и всего тела [Scintigraphy of the kidneys, lungs, liver; Scintigraphy of the and thyroid scan; Scintigraphy of the, SPECT of the heart; SPECT, PET of the brain; Scintigraphy, SPECT, PET of the whole body; PET / CT of the brain and body]
Низкий [Low] (10^{-4} – 10^{-3})	СЦГ сердца, печени, скелета, почек; СЦГ и сканирование щитовидной железы; СЦГ, ПЭТ всего тела; ПЭТ головного мозга; ПЭТ/КТ головного мозга [Scintigraphy of the heart, liver, skeleton, kidneys; Scintigraphy and thyroid scan; Scintigraphy and PET of the whole body; PET of the brain; PET / CT of the brain]	СЦГ скелета, почек, СЦГ и сканирование ЩЖ; СЦГ, ОФЭКТ сердца, ОФЭКТ, ПЭТ головного мозга, СЦГ, ОФЭКТ, ПЭТ всего тела; ПЭТ/КТ головного мозга и всего тела [Scintigraphy of the skeleton, kidneys; Scintigraphy and thyroid scan; Scintigraphy, SPECT of the heart; SPECT and PET of the brain; Scintigraphy, SPECT, PET of the whole body; PET / CT of the brain and whole body]	
Умеренный [Moderate] (10^{-3} – $3 \cdot 10^{-3}$)	ОФЭКТ / КТ скелета; ПЭТ/КТ всего тела [SPECT / CT of the skeleton; PET / CT of the whole body]		

СЦГ – сцинтиграфия; ОФЭКТ – однофотонная эмиссионная компьютерная томография; ПЭТ – позитронно-эмиссионная томография
[Note: SPECT – Single Photon Emission Computed Tomography; PET – Positron Emission Tomography]

«Низкому» уровню радиационного риска (10^{-4} – 10^{-3}) соответствует пожизненная вероятность возникновения 1 злокачественного новообразования среди 10 000–1000 обследованных пациентов, а «умеренному» (10^{-3} – $3 \cdot 10^{-3}$) – 1–3 случая на 1000 обследованных пациентов. Как следует из представленных данных, все современные высокоинформативные диагностические методы (КТ, ядерная медицина, интервенционные исследования) относятся к категории «низкого», а у детей и «умеренного» риска, что еще раз указывает на необходимость оптимизации защиты пациентов и сокращения/исключения необоснованных исследований. Выполненные в Российской Федерации исследования [7, 8] указывают на уровни пожизненного радиационного риска заболеваемости злокачественными новообразованиями в размере 1 случая на 3–30 тыс. КТ-исследований.

В Российской Федерации на данный момент отсутствуют доступные достоверные данные по половозрастным распределениям пациентов и видам выполненных РРИ, что не позволяет провести корректную оценку радиационного риска от медицинского облучения. Консервативная оценка радиационного риска для целей радиационно-гигиенической паспортизации выполняется по величине коллективной дозы от медицинского облучения с использованием номинального коэффициента пожизненного радиационного риска, равного $5,7 \times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$ для лиц любого пола и возраста. Для коллективной дозы в 80,3 тыс. чел $\times$ Зв за 2017 г. вероятность пожизненного радиационного риска заболеваемости злокачественными новообразованиями составляет 4577 случаев [7, 8].

В международной практике выявление и количественная оценка радиационно-индуцированных канцерогенных эффектов являются чрезвычайно актуальны-

ми в свете продолжающихся дискуссий о воздействии ионизирующего излучения в малых дозах на организм человека. На 2019 г. было выполнено 7 крупномасштабных когортных исследований [9–15]. В основе данных исследований лежала оценка радиационного риска от компьютерно-томографических исследований, выполненных детям и подросткам в возрасте 0–22 лет. Дети, особенно те, которым КТ выполнялась сразу после рождения, являются оптимальной категорией для подобных эпидемиологических исследований, так как: а) они являются более чувствительными к воздействию ионизирующего излучения; б) имеют больший период дожития по сравнению со взрослыми.

Научным сообществом проанализированы данные, полученные в указанных радиационно-эпидемиологических исследованиях, и сделаны заключения, что в работах [9, 10, 11] следует учитывать существенные недостатки дизайнов исследований [16, 17, 18]:

- различные критерии включения участников в когорты;
- различные подходы к оценке органных доз от КТ-исследований;
- отсутствие реконструкции доз облучения пациентов, полученных ими до начала периода проведения исследования;
- ограниченный учет всех случаев облучения / КТ-исследований пациентов (не учитывались исследования, выполненные в частных клиниках, не входящих в страховые системы [10], повторные исследования, связанные с получением диагностической информации ненадлежащего качества [9–11] и др.);
- отсутствие учета показаний для проведения КТ-исследований (выполнялось ли это исследование в связи с подозрением на онкологическое заболевание) [16–18];
- отсутствие учета ложно-отрицательных результатов КТ-исследований [16–18];
- отсутствие учета факторов предрасположенности к развитию онкозаболеваний в когортах [16–18].

Представленные недочеты являются причиной низкой достоверности результатов первых трех когортных исследований [16–18]. Эпидемиологические исследования, выполненные в Нидерландах, Франции и Германии [12–14], частично учитывают вышеуказанные недостатки. В частности, из когорт были исключены пациенты, направленные на КТ-исследования в связи с подозрением на возможную онкологию. Современные эпидемиологические исследования [15] в первую очередь направлены на разработку и обеспечение стандартизированной методологии организации когорт, сбора и обработки первичных данных.

К сожалению, результаты проведенных эпидемиологических исследований на текущий момент не позволяют разработать эпидемиологические модели радиационных рисков от медицинского облучения. Есть основания полагать, что такие модели появятся в ближайшие годы. Проведение аналогичных исследований актуально и в Российской Федерации.

2. Современные мировые тенденции в радиационной защите в медицине

Современная практика радиационной защиты в медицине основывается на руководящих документах МАГАТЭ:

Основных нормах безопасности МАГАТЭ (GSR Part 3) [19] и Стандарта безопасности МАГАТЭ «Радиационная защита и безопасность при использовании ионизирующего излучения в медицинских целях» (SSG-46) [20], которые, в свою очередь, основаны на публикациях МКРЗ [2–4, 21, 22] и отчетах НКДАР ООН [23]. Следует отдельно отметить серию документов МКРЗ и МАГАТЭ по обеспечению качества и защите пациентов при проведении лучевой и радионуклидной терапии [24–26]. Основной акцент в данных документах сделан на обеспечении качества в лучевой терапии (калибровке оборудования, разработке планов лечения, обеспечивающих минимальное облучение радиочувствительных органов, находящихся рядом с органом-мишенью) и предотвращении радиационных аварий, приводящих к переоблучению пациентов.

В соответствии с данными документами разрабатываются европейские директивы [27, 28], в которых прописаны основные общие требования к разработке национального законодательства в области радиационной защиты в медицине с учетом межнациональных стандартов по информационным технологиям [29], стандартов производителей медицинского оборудования [30].

Международная система радиационной защиты в медицине основывается на принципах обоснования и оптимизации.

Принцип обоснования заключается в обеспечении преобладания пользы над вредом для здоровья пациента при проведении рентгенорадиологических исследований (РРИ) с учетом радиационного вреда, наносимого медицинскому персоналу или другим лицам [2, 21]. В данном принципе заложен основной потенциал снижения доз пациентов от медицинского облучения за счет исключения необоснованных РРИ и выбора исследований, проводимых без применения ионизирующего излучения. На практике принцип обоснования реализуется посредством разработки и внедрения критериев обоснования назначений РРИ (стандартов диагностики), которые разрабатываются профессиональными медицинскими сообществами совместно со специалистами по радиационной защите. В зарубежной практике разработаны, утверждены и внедрены различные системы критериев обоснования назначений: iRefer (Великобритания) [31], рекомендации Американского колледжа радиологов (США) [32], Европейские критерии обоснования назначений (Евросоюз) [33] и др. Изначально данные системы разрабатывались на национальном уровне; однако прослеживается тренд на их унификацию. Так, с 2016 г. Евросоюз перешел на использование рекомендаций Американского колледжа радиологов [34]. Особенности данных критериев являются:

- выбор методов лучевой диагностики в соответствии с их доказанной диагностической эффективностью (по данным мета-анализа публикаций за последние 5 лет);
- постоянная актуализация критериев по мере внедрения новых методов лучевой диагностики;
- дополнение критериев типовыми протоколами проведения РРИ;
- наличие сведений о радиационном риске для пациента или значений стандартных (типичных) эффективных доз пациентов для каждого из рекомендованных РРИ;
- внедрение критериев в систему электронного документооборота медицинских организаций (больничные

информационные системы, системы поддержки принятия клинических решений).

Опыт внедрения крупными зарубежными медицинскими центрами радиологических информационных систем, включающих в себя критерии обоснования назначений, позволяет судить о существенном снижении (на 20–30%) числа необоснованных или неоптимальных РРИ [35–37].

Неотъемлемой составляющей принципа обоснования в зарубежной практике является риск-коммуникация – процесс информационного взаимодействия между специалистами и пациентами или специалистов между собой по вопросам выбора наиболее подходящего метода диагностики и обеспечения радиационной защиты пациентов [38–40]. Риск-коммуникация как элемент анализа риска влияет на принятие решений (как врачами, так и пациентами) относительно применения тех или иных методов диагностики или лечения [38, 41–44]. Вопросы риск-коммуникации (в том числе информирования пациентов) рассматриваются в основных международных [38, 39] и национальных нормативных документах. Актуальность риск-коммуникации в зарубежной практике обусловлена следующими факторами [41–46]:

- предвзятым отношением к ИИИ (радиотревожность) у отдельных пациентов/групп пациентов, в первую очередь у родителей, законных представителей пациентов-детей;

- наличием различных установок об эффективности использования тех или иных методов диагностики и соотвествующих им радиационным рискам у специалистов (лечащих врачей, врачей-рентгенологов и др.);

- необходимостью информировать пациентов о методике и возможных побочных эффектах от проведения РРИ с целью получения добровольного информированного согласия пациента.

Коммуникация с пациентом о рисках тех или иных медицинских процедур за рубежом, как правило, относится к компетенции лечащего врача, который и обосновывает, и назначает РРИ.

Принцип оптимизации заключается в обеспечении полезного медицинского эффекта рентгенорадиологических процедур, диагностической информации высокого качества или лечебного результата при наименьших возможных уровнях облучения [2, 19–21]. Общепринятым в мировой практике является комплексный процесс оптимизации защиты [2, 19–21], реализуемый на двух уровнях: общем, на уровне государства или отдельного региона, посредством установления референтных диагностических уровней (РДУ) [2, 19–21]; и частном, на уровне отдельной медицинской организации или отделения лучевой диагностики, посредством управления дозами пациентов и обеспечения качества проведения РРИ [47, 48]. Как правило, используется следующая последовательность этапов проведения оптимизации выбранного РРИ [49]:

- определение стандартных (типичных) доз облучения пациентов от данного РРИ в репрезентативном количестве МО;

- установление РДУ для данного РРИ как 75% перцентиля распределения стандартных доз облучения пациентов;

- определение рентгеновских кабинетов с аномально высокими или низкими дозами путем сравнения стандартных доз пациентов для данного РРИ с соответствующими значениями РДУ;

- проведение расследования причин аномально высоких или низких доз пациентов в отдельных рентгеновских кабинетах, выявление факторов, обуславливающих аномально высокие или низкие дозы, и их коррекция с установкой новых методик работы медицинского персонала;

- оценка возможности использования предложенных методик на практике;

- повторное определение стандартных доз, установление новых РДУ.

РДУ устанавливаются как на национальном, так и на региональном уровнях; допускается установление локальных РДУ для крупных МО. Ответственными за установление РДУ являются национальные организации, отвечающие за радиационную защиту, или министерства здравоохранения.

Сбор данных и оценка стандартных (typical) эффективных доз облучения пациентов для установления РДУ в практике зарубежных стран производится периодически, с интервалом в 5–10 лет [50, 51].

В большинстве европейских стран учет параметров проведения РРИ и доз облучения пациентов осуществляется на локальном (в рамках одной медицинской организации), региональном или национальном уровне путем применения радиологических информационных систем (РИС) или цифровых баз данных по рентгеновским изображениям (PACS) [52–55]. В подобных системах осуществляется сбор и учет персональных данных пациентов, параметров проведения выполненных РРИ, индивидуальных доз облучения пациентов, а также хранение результатов (изображений и их описаний) для всех видов лучевой диагностики. Такая информация доступна всем авторизованным пользователям в регионе/стране (лечащим врачам, врачам-рентгенологам, медицинским физикам, специалистам по радиационной безопасности и др.), что позволяет значительно ускорить процесс обмена диагностической информацией и вести централизованный учет и анализ параметров работы рентгенодиагностического оборудования и уровней облучения пациентов. Использование подобных систем сбора данных также значительно упрощает проведение эпидемиологических исследований. Недостатками таких систем являются чрезвычайно высокая стоимость их внедрения и технической поддержки, а также необходимость унификации аппаратного парка в различных медицинских организациях.

Основной объем работ по оценке уровней облучения пациентов в зарубежной практике выполняется на уровне медицинской организации. Все рентгеновские аппараты оснащены клиническими дозиметрами, что позволяет проводить оценку индивидуальных доз облучения пациентов. Более 90% рентгеновских аппаратов являются цифровыми и объединены в рамках МО в единую систему PACS или РИС, что позволяет вести сбор и учет данных в автоматическом режиме. Ответственными за дозиметрию и выполнение оптимизационных мероприятий являются медицинские физики. Регистрируемый объем данных позволяет своевременно выявлять отклонения в работе персонала и оборудования, приводящие к повышению доз облучения пациентов или снижению диагностического качества рентгеновских изображений. Дозы облучения регистрируются и анализируются не только для стандартных пациентов (с массой тела 70 ± 3 кг), но и

для пациентов с различными антропометрическими характеристиками (гипо- и гиперстеников, лиц с избыточной массой тела и др.) [56].

На локальном уровне (уровень МО) принцип оптимизации реализуется путем разработки и внедрения низкодозовых протоколов проведения РРИ, обеспечивающих необходимое для постановки диагноза качество изображения. Ответственными за процесс оптимизации являются медицинские физики во взаимодействии с медицинским персоналом и с представителями производителей рентгеновской техники (сервисными инженерами). При этом медицинские физики отвечают за измерение и анализ доз облучения пациентов и оптимизацию проведения РРИ; сервисные инженеры – за техническую настройку рентгеновского оборудования и внедрение предложенных низкодозовых протоколов; медицинский персонал – за оценку применимости предложенных низкодозовых протоколов в практике (оценку качества изображения). Следует отметить комплексный подход к обеспечению диагностического качества изображений, сочетающий два направления: техническое, путем контроля физико-технических параметров изображения; и диагностическое, путем обязательной систематической экспертной оценки качества изображений.

В зарубежной практике широко применяются различные методы экспертной оценки диагностического качества изображений, основанные на поиске различных патологий (ROC, FROC [57, 58]) или оценке соответствия рентгеновского изображения заданным критериям качества (Image criteria [59]). Разработаны отдельные рекомендации по оценке качества изображений при проведении рентгенографических, рентгеноскопических, радионуклидных и компьютерно-томографических исследований для взрослых пациентов и пациентов-детей [60, 61].

Оценка текущего состояния лучевой диагностики и радиационной защиты в зарубежной практике реализуется главным образом в ходе клинического аудита медицинских организаций – процесса, в рамках которого группа внешних экспертов оценивает степень соответствия текущего состояния диагностического процесса в МО установленным стандартам и, в случае несоответствия, предлагает комплекс мероприятий по улучшению практики [62].

Следует обратить внимание на роль производителей рентгеновской техники в процессах оптимизации и обеспечения качества РРИ. Неотъемлемой составляющей поставки и размещения оборудования является сервисное обслуживание от производителя, которое осуществляется непрерывно в течение всего срока эксплуатации оборудования. Таким образом, полностью исключается возможность эксплуатации неисправного оборудования. Сервисное обслуживание также включает в себя меро-

приятия по обеспечению качества. Производитель отвечает за проведение надлежащего обучения медицинского персонала, который будет эксплуатировать оборудование, медицинских физиков и/или инженеров, находящихся в штате МО [62–64].

В современных международных рекомендациях принцип ограничения доз при использовании ИИИ в медицине не применяется, так как его использование может негативно сказаться на качестве оказания медицинской помощи пациентам. Так, Публикации МКРЗ 103 [2] и 105 [21] констатируют, что медицинское облучение носит намеренный и добровольный характер при условии, что оно принесет прямую пользу здоровью пациента. В Нормах безопасности МАГАТЭ GSR part 3 [19] и в Стандарте безопасности SSG-46 [20] предложен новый подход. Для РРИ, которые проводятся для профессиональных и юридических целей, лицам, участвующим в биомедицинских исследованиях, рекомендовано использование граничных доз. Граничные дозы не являются пределами дозы, и превышение граничной дозы не означает несоответствия установленным требованиям, однако в случае каждого такого превышения необходимо проводить расследование.

3. Особенности нормативно-методического обеспечения радиационной защиты пациентов в РФ

Основные требования по обеспечению радиационной безопасности персонала и пациентов при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях в Российской Федерации регламентируются Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009³) и СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»⁴. Раздел 5.4 «Ограничение медицинского облучения» в НРБ-99/2009 и раздел IV «Радиационная безопасность при медицинском облучении» ОСПОРБ-99/2010 практически полностью гармонизированы с Публикацией МКРЗ 103 [2].

Однако отечественное нормативно-методическое обеспечение радиационной защиты пациентов имеет свои особенности. Так, в соответствии с пунктом 5.4.4 НРБ-99/2009, «при проведении обоснованных медицинских рентгенорадиологических обследований в связи с профессиональной деятельностью или в рамках медико-юридических процедур, а также рентгенорадиологических профилактических медицинских и научных исследований практически здоровых лиц, не получающих прямой пользы для своего здоровья от процедур, связанных с облучением, годовая эффективная доза не должна превышать 1 мЗв».

Ограничение доз медицинского облучения добровольцев на уровне 1 мЗв при прохождении биомедицинских исследований (в первую очередь клинических испытаний

³ Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 N 14534: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ (Дата обращения 11.08.2018) [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. – Available on: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ (Accessed: 11.08.2018)]

⁴ Санитарные правила и нормы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)»: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103742/ (Дата обращения 11.08.2018) [Sanitary rules and norms SP2.6.1.2612-10 “Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010)”. – Available on: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103742/ (Accessed: 11.08.2018)]

новых видов и методов лучевой диагностики, фармакотерапии и пр.) практически не позволяет применять компьютерную томографию, радионуклидную диагностику, гибридные методы исследований, дозы при которых существенно выше этого порога [65]. В первом сообщении [1] нами представлены современные тенденции развития лучевой диагностики, в том числе применения новых технологий лучевой диагностики для скрининга значимых заболеваний (низкодозовая компьютерная томография органов грудной клетки (НДКТ) для скрининга рака легких, томосинтез (3D-маммография) молочной железы для скрининга рака молочной железы, КТ-ангиография коронарных артерий для скрининга заболеваний сердца и пр.). Ожидаемое внедрение данных технологий приведет к гарантированному превышению доз от профилактических (скрининговых) исследований 1 мЗв [65].

Целесообразно для защиты категории практически здоровых лиц использовать принципы оптимизации и обоснования. Для добровольцев, участвующих в биомедицинских исследованиях (как для практически здоровых лиц, так и для пациентов), целесообразно устанавливать граничные дозы в соответствии с ожидаемым эффектом исследования [19, 20]. Данные граничные дозы должны устанавливаться при разработке дизайна биомедицинского исследования и утверждаться соответствующим этическим комитетом. При проведении долгосрочных исследований (на срок более 1 года) граничные дозы должны устанавливаться как на 1 год, так и на весь период проведения исследования [19, 20].

3.1. Принцип обоснования

В Российской Федерации назначение РРИ регламентируется набором различных нормативно-методических документов: приказами Министерства здравоохранения, медико-экономическими стандартами и рекомендациями национальных ассоциаций. Анализ отечественных НМД свидетельствует о значительной вариативности применяемых видов исследований для одной и той же нозологии. Документы между собой не согласованы. Преобладают традиционные методы лучевой диагностики (рентгенография, УЗИ). Современные виды лучевой диагностики (компьютерная томография и радионуклидная диагностика), по сравнению с зарубежными НМД, представлены ограниченно. Особенности отечественных НМД являются показатели частоты и кратности применения различных видов РРИ – для всех современных методов лучевой диагностики они ниже единицы. Также в них отсутствуют сведения о доказанной диагностической эффективности (за исключением федеральных клинических рекомендаций) и информация о радиационном вреде (риске) от использования ионизирующего излучения в медицине для пациентов.

Для дополнения НМД Министерства здравоохранения ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в 2015 г. были разработаны и утверждены методические рекомендации «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований». В данных методи-

ческих рекомендациях содержатся сведения о категориях радиационного риска и диапазонах эффективных доз для наиболее распространенных РРИ для различных возрастных категорий пациентов; представлены различные методы оценки радиационного риска. Однако на практике данный документ не нашел должного применения.

Существующий подход к обоснованию проведения РРИ заключается в сравнении эффективных доз (или соответствующих им радиационных рисков) для возможных методов лучевой диагностики, связанных или не связанных с применением ионизирующего излучения [2, 20, 21, 41–46]. Для информирования пациентов риски от проведения РРИ сравниваются с различными бытовыми рисками. Для обоснования выбора РРИ рекомендуется также учитывать частоту и характер возможных негативных последствий для здоровья пациентов при выборе альтернативных методов или отказа от проведения исследований.

В настоящий момент в Российской Федерации ведется разработка (переработка) клинических стандартов диагностики. Целесообразно дорабатывать как существующие, так и планируемые к утверждению клинические стандарты путем включения в них сведений о категориях радиационного риска и диапазонах эффективных доз для всех используемых РРИ. Это позволит врачам использовать данные рекомендации для выбора РРИ, обладающего необходимой диагностической эффективностью и минимальной дозой облучения пациента, а также для информирования пациента об ожидаемой дозе облучения и о возможных последствиях для здоровья.

3.2. Принцип оптимизации

В Российской Федерации принцип оптимизации с использованием РДУ официально введен в ОСПОРБ-99/2010 и МР 2.6.1.0066-12⁵. Однако на практике принцип оптимизации реализован формально. Одной из причин является отсутствие в штате рентгенологических отделений медицинских физиков. Существующая система радиационной безопасности ориентирована главным образом на медицинский персонал. Совершенствование и усложнение современных методов лучевой диагностики не позволяет медицинскому персоналу выполнять задачи по дозиметрии пациентов, анализу уровней их облучения, установлению низкодозовых протоколов на должном уровне [49].

Основные действующие отечественные нормативно-методические документы по обеспечению радиационной защиты пациентов и персонала в медицине не рассматривают вопросы обеспечения качества в лучевой диагностике. В данных документах затрагиваются лишь отдельные аспекты контроля качества в рамках программы контроля технических параметров диагностического оборудования. Даже эти ограниченные требования на практике исполняются формально, что существенно затрудняет проведение оптимизации РРИ.

Обеспечение качества в виде программ обеспечения качества РРИ введено во все последние нормативно-методические документы Роспотребнадзора: проект СанПиН «Гигиенические требования по обеспечению ра-

⁵ Методические рекомендации МР 2.6.1.0066-12 «Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения». М.: Роспотребнадзор, 2012. 28 с. [Methodical recommendation МР 2.6.1.0066-12 "Implementation of diagnostic reference levels to optimize the radiation protection of the patient in conventional radiology". Moscow, Rospotrebnadzor, 2012, 28 p.]

диационной безопасности при проведении медицинских рентгенологических процедур»; СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведению ПЭТ»⁶; проект СанПиН «Обеспечение радиационной безопасности при проведении однофотонной радионуклидной диагностики in vivo». Программы обеспечения качества РРИ должны разрабатываться администрацией медицинских организаций и включать в себя основные контролируемые элементы качества, необходимые для успешного применения принципов обоснования и оптимизации.

Результаты сбора данных в медицинских организациях в 18 регионах РФ, выполненного специалистами ФБУН НИИРГ им. П. В. Рамзаева в 2009–2018 гг. [66–69], свидетельствуют, в частности, об отсутствии единых (типовых) протоколов проведения РРИ даже в рамках одной медицинской организации, что негативно сказывается как на уровнях доз облучения пациентов, так и на качестве диагностического процесса. Недостаточно реализовано и взаимодействие медицинских организаций с производителями рентгеновского оборудования, что особенно пагубно сказывается на эксплуатации современного цифрового оборудования, нарушения в работе которого невозможно устранить силами медицинского персонала. Как уже было описано ранее [1, 49], оценка доз облучения пациентов также реализуется крайне формально. На национальном уровне в РФ отсутствуют единые требования и подходы к проведению оценки качества рентгеновских изображений, что также существенно затрудняет проведение оптимизационных мероприятий и обеспечение качества в лучевой диагностике.

4. Основные направления совершенствования системы радиационной защиты в медицине

На основе анализа современного состояния и перспектив развития лучевой диагностики в мире и в Российской Федерации, а также научных публикаций по данной теме [70, 71] нами предложены как общие, так и частные (по отдельным видам лучевой диагностики) основные направления совершенствования системы радиационной защиты пациентов и персонала.

В качестве общих (необходимых для всех видов лучевой диагностики) направлений обеспечения оптимизационного процесса в Российской Федерации можно выделить следующие:

- совершенствование и гармонизация отечественных НМД в области радиационной защиты в медицине с рекомендациями НКДАР ООН, МКРЗ, МАГАТЭ;
- актуализация и внедрение в практику современных методов оценки эффективных доз от различных видов РРИ и радиационных рисков для пациентов различных возрастных категорий, в том числе и с использованием специализированного программного обеспечения;
- разработка научно обоснованных методик обеспечения качества проведения РРИ и их внедрение в отечественных медицинских организациях;

- комплектование штата медицинских организаций выделенным персоналом (медицинскими физиками), отвечающим за проведение оптимизации и обеспечение качества;

- обеспечение МО современным рентгенодиагностическим, дозиметрическим и вспомогательным оборудованием надлежащего качества;

- учет индивидуальных доз облучения пациентов, в том числе и в измеряемых дозовых характеристиках (произведение дозы на площадь, входная доза, произведение дозы на длину, активность введенного радионуклида и пр.);

- переработка формы 3-ДОЗ системы ЕСКИД (отказ от использования табличных значений доз; детализация списка представленных РРИ; учет параметров проведения РРИ и эффективных доз на уровне отдельного аппарата, дополнение формы разделами по пациентам-детям и лучевой терапии);

- внедрение в практику принципа оптимизации и утверждение значений национальных РДУ для взрослых пациентов и пациентов-детей для наиболее распространенных видов РРИ;

- разработка единого централизованного информационного интернет-ресурса для пациентов и врачей по различным аспектам радиационной гигиены;

- подготовка и реализация программ первичного обучения и переподготовки специалистов-рентгенологов по вопросам радиационной гигиены и радиационной безопасности.

Для отдельных видов лучевой диагностики и терапии с учетом специфики данных методов нами предложены следующие мероприятия:

В компьютерной томографии:

1. Разработка методик оценки эффективных и органических доз пациентов для различных областей сканирования, что необходимо для обеспечения радиационной защиты пациентов и оценки радиационных рисков;

- обновление таблицы дозовых коэффициентов для оценки эффективных доз для новых методов исследований, конусно-лучевой КТ и разных зон сканирования для учета доз пациентов на отделении, оценок стандартных доз для протоколов сканирования;

- использование специализированного программного обеспечения для оценки эффективных и органических доз пациентов с возможностью индивидуализировать дозу для разных групп пациентов (пол, возраст, телосложение) для оптимизации проведения исследований и оценки радиационных рисков.

2. Оценка радиационных рисков от различных видов КТ-исследований на основе органических и эффективных доз пациентов для соотношения рисков с другими видами диагностики и обоснования исследований.

3. Разработка системы оптимизации радиационной защиты пациентов при КТ-исследованиях с использованием референтных диагностических уровней:

- разработка РДУ для основных видов КТ-исследований (по задачам исследований), основанных на отечественной практике работы;

⁶ СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведению ПЭТ». Онлайн-ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/420296595> (Дата обращения: 24.04.2019) [SanPiN 2.6.1.3288-15 "Hygienic requirements for the provision of the radiation safety in Pet diagnostics". – Available on: <http://docs.cntd.ru/document/420296595> (Accessed: 24.04.2019)]

– внедрение в практику РДУ для КТ-исследований для выявления аномально высоких доз и проведения оптимизационных мероприятий.

4. Оптимизация КТ-исследований:

– подбор оптимальных параметров для каждого вида исследования и решаемой задачи;

– разработка отдельных протоколов для отдельных групп пациентов, основываясь на задачах проведения исследований, возрасте и телосложении пациентов;

– оптимизация многофазных исследований путем создания различных протоколов для разных фаз исследования.

5. Разработка системы обеспечения качества в КТ:

– периодические процедуры контроля качества диагностического оборудования, включая оценку качества КТ-изображения и оценка дозиметрических параметров с учетом всех показателей для отслеживания стабильности работы системы;

– постоянный учет доз пациентов и периодическая оценка стандартных доз для основных видов КТ-исследований и сравнение их значений с РДУ;

– периодический пересмотр протоколов исследований с экспертной оценкой качества изображения с целью получения качественной диагностической информации при минимальной дозе облучения пациентов;

6. Оценка изодоз и разработка требований/рекомендаций по планированию и расчету стационарной защиты или передвижных/индивидуальных средств защиты для передвижных КТ с целью оптимизации радиационной защиты персонала и пациентов.

В радионуклидной диагностике:

1. Разработка методик оценки эффективных и органических доз пациентов, как от внутреннего облучения от вводимого радиофармпрепарата, так и от внешнего облучения от КТ-сканирования, в случае использования гибридных методов:

– методики оценки органических и эффективных доз пациентов от внутреннего облучения для новых РФП на основании изучения моделей распределения РФП в организме человека;

– использование специализированного программного обеспечения для оценки органических доз пациентов от внутреннего и внешнего облучения для сопоставления их с дозами внутреннего облучения.

2. Оценка радиационных рисков от РНД-исследований на основании органических и эффективных доз пациентов от внутреннего и внешнего облучения для прогностической оценки возникновения нежелательных радиационно-индуцированных раков и соотнесения рисков с другими видами диагностики для обоснования исследований с возможностью использовать их в качестве инструмента для назначения диагностической процедуры.

3. Разработка системы обеспечения качества в РНД, которая должна включать в себя следующие положения:

– контроль качества диагностического оборудования для оценки характеристик при вводе оборудования в эксплуатацию на соответствие техническим требованиям, заявленным производителем, и отслеживания стабильности работы системы и всех ее компонентов;

– контроль качества измерительного оборудования, которое используется для измерения активности, вводимой пациенту;

– контроль качества получаемого изображения с использованием специализированных фантомов и единых критериев для оценки параметров изображения и гармонизации протоколов сканирования на разных аппаратах;

– стандартизация методик проведения исследований, включающих подготовку пациента к исследованию и протокол проведения, основанных на фармакокинетике и распределении РФП в организме человека;

– радиационный контроль на отделении для оценки радиационной обстановки;

– постоянный учет доз внутреннего и внешнего облучения пациентов и периодическую оценку стандартных доз.

4. Разработка системы оптимизации радиационной защиты пациентов в РНД с использованием референтных диагностических уровней:

– разработка РДУ для основных видов исследований в единицах вводимой пациенту активности и эффективной дозы внутреннего облучения, а также для КТ-сканирования в единицах DLP и CTDI и эффективной дозе для гибридных исследований;

– внедрение в практику РДУ для выявления аномально высоких доз и проведения оптимизационных мероприятий.

5. Оптимизация исследований в РНД:

– подбор оптимальной вводимой пациенту активности, основываясь на стандартах проведения исследований, возрасте и телосложении пациента;

– подбор оптимальных параметров для КТ-сканирования, ориентируясь на цели проведения КТ-сканирования, в случае гибридных методов.

6. Постоянная переподготовка персонала для ознакомления с новыми методами проведения исследований, возможностями оборудования и процедурами контроля качества, а также радиационной безопасности для обеспечения качественного проведения диагностических процедур на всех этапах.

7. Обеспечить индивидуальный дозиметрический контроль персонала:

– ввести обязательную оценку доз в хрусталике глаза и кистях рук для отдельных критических групп персонала с использованием специализированных индивидуальных дозиметров;

– оснащение персонала индивидуальными прямопоказывающими дозиметрами.

Для рентгеноскопических, рентгенхирургических, ангиографических и интервенционных исследований:

1. Уделить особое внимание защите персонала:

– оснастить операционные средствами защиты (боковые ширмы, подвесные экраны и защитные шторы);

– обязать использовать средства индивидуальной защиты, в частности очки с защитными стеклами (желательно с боковой защитой);

– ввести обязательную оценку доз в хрусталике глаза и кистях рук с использованием специализированных индивидуальных дозиметров;

– обеспечить персонал индивидуальными прямопоказывающими дозиметрами;

– определять дозовые поля в рентген-операционных с целью нахождения оптимальных с точки зрения РБ рабочих мест персонала.

2. Вести учет индивидуальных доз пациентов в измеряемых дозовых величинах.

3. Разрабатывать типовые методики проведения исследований с целью снижения влияния субъективных факторов (уровня подготовки и личных предпочтений медицинского персонала, проводящего исследования).

4. Разрабатывать методики оценки эффективных и органных доз пациентов с учетом методик проведения исследований (геометрии облучения пациентов).

5. Проводить оценку и мониторинг поглощенных доз в коже пациента.

При проведении радионуклидной терапии:

1. Гармонизировать отечественные подходы обращения с жидкими радиоактивными отходами, образующимися при проведении радионуклидной диагностики и терапии, с международными рекомендациями.

2. Разработать критерии выписки (активности радионуклидов в теле пациентов после радионуклидной терапии и мощности доз от тела пациентов, при которых разрешается выписка) для всего спектра использующихся и планируемых к применению РФП для радионуклидной диагностики и терапии.

3. Разработать методы оценки поглощенных доз в органе-мишени и остальных радиочувствительных органах и тканях пациента (дозовые коэффициенты) и методы индивидуализированной качественной и количественной оценки накопления РФП в органах и тканях пациента с использованием методов визуализации (КТ, МРТ, ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ). Отдельно следует выделить разработки методов оценки доз на плод/эмбрион у беременных женщин и оценки воздействия на организм новорожденных при грудном вскармливании.

4. Разработать набор сценариев для типичных ситуаций поступления радионуклидов из организма пациента в окружающую среду.

Для пациентов-детей для всех видов РРИ:

1. Внедрить использование специальных медицинских рентгеновских аппаратов для обследования детей, включающих как адаптированные конструктивные элементы, так и программное обеспечение.

2. Разработать низкодозовые протоколы исследований детей-пациентов, учитывающие возрастные особенности пациентов, их антропометрические характеристики, специфику заболеваний, особенности оборудования и требования к персоналу. Протоколы должны быть подготовлены на все проводимые виды исследований для каждой возрастной группы пациентов.

3. Усовершенствовать способы иммобилизации (сохранение неподвижности) ребенка во время диагностического исследования.

4. Внедрить использование средств индивидуальной защиты для родителей и вспомогательного медицинского персонала, обеспечивающих проведение исследований у детей.

5. Разработать методики расчета органных и эффективных доз пациентов-детей с учетом их возрастной категории и антропометрических характеристик (с учетом их эффективного диаметра тела).

Заключение

Дозы облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований во всем мире, в том числе и в Российской Федерации, имеют тенденцию к росту. Большинство современных высокоинформативных рент-

генодиагностических методов исследования (КТ, ядерная медицина, интервенционные исследования) относятся к категории «низкого», а у детей и «умеренного» радиационного риска.

Выполненный анализ существующих зарубежных регулирующих и отечественных нормативно-методических документов показал наличие существенных отличий в практике радиационной защиты в медицине в России и за рубежом. Так, в зарубежной практике особое внимание уделяется практической реализации принципа обоснования путем применения критериев обоснования назначения рентгенорадиологических исследований и различных методов риск-коммуникации с пациентами. Широко используется принцип оптимизации, основанный на концепции референтных диагностических уровней и программах обеспечения качества проведения рентгенорадиологических исследований. При этом основной объем мероприятий по снижению доз облучения пациентов и повышению качества диагностических изображений выполняется на уровне медицинских организаций медицинскими физиками совместно с медицинским персоналом и производителями оборудования для лучевой диагностики. Отдельно следует выделить отсутствие ограничения доз облучения практически здоровых лиц при проведении скрининговых исследований. По итогам сравнения отечественной и зарубежных практик радиационной защиты в медицине были разработаны как общие, так и частные (по отдельным видам лучевой диагностики) основные направления совершенствования системы радиационной защиты пациентов и персонала.

Реализация задач, поставленных Указами Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 и от 13.10.2018 г. № 585 требует разработки комплексной программы по оптимизации радиационной защиты населения страны при использовании ИИИ в медицинских целях, включающей в себя предложенные направления. Такая программа может быть разработана и реализована при комплексном взаимодействии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и Министерства здравоохранения Российской Федерации.

Литература

1. Онищенко, Г.Г. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения / Г.Г. Онищенко, А.Ю. Попова, И.К. Романович, А.В. Водоватов, Н.С. Башкетова, О.А. Историк, Л.А. Чипига, И.Г. Шацкий, Л.В. Репин, А.М. Библин // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, №1. – С. 6-24: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24> (Дата обращения: 01.04.2019)
2. Международная Комиссия по Радиационной защите. Рекомендации 2007 года Международной Комиссии по Радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ., под ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
3. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in pediatric diagnostic and interventional radiology. ICRP Publication 121. Ann. ICRP, 2013, V. 42(2).
4. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. Ann. ICRP, 2013, V.42(1).

5. Jaschke W., Schmuth M., Trianni A., Bartal G. Radiation-induced skin injuries to patients: what the interventional radiologist needs to know. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2017, V.40, №8, pp. 1131–1140.
6. Sodickson A., Baeyens P., Andriole K., et al. Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults. *Radiology*, 2009, V. 251, №1, pp. 175–184.
7. Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A. Estimating the lifetime risk of cancer associated with multiple CT scans. *J. Radiol. Prot.*, 2014, V. 34, №4, pp. 825–841: DOI: 10.1088/0952-4746/34/4/825. (Дата обращения: 01.04.2019)
8. Кашчев, В.В. Медицинское диагностическое облучение: проблема радиационной безопасности. Обзор / В.В. Кашчев, Е.А. Пряхин // Радиация и риск. – 2018. – Т. 27, № 4. – С. 49–64.
9. Pearce M.S., Salotti J.A., Little M.P. et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet*, 2012, V. 380(9840), pp. 499–505.
10. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z. et. al. Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*, 2013, V. 346: <https://doi.org/10.1136/bmj.f2360> (Дата обращения: 01.04.2019)
11. Huang W.Y., Muo C.H., Lin C.Y. et. al. Paediatric head CT scan and subsequent risk of malignancy and benign brain tumour: a nation-wide population-based cohort study. *British Journal of Cancer*, 2014, V.110, pp. 2354–2360: doi: 10.1038/bjc.2014.103 (Дата обращения: 01.04.2019)
12. Krille L., Dreger S., Schindel R. et. al. Risk of cancer incidence before the age of 15 years after exposure to ionising radiation from computed tomography: results from a German cohort study. *Radiat Environ Biophys.*, 2015, V.54, pp.1–12.
13. Journy N., Rehel J.L., Ducou Le Pointe H. et. al. Are the studies on cancer risk from CT scans biased by indication? Elements of answer from a large-scale cohort study in France. *British Journal of Cancer*, 2015, V.112, pp.185–193: doi: 10.1038/bjc.2014.526 (Дата обращения: 01.04.2019)
14. Meulepas J.M., Ronckers C.M., Smets A.M.J.B. et. al. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J Natl Cancer Inst.*, 2019, V.111, №3.
15. Bernier M.O. et. al. Cohort Profile: the EPI-CT study: A European pooled epidemiological study to quantify the risk of radiation-induced cancer from pediatric CT. *International Journal of Epidemiology*, 2018, pp. 1–10: doi: 10.1093/ije/dyy231 (Дата обращения: 01.04.2019)
16. Shore R.E. [et. al.] Implications of recent epidemiological studies for the linear nonthreshold model and radiation protection. *Journal of radiological protection*, 2018, Vol. 38, pp. 1217–1233.
17. Walsh L. [et. al.] Risks from CT scans – what do recent studies tell us? *Journal of radiological protection*, 2014, Vol. 34, E1–E5.
18. Boice J.D. Radiation epidemiology and recent paediatric computed tomography studies. *Annals of ICRP*, 2015, Vol. 44, pp. 236–248.
19. Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная Защита и Безопасность Источников Излучения: Международные Основные Нормы Безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3. – Вена: МАГАТЭ, 2015. – 518 с.
20. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide №SSG-46. – Vienna: IAEA, 2018, 340 p.
21. Международная Комиссия по Радиационной защите. Радиационная защита в медицине. Публикация 105 МКРЗ / пер с англ., под ред. М.И. Балонова. – СПб., 2011. – 66 с.: <http://www.icrp.org/docs/P105Russian.pdf> или <http://niirg.ru/PDF/ICRP-105%20Ru.pdf>. (Дата обращения: 01.12.2018)
22. ICRP Publications: <http://www.icrp.org/page.asp?id=5> (Дата обращения: 24.04.2019)
23. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Sources and Effects of Ionizing Radiation – V.I – Annex A. Medical radiation exposures. – NY: United Nations, 2010, 143 p.
24. International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy. ICRP Publication 127. Ann. ICRP, 2014, V.43, №4.
25. International Commission on Radiological Protection. Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies. ICRP Publication 112. Ann. ICRP, 2009, V.39, №4.
26. Loreti G., Delis H., Healy B. et. al. IAEA education and training activities in medical physics. *Medical physics international Journal*, 2015, V.3, №2, pp. 81–86.
27. COUNCIL DIRECTIVE 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02013L0059-20140117&from=EN> (Дата обращения: 24.04.2019)
28. Overview of EU radiation protection legislation: <https://ec.europa.eu/energy/en/overview-eu-radiation-protection-legislation> (Дата обращения: 24.04.2019)
29. Digital Imaging and Communication in Medicine: <https://www.dicomstandard.org/current/> (Дата обращения: 24.04.2019)
30. NEMA Medical Imaging Standards: <https://www.nema.org/Standards/Pages/All-Standards-by-Product.aspx?ProductId=6c490050-e74a-4366-bca5-f7e40fa714f6> (Дата обращения: 24.04.2019)
31. iRefer. Making the best use of clinical radiology: <https://www.irefer.org.uk/> (Дата обращения: 24.04.2019)
32. Appropriateness criteria: <https://acsearch.acr.org/list> (Дата обращения: 24.04.2019)
33. European Commission. Radiation Protection №178. Referral Guidelines for Medical Imaging Availability and Use in the European Union. –Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, 52 p.
34. ESR iGuide. Clinical Decision Support: <https://www.myesr.org/esriguide> (Дата обращения: 24.04.2019)
35. Huber T.C., Krishnaraj A., Patrie J., Gaskin C.M. Impact of a Commercially Available Clinical Decision Support Program on Provider Ordering Habits. *Journal of the American College of Radiology*. V.15, Issue 7, pp. 951 – 957.
36. Raja A.S. et. al. Effect of Computerized Clinical Decision Support on the Use and Yield of CT Pulmonary Angiography in the Emergency Department. *Radiology*. V. 262, Number 2, pp. 468–474.
37. Lacson R. et. al. Assessing strength of evidence of appropriate use criteria for diagnostic imaging examinations. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2016, V.23, №3, pp. 649–653.
38. World health organization. Communicating radiation risks in pediatric imaging. Information to support healthcare discussions about benefit and risk. Geneva, 2016, 90 p.
39. International Commission on Radiological Protection. Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann. ICRP, 2018, V.47, №1.
40. Репин, Л.В. Проблемы риск-коммуникации при обеспечении радиационной безопасности населения: основ-

- ные понятия и определения / Л.В. Репин, А.М. Библин, Н.М. Вишнякова // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 3, С. 83-91: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-83-91> (Дата обращения: 24.04.2019)
41. Frush D.P. Radiation, Risks, and ... a Rational Approach in Diagnostic Imaging: What the Radiology Team Should Know. *Journal of radiology nursing*, 2017, V. 36, pp.10-14.
 42. Ahmed H. et. al. Communicating risk. *British Medical Journal*, 2012, V. 344, pp.1-7.
 43. Fagerlin A., Zikmund-Fisher B.J. and Ubel P.A. Helping Patients Decide: Ten Steps to Better Risk Communication. *J Natl Cancer Inst.*, 2011, V. 103, pp.1436-1443.
 44. Picano E. Informed consent and communication of risk from radiological and nuclear medicine examinations: how to escape from a communication inferno. *BMJ*, 2004, V. 329, pp.849-851.
 45. Brook O. et. al. Measuring and improving the patient experience in radiology. *Abdom Radiol*, 2016: DOI: 10.1007/s00261-016-0960-z (Дата обращения: 24.04.2019)
 46. Kastrae N. et. al. Optimizing Communication With Parents on Benefits and Radiation Risks in Pediatric Imaging. *J Am Coll Radiol.*, 2018, V. 15, pp. 809-817.
 47. Järvinen H., Vassileva J., Samei E., Wallace A, Vano E. and Rehani M., Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. *Journal of Medical Imaging*, 2017, V. 4, №3.
 48. Martin C.J. The Importance of Radiation Quality for Optimisation in Radiology. *Biomedical Imaging and Intervention Journal*, 2007, V. 3.2, pp. 38.
 49. Водоватов, А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований / А.В. Водоватов // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10, №1. – С. 47-55.
 50. European Commission. Radiation protection № 180 part 1/2. *Medical Radiation Exposure of the European Population*. – Luxembourg, 2014, 181 p.
 51. Hart D., Hilier M.C., Shrimpton P.C. Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. *HPA-CRCE-034. Health Protection Agency*, 2012, 87 p.
 52. Region-wide dose monitoring increases patient safety: <https://sectra.com/medical/case/region-wide-dose-monitoring-increases-patient-safety/> (Дата обращения: 24.04.2019)
 53. Sectra DoseTrack: <https://sectra.com/medical/product/sectra-dosetrack/> (Дата обращения: 13.11.2018)
 54. Aavik A., Allik T., Nazarenko S., Paats A. National PACS Programme in Estonia – Results and Successes. *Health Management*, 2007 V.7, №2: <https://healthmanagement.org/c/imaging/issuearticle/national-pacs-programme-in-estonia-results-and-successes> (Дата обращения: 13.11.2018)
 55. Nation-wide PACS system in Estonia: http://mug.ee/ehealth/presentations/Andrus_Paats.pdf (Дата обращения: 13.11.2018)
 56. Mattsson S. Need for individual cancer risk estimates in X-ray and nuclear medicine imaging. *Rad. Prot. Dos.*, 2016, V. 169 (1-4), pp.11-16.
 57. Metz C.E. ROC analysis in medical imaging: a tutorial review of the literature. *Radiological physics and technology*, 2008, V. 1 (1), pp. 2-12.
 58. Verdun F.R., Racine D., Ott J.G., et al. Image quality in CT: From physical measurements to model observers. *Physica Medica*, 2015, V. 31, pp. 23–843.
 59. Ludewig E., Richter A., Frame M. Diagnostic imaging-evaluating image quality using visual grading characteristic (VGC) analysis. *Vet Res Commun*, 2010, V. 34, № 5, pp.473-479.
 60. European Commission. *European Guidelines on Quality Criteria for Diagnostic Radiographic Images*. Report EUR 16260. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996, 38 p.
 61. European Commission. *European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography*. Report EUR 16262. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000.
 62. Walsh C. [et. al.] Quality assurance of computed and digital radiography systems. *Rad. Prot. Dos.*, 2008, V. 129 (1-3), pp. 271-275.
 63. AAPM Imaging Physics Committee Task Group 151. Ongoing quality control in digital radiography: Report of AAPM Imaging Physics Committee Task Group 151. *Med. Phys.*, 2015, V. 42 (11), pp. 6658-6670.
 64. American College of Radiology. *ACR Technical Standard for Diagnostic Medical Physics Performance Monitoring of Radiographic and Fluoroscopic Equipment*. Reston, 2006, VA, pp. 1139–1142.
 65. Водоватов, А.В. Совершенствование норм радиационной безопасности. Часть 1: целесообразность ограничения доз медицинского облучения практически здоровых лиц / А.В. Водоватов // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11 (3). – С. 115-124: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-115-124> (Дата обращения: 24.04.2019)
 66. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S. and Vodovатов A. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. *J. Radiol. Prot.* V.38, pp. 121-140: DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99> (Дата обращения: 24.04.2019)
 67. Vodovатов A.V., Balonov M.I., Golikov V.Yu., Shatsky I.G., Chipiga L.A., Bernhardsson C. Proposals for the establishment of national diagnostic reference levels for radiography for adult patients based on regional dose surveys in Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.*, 2017, V. 173 (1-3), pp. 223-232.
 68. Chipiga L.A., Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.*, 2016, V. 169 (1-4), pp. 240-244.
 69. Чипига, Л.А. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России / Л.А. Чипига, И.А. Звонова, Д.В. Рыжкова, М.А. Меньков, М.Б. Долгушин // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10 (4), С. 31-43: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43> (Дата обращения: 24.04.2019)
 70. Онищенко, Г.Г. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе / Г.Г. Онищенко, И.К. Романович // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, №4. – С. 5-22.
 71. Онищенко, Г.Г. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации: Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации / Г.Г. Онищенко, А.Ю. Попова, И.К. Романович, А.Н. Барковский, Т.А. Кормановская, И.Г. Шевкун // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 18-35.

Поступила: 30.04.2019 г.

Онищенко Геннадий Григорьевич – доктор медицинских наук, профессор, академик Российской академии наук; Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Россия

Попова Анна Юрьевна – доктор медицинских наук, профессор, руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vodovatoff@gmail.com

Башкетова Наталия Семеновна – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

Историк Ольга Александровна – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

Чипига Лариса Александровна – научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Шацкий Илья Геннадьевич – научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Сарычева Светлана Сергеевна – старший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Библин Артём Михайлович – руководитель информационно-аналитического центра – старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Репин Леонид Викторович – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А., Чипига Л.А., Шацкий И.Г., Сарычева С.С., Библин А.М., Репин Л.В. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24

Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection

Gennadiy G. Onischenko ^{1,6}, Anna Yu. Popova ^{2,7}, Ivan K. Romanovich ³, Aleksandr V. Vodovатов ³, Nataliya S. Bashketova ⁴, Olga A. Istorik ⁵, Larisa A. Chipiga ³, Iliya G. Shatsky ³, Svetlana S. Sarycheva ³, Artem M. Biblin ³, Leonid V. Repin ³

¹Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Federal Service of Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

³Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

⁴Federal Service of Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in St-Petersburg, St-Petersburg, Russia

⁵Federal Service of Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in Leningrad region, St-Petersburg, Russia

⁶I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁷Russian Medical Academy of the Continuous Professional Education, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

According to the Decree of the President of the Russian Federation №585, 13.10.2018, the main approaches to the provision of the radiation safety of the public of the Russian Federation from the use of the sources of ionizing radiation in medicine are the harmonization of the national legislative documents with the international recommendations and the development of the new and improvement of the existing methods of the assessment of the individual patient doses and corresponding radiation risks. The current study was aimed at the justification of the complex of actions to prevent the unnecessary medical exposure of the Russian population. That required to analyze the existing national and international approaches to the assessment of the radiation risks from medical exposure and the results of the existing epidemiological studies, as well as to assess the risks from the most common and/or high dose X-ray examination (computed tomography, interventional examinations, nuclear medicine) for pediatric and adult patients. It was indicated, that these examinations correspond to the "Low" and "Moderate" radiation risk categories. The level of the lifetime radiation risk of cancer morbidity in the Russian Federation for the computed tomography was estimated as 1 case per 3-30 thousand examinations. The performed analysis of the existing international regulatory and methodical documents indicated the significant differences in the practice of the radiation protection in medicine. International practice is mainly based on the practical application of the principle of justification by using the X-ray examination referral guidelines and various methods of risk communication with patients. Main actions to reduce the patient doses and to improve the diagnostic image quality are performed on the hospital level by medical physicists in collaboration with medical staff and representatives of the vendor. It should be noted that dose limits are not applied to the exposure of healthy individuals from screening X-ray examinations. Based on the results of the comparison of the national and international practices of the radiation protection in medicine, both general and specific (for different X-ray modalities) recommendations for the improvement of the system of the radiation protection of the patients and staff were developed. These recommendations should be implemented on practice in the form of the complex program of the optimization of the radiation protection of the public of the Russian Federation from medical exposure. This program can be developed and implemented through the collaboration of the Federal Service of Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being and the Ministry of Healthcare of the Russian Federation.

Key-words: X-ray diagnostics, radiation risk, optimization, justification, quality assurance, protection of the patients from medical exposure.

References

1. Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovатов A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G., Repin L.V., Biblin A.M. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of x-ray diagnostics and doses from medical exposure. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, V. 12(1), pp. 6-24. – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24> (Accessed: 01.04.2019) (In Russian)
2. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow, «Alana», 2009, 312 p. (In Russian)
3. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in pediatric diagnostic and interventional radiology. ICRP Publication 121. Ann. ICRP, 2013, V.42(2).
4. International Commission on Radiological Protection. Radiological protection in cardiology. ICRP Publication 120. Ann. ICRP, 2013, V. 42(1).

Aleksandr V. Vodovатов

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com

5. Jaschke W., Schmuth M., Trianni A., Bartal G. Radiation-induced skin injuries to patients: what the interventional radiologist needs to know. *Cardiovasc Intervent Radiol.*, 2017, V.40, №8, pp.1131–1140.
6. Sodickson A., Baeyens P., Andriole K., et al. Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults. *Radiology*, 2009, V.251, №1, pp.175–184.
7. Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A. Estimating the lifetime risk of cancer associated with multiple CT scans. *J. Radiol. Prot.*, 2014, V.34, №4, pp. 825–841. – Available on: DOI: 10.1088/0952-4746/34/4/825. (Accessed: 01.04.2019)
8. Kascheev V.V., Pryahin E.A. Medical diagnostic exposure: problems of the radiation safety. A review. *Radiation and risk*, 2018, V.27, №4, pp. 49–64.
9. Pearce M.S., Salotti J.A., Little M.P. et al. Radiation exposure from CT scans in childhood and subsequent risk of leukaemia and brain tumours: a retrospective cohort study. *Lancet.*, 2012, V. 380(9840), pp. 499–505.
10. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z. et. al. Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ*, 2013, V. 346. – Available on: <https://doi.org/10.1136/bmj.f2360> (Accessed: 01.04.2019)
11. Huang W.Y., Muo C.H., Lin C.Y. et al. Paediatric head CT scan and subsequent risk of malignancy and benign brain tumour: a nation-wide population-based cohort study. *British Journal of Cancer*, 2014, V.110, pp. 2354–2360. – Available on: doi: 10.1038/bjc.2014.103 (Accessed: 01.04.2019)
12. Krille L., Dreger S., Schindel R. et al. Risk of cancer incidence before the age of 15 years after exposure to ionising radiation from computed tomography: results from a German cohort study. *Radiat Environ Biophys.*, 2015, V.54, pp.1–12.
13. Journy N., Rehel J.L., Ducou Le Pointe H. et al. Are the studies on cancer risk from CT scans biased by indication? Elements of answer from a large-scale cohort study in France. *British Journal of Cancer*, 2015, V.112, p.185–193. – Available on: doi: 10.1038/bjc.2014.526 (Accessed: 01.04.2019)
14. Meulepas J.M., Ronckers C.M., Smets A.M.J.B. et al. Radiation Exposure From Pediatric CT Scans and Subsequent Cancer Risk in the Netherlands. *J Natl Cancer Inst.*, 2019, V.111, №3.
15. Bernier M.O. et al. Cohort Profile: the EPI-CT study: A European pooled epidemiological study to quantify the risk of radiation-induced cancer from pediatric CT. *International Journal of Epidemiology*, 2018, pp.1–10. – Available on: doi: 10.1093/ije/dyy231 (Accessed: 01.04.2019)
16. Shore R.E. et al. Implications of recent epidemiological studies for the linear nothreshold model and radiation protection. *Journal of radiological protection*, 2018, Vol. 38, pp. 1217–1233.
17. Walsh L. et al. Risks from CT scans – what do recent studies tell us? *Journal of radiological protection*, 2014, Vol. 34, E1–E5.
18. Boice J.D. Radiation epidemiology and recent paediatric computed tomography studies. *Annals of ICRP*, 2015, Vol. 44, pp. 236–248.
19. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2015, 518 p. (in Russian)
20. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide №SSG-46. – Vienna: IAEA, 2018, 340 p.
21. International Commission on Radiological Protection. Radiation Protection in Medicine. ICRP Publication 105. Russian translation under M. Balonov. Saint-Petersburg, NIIRG, 2011, 66 p. (in Russian)
22. ICRP Publications: – Available on: <http://www.icrp.org/page.asp?id=5> (Accessed: 24.04.2019)
23. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Sources and Effects of Ionizing Radiation – V.I – Annex A. Medical radiation exposures. NY: United Nations, 2010, 143 p.
24. International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy. ICRP Publication 127. Ann. ICRP, 2014, V.43, №4.
25. International Commission on Radiological Protection. Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies. ICRP Publication 112. Ann. ICRP, 2009, V.39, №4.
26. Loreti G., Delis H., Healy B. et al. IAEA education and training activities in medical physics. *Medical physics international Journal*, 2015, V.3, №2, pp. 81–86.
27. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom: – Available on: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02013L0059-20140117&from=EN> (Accessed: 24.04.2019)
28. Overview of EU radiation protection legislation. – Available on: <https://ec.europa.eu/energy/en/overview-eu-radiation-protection-legislation> (Accessed: 24.04.2019)
29. Digital Imaging and Communication in Medicine. – Available on: <https://www.dicomstandard.org/current/> (Accessed: 24.04.2019)
30. NEMA Medical Imaging Standards. – Available on: <https://www.nema.org/Standards/Pages/All-Standards-by-Product.aspx?ProductId=6c490050-e74a-4366-bca5-f7e-40fa714f6> (Accessed: 24.04.2019)
31. iRefer. Making the best use of clinical radiology. – Available on: <https://www.irefer.org.uk/> (Accessed: 24.04.2019)
32. Appropriateness criteria. – Available on: <https://acsearch.acr.org/list> (Accessed: 24.04.2019)
33. European Commission. Radiation Protection №178. Referral Guidelines for Medical Imaging Availability and Use in the European Union. –Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, 52 p.
34. ESR iGuide. Clinical Decision Support. – Available on: <https://www.myesr.org/esriguide> (Accessed: 24.04.2019)
35. Huber T.C., Krishnaraj A., Patrie J., Gaskin C.M. Impact of a Commercially Available Clinical Decision Support Program on Provider Ordering Habits. *Journal of the American College of Radiology*, V.15, Issue 7, pp. 951 – 957.
36. Raja A.S. et al. Effect of Computerized Clinical Decision Support on the Use and Yield of CT Pulmonary Angiography in the Emergency Department. *Radiology*, V. 262, Number 2, pp. 468–474.
37. Lacson R. et al. Assessing strength of evidence of appropriate use criteria for diagnostic imaging examinations. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2016, V. 23, №3, pp. 649–653.
38. World health organization. Communicating radiation risks in pediatric imaging. Information to support healthcare discussions about benefit and risk. Geneva, 2016, 90 p.
39. International Commission on Radiological Protection. Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann. ICRP, 2018, V. 47, №1.
40. Repin L.V., Biblin A.M., Vishnyakova N.M. Problems of risk communication related to the provision of the radiation safety. Basic concepts and definitions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, V. 11(3), pp. 83–91. – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-83-91> (Accessed: 1.04.2019) (In Russian)

41. Frush D. P. Radiation, Risks, and ... a Rational Approach in Diagnostic Imaging: What the Radiology Team Should Know. *Journal of Radiology Nursing*, 2017, V. 36, pp. 10-14.
42. Ahmed H. et al. Communicating risk. *British Medical Journal*, 2012, V. 344, pp. 1-7.
43. Fagerlin A., Zikmund-Fisher B.J. and Ubel P.A. Helping Patients Decide: Ten Steps to Better Risk Communication. *J Natl Cancer Inst.*, 2011, V. 103, pp. 1436-1443.
44. Picano E. Informed consent and communication of risk from radiological and nuclear medicine examinations: how to escape from a communication inferno. *BMJ*, 2004, V. 329, pp. 849-851.
45. Brook O. et al. Measuring and improving the patient experience in radiology. *Abdom Radiol.*, 2016. – Available on: DOI: 10.1007/s00261-016-0960-z (Accessed: 24.04.2019)
46. Kastrai N. et al. Optimizing Communication With Parents on Benefits and Radiation Risks in Pediatric Imaging. *J Am Coll Radiol.*, 2018, V. 15, pp. 809-817.
47. Järvinen H., Vassileva J., Samei E., Wallace A, Vano E. and Rehani M., Patient dose monitoring and the use of diagnostic reference levels for the optimization of protection in medical imaging: current status and challenges worldwide. *Journal of Medical Imaging*, 2017, V. 4, №3.
48. Martin C.J. The Importance of Radiation Quality for Optimisation in Radiology. *Biomedical Imaging and Intervention Journal*, 2007, V. 3.2, pp. 38.
49. Vodovatov A.V. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, V. 10(1), pp. 47-55. – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55> (Accessed: 01.04.2019) (In Russian)
50. European Commission. Radiation protection № 180 part 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population. Luxembourg, 2014, 181 p.
51. Hart D., Hilier M.C., Shrimpton P.C. Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. HPA-CRCE-034. Health Protection Agency, 2012, 87 p.
52. Region-wide dose monitoring increases patient safety. – Available on: <https://sectra.com/medical/case/region-wide-dose-monitoring-increases-patient-safety/> (Accessed: 24.04.2019)
53. Sectra DoseTrack. – Available on: <https://sectra.com/medical/product/sectra-dosetrack/> (Accessed: 13.11.2018)
54. Aavik A., Allik T., Nazarenko S., Paats A. National PACS Programme in Estonia – Results and Successes. *Health Management*, 2007, V. 7, №2. – Available on: <https://health-management.org/c/imaging/issuearticle/national-pacs-programme-in-estonia-results-and-successes> (Accessed: 13.11.2018)
55. Nation-wide PACS system in Estonia. – Available on: http://mug.ee/ehealth/presentations/Andrus_Paats.pdf (Accessed: 13.11.2018)
56. Mattsson S. Need for individual cancer risk estimates in X-ray and nuclear medicine imaging. *Rad. Prot. Dos.*, 2016, V. 169(1-4), pp. 11-16.
57. Metz C.E. ROC analysis in medical imaging: a tutorial review of the literature. *Radiological physics and technology*, 2008, V. 1(1), pp. 2-12.
58. Verdun F.R., Racine D., Ott J.G., et al. Image quality in CT: From physical measurements to model observers. *Physica Medica*, 2015, V. 31, pp. 23–843.
59. Ludewig E., Richter A., Frame M. Diagnostic imaging-evaluating image quality using visual grading characteristic (VGC) analysis. *Vet Res Commun.*, 2010, V. 34, №5, pp. 473-479.
60. European Commission. European Guidelines on Quality Criteria for Diagnostic Radiographic Images. Report EUR 16260. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996, 38 p.
61. European Commission. European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography. Report EUR 16262. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000.
62. Walsh C. et al. Quality assurance of computed and digital radiography systems. *Rad. Prot. Dos.*, 2008, V. 129(1-3), pp. 271-275.
63. AAPM Imaging Physics Committee Task Group 151. Ongoing quality control in digital radiography: Report of AAPM Imaging Physics Committee Task Group 151. *Med. Phys.*, 2015, V. 42(11), pp. 6658-6670.
64. American College of Radiology. ACR Technical Standard for Diagnostic Medical Physics Performance Monitoring of Radiographic and Fluoroscopic Equipment. Reston, VA, 2006, pp. 1139–1142.
65. Vodovatov A.V. Improvement of radiation safety standards. Part 1. Appropriateness of the limitation of the medical exposure of healthy individuals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2018, V. 11(3), pp. 115-124. – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-115-124> (Accessed: 01.04.2019) (In Russian)
66. Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S. and Vodovatov A. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. *J. Radiol. Prot.*, V. 38, pp. 121-140. – Available on: DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99> (Accessed: 24.04.2019)
67. Vodovatov A.V., Balonov M.I., Golikov V.Yu., Shatsky I.G., Chipiga L.A., Bernhardsson C. Proposals for the establishment of national diagnostic reference levels for radiography for adult patients based on regional dose surveys in Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.*, 2017, V. 173(1-3), pp. 223-232.
68. Chipiga L.A., Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.*, 2016, V. 169(1-4), pp. 240-244.
69. Chipiga L.A., Zvonova I.A., Ryzhkova D.V., Menkov M.A., Dolgushin M.B. Levels of patients' exposure and a potential for optimization of the PET diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, V. 10(4), pp. 31-43. – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43> (Accessed: 01.04.2019) (In Russian)
70. Onischenko G.G., Romanovich I.K. Current trends of the provision for radiation safety of the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2014, V. 7(4), pp. 5-22. (In Russian)
71. Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Barkovsky A.N., Kormanovskaya T.A., Shevkun I.G. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation Report 2: Characteristics of the sources and exposure doses of the population of the RF. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2017, V. 10(3), pp. 18-35. – Available on: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35> (Accessed: 01.04.2019) (In Russian)

Received: April 30, 2019

Gennadiy G. Onischenko – Doctor of Medical Science, Professor, member of the Academy of Sciences; I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

Anna Yu. Popova – Doctor of Medical Science, Professor, Head, the Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Russian medical academy of the continuous professional education, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Director of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For correspondence: Aleksandr V. Vodovатов – Head of Medical Protection Laboratory, Leading Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

Nataliya S. Bashketova – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in Saint-Petersburg, Saint-Petersburg, Russia

Olga A. Istorik – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Leningrad Region, Saint-Petersburg, Russia

Larisa A. Chipiga – Researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Iliya G. Shatsky – Researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Svetlana S. Sarycheva – Senior Scientific Researcher of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Artem M. Biblin – Head of Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Leonid V. Repin – Junior Researcher of Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Vodovатов A.V., Bashketova N.S., Istorik O.A., Chipiga L.A., Shatsky I.G., Sarycheva S.S., Biblin A.M., Repin L.V. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 6-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24

Гигиенические требования к проектированию центров и отделений позитронно-эмиссионной томографии

О.В. Мироненко^{1,4}, Т.Б. Балтрукова¹, Н.С. Башкетова², Г.А. Горский², Т.В. Крюкова³, Е.А. Федорова¹

¹ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

² Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Целью публикации является критический анализ существующих гигиенических требований проектирования центров и отделений ПЭТ-, ПЭТ/КТ- и ПЭТ/МРТ-диагностики. В ходе исследования были изучены российские нормативно-правовые документы, определяющие требования к проектированию центров и отделений ПЭТ-диагностики, проектно-техническая, технико-технологическая, разрешительная и иная документация уже работающих центров ПЭТ-диагностики Санкт-Петербурга. При этом было установлено, что, несмотря на наличие документа прямого действия (СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии»), при проектировании приходится учитывать гигиенические требования, изложенные и в других нормативно-правовых документах, что затрудняет процесс проектирования и рассмотрения проектов. Часть актуальных вопросов, связанных с проектированием и размещением этих объектов, не нашли своего должного отражения в них. Это касается требований к транспортным площадкам отгрузки и приема радиофармпрепаратов, организации работы и размещения передвижных ПЭТ и др. Учитывая планируемое резкое увеличение количества центров ПЭТ-диагностики в России, необходимо дальнейшее совершенствование и оптимизация действующего в РФ законодательства.

Ключевые слова: центры и отделения позитронно-эмиссионной томографии, проектирование, радиационная безопасность, гигиеническая оценка.

Введение

Развитие ядерной медицины в Российской Федерации (РФ) в ближайшие годы может позволить с помощью высокотехнологичного оборудования и современных радиофармпрепаратов (РФП) проводить раннюю диагностику многих онкологических, сердечно-сосудистых, неврологических и иных заболеваний, изучать процессы их формирования, развития, проводить лечение больных в различных областях медицинской деятельности и контролировать его эффективность. Это особенно актуально, учитывая высокий уровень заболеваемости и смертности в стране от различных онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний и устойчивую тенденцию их роста [1, 2]. Тем не менее, сегодня приходится констатировать, что уровень развития ядерной медицины в России нельзя пока считать достаточным и принятие государственных программ по развитию этой области будет способствовать улучшению качества оказания медицинской помощи населению [3–6].

Особенно интенсивно в последние годы развивается позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), которая за счет способности специфичных РФП накапливаться в определенных морфологических структурах и патологических очагах позволяет диагностировать первичные опухоли и метастазы малых размеров, заболевания сердечно-сосудистой и нервной систем, изучать динамику физиологических и биохимических процессов, происходящих в тканях [7–10]. До 2010 г. в России было всего 4 ПЭТ-центра и 3 отделения ПЭТ-диагностики, тогда как в США в 2010 г. общее количество отделений ПЭТ составило около 3000, на которых в 2012 г. было выполнено около 4,4 млн процедур, в Германии и Японии в 2010 г. было по 100 отделений ПЭТ [11, 12]. В настоящее время у нас функционируют около 30 ПЭТ-центров и отделений, которые, однако, в основном сосредоточены в крупных городах – Москве, Санкт-Петербурге, Воронеже, Магнитогорске, Челябинске [11–13]. В них установлено 54 ПЭТ-сканера [12]. Тем не менее, этого количества ПЭТ для РФ недо-

Мироненко Ольга Васильевна

Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; Санкт-Петербургский государственный университет

Адрес для переписки: 195067, Санкт-Петербург, Пискаревский пр. 47; E-mail: miroolga@yandex.ru

статочны. По данным зарубежного опыта считается, что для достижения заметного экономического и социального эффекта от ПЭТ-диагностики необходимо, чтобы на 1 миллион населения приходился минимум 1 ПЭТ-сканер, а сейчас в России эта цифра составляет 0,36, в то время как в Европе – 1,1, в Японии – 3,7, в США – 7,1 [5, 12]. В этой связи в рамках реализации государственной программы развития здравоохранения в РФ сегодня ведется проектирование и строительство 40 центров и отделений ПЭТ, где планируется установить около 90 ПЭТ-сканеров, совмещенных с компьютерными или магнитно-резонансными томографами [12–14].

На научном форуме в рамках 61-й очередной сессии Генеральной конференции МАГАТЭ, который прошел в Вене в сентябре 2017 г., министр здравоохранения Российской Федерации В.И. Скворцова заявила, что ядерная медицина является одним из приоритетов медицинской науки и здравоохранения в нашей стране сегодня, и ее развитие «предусматривает совершенствование нормативной базы и инфраструктуры, внедрение новых технологий и обеспечение безопасности их использования, подготовку специализированных медицинских, инженерных и технических кадров, научные исследования и разработки»¹.

Однако такое интенсивное развитие ядерной медицины и ПЭТ-диагностики в частности не может не вызывать определенную озабоченность гигиенистов с позиций обеспечения радиационной безопасности населения и персонала при создании и эксплуатации центров и отделений ПЭТ-диагностики, поскольку они являются объектами потенциальной радиационной опасности, а ПЭТ является одним из наиболее дозообразующих методов лучевой диагностики [15–23]. Особенно это важно в связи с тем, что на сегодняшний день не все вопросы, связанные с обеспечением радиационной безопасности пациентов и персонала, решены, а это обстоятельство требует современной оценки тенденций развития.

Цель исследования – дать гигиеническую оценку существующей системы проектирования центров и отделений ПЭТ диагностики.

Материалы и методы

В ходе исследований был проведен критический анализ нормативно-правовых документов, определяющих требования к проектированию центров и отделений ПЭТ-диагностики. На примере медицинских организаций Санкт-Петербурга была проведена оценка проектно-технической, технико-технологической, разрешительной и иной документации центров и отделений ПЭТ-диагностики.

Результаты и обсуждение

Сегодня метод ПЭТ-диагностики является наиболее информативным методом радионуклидной диагностики, обеспечивающим пространственное разрешение, возможность измерения абсолютной активности в исследуемом органе, количественную и кинетическую оценку физиологических процессов. Он основан на регистрации специализированным эмиссионным томографом (ПЭТ-сканер) пары гамма-квантов, разлетающихся в противоположные стороны, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами вследствие позитронного распада радионуклидов, входящих в состав РФП, вводимых в организм пациента перед исследованием. В настоящее время примерно 90% ПЭТ-процедур используется для диагностики онкологических заболеваний и оценки динамики их лечения и по 5% – для диагностики сердечно-сосудистой патологии и неврологических расстройств [9].

Анализ принципов организации технологических процессов в центрах и отделениях ПЭТ-диагностики показывает, что их работа может быть организована по полному и сокращенному технологическому циклу, причем полный цикл технологического процесса ПЭТ-диагностики, помимо основных этапов (введение пациентам РФП и дальнейшая визуализация патологического процесса), включает получение радионуклидов, синтез и фасовку РФП, контроль их качества, при необходимости их транспортировку² в другие центры и отделения ПЭТ-диагностики.

При полном технологическом цикле ПЭТ-диагностики основными источниками ионизирующих излучений (ИИИ) являются радионуклиды, получаемые на циклотронах и генераторах, необходимые для последующего синтеза РФП, и сами РФП. Кроме того, ИИИ являются современные ПЭТ-сканеры, совмещенные с компьютерными томографами (ПЭТ/КТ-сканер), которые на основе соединения двух аппаратов и двух методик обследования пациентов в одном аппарате позволяют не только на клеточном уровне определять патологические изменения, происходящие в организме человека, но и предельно точно устанавливать местоположение патологического процесса, что очень важно для последующего лечения больного и контроля его эффективности. Однако это дополнительное включение в ПЭТ-сканер компьютерного томографа существенно увеличивает дозу облучения пациента. Как показывают данные литературы и собственные исследования, однократное стандартное сканирование всего тела с помощью ПЭТ/КТ-сканера за счет внешнего облучения от компьютерного томографа дает эффективную дозу облучения пациентов от 6 до 25 мЗв (в среднем 13 мЗв), а за счет внутреннего облучения в зависимости от введенного РФП – еще от 2,1 до 6,2 мЗв [15–23].

¹ Онлайн-издание о работе российских медиков и ситуации в здравоохранении. <https://medrussia.org/9153-yadernojj-mediciny/> (дата обращения: 10.01.2019). [Online publication on the work of Russian physicians and the health situation. <https://medrussia.org/9153-yadernojj-mediciny/> (Accessed: 10.01.2019) (In Russian)].

² Часть центров изготавливает РФП только для собственных нужд, в связи с этим вопросы обеспечения радиационной безопасности при транспортировке РФП для этих центров в дальнейшем отпадают. [Some of the centers produce the radiopharmaceuticals only for their own needs, hence, the issues of the provision of the radiation safety during the transportation of the radiopharmaceuticals for these centers are not applicable].

В современных ПЭТ-центрах и отделениях могут также использоваться ПЭТ-сканеры, которые совмещены с магнитно-резонансными томографами (ПЭТ/МРТ-сканер). Они, как и ПЭТ/КТ-сканеры, основаны на объединении двух аппаратов и двух методик обследования пациентов, однако этот тип аппаратуры не увеличивает дозу облучения пациентов ионизирующими излучениями. В то же время они создают электромагнитные поля неионизирующей природы, которые могут распространяться в смежные с процедурной помещения, превышая предельно допустимые уровни³.

При оценке особенностей технологий ПЭТ следует учитывать возможность создания передвижных центров. В них могут с успехом использоваться генераторы радионуклидов, которые позволяют обеспечивать работу ПЭТ в отсутствие циклотрона, но их работа, как правило, ограничена небольшим набором и объемом синтезируемых РФП [8], а внедрение микрореактор-

ных технологий, на основе настольных циклотронов, например (micro accelerator H+, USA), позволит упростить синтез радионуклидов и изготовление на их основе РФП [7, 24, 25].

Диагностические возможности ПЭТ определяются прежде всего арсеналом доступных РФП, а также возможностями используемой диагностической аппаратуры. В основном, в ПЭТ-диагностике используются ультракороткоживущие радионуклиды, с периодом полураспада от десятков секунд до 110 минут. В настоящее время в ПЭТ-диагностике может использоваться широкий арсенал различных РФП для изучения биологических процессов, происходящих *in vivo*, и выявления патологических очагов. В таблице представлены наиболее часто применяемые и некоторые перспективные радионуклиды и РФП, синтезированные на их основе, и основные области их применения.

Архитектурно планировочные решения основных помещений центров и отделений (их набор, площадь,

Таблица

Наиболее часто применяемые и некоторые перспективные позитрон-излучающие радионуклиды и РФП, синтезированные на их основе, и основные области их применения [8, 25]

[Table

Most common and some of the perspective positron-emitting radionuclides, radiopharmaceuticals and their main applications]

Радионуклид [radionuclide]	Период полураспада, мин [Half-time, min]	Синтезируемые РФП [radiopharmaceuticals]	Основные области применения [Main applications]
¹¹ C	20,4	¹¹ C-пальмитиновая кислота [¹¹ C-palmitic acid (PA)]	Кардиология [Cardiology]
		¹¹ C-метилгидроксиэфедрин [¹¹ C-meta-Hydroxyephedrine (mHED)]	Кардиология, эндокринология (нейроэндокринные опухоли) [cardiology, endocrinology (neuroendocrinal tumors)]
		¹¹ C-раклоприд [¹¹ C-raclopride (RAC)]	Неврология, психиатрия [neurology, psychiatry]
		¹¹ C-ацетат [¹¹ C-acetate]	Кардиология, онкология [cardiology, oncology]
		¹¹ C-метионин [¹¹ C-methionine]	Онкология, нейроонкология [oncology, neurooncology]
		¹¹ C-холин [¹¹ C-choline]	Онкология [oncology]
		¹¹ C-лейцин [¹¹ C-leucine]	
		¹¹ C-тимидин [¹¹ C-thymidine]	
		¹¹ C-тирозин [¹¹ C-tyrosine (TYR)]	
¹³ N	9,96	¹³ N-аммоний [¹³ N-ammonia]	Кардиология [cardiology]
¹⁵ O	2,04	¹⁵ O-кислород [¹⁵ O-oxygen]	Онкология [oncology]
		¹⁵ O-окись углерода [¹⁵ O-carbon dioxide]	Неврология [neurology]
		¹⁵ O-вода [¹⁵ O-water]	Кардиология, неврология, онкология [cardiology, neurology, oncology]

³ СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russian)]

Радионуклид [radionuclide]	Период полураспада, мин [Half-time, min]	Синтезируемые РФП [radiopharmaceuticals]	Основные области применения [Main applications]
^{18}F	109,8	^{18}F -фторурацил [^{18}F -fluorouracil (FU)] ^{18}F -фтор-L-тимидин [^{18}F -fluoro-L-thymidine (FLT)] ^{18}F -фторэстрадиол [^{18}F -fluoroestradiol (FES)] ^{18}F -фторид натрия [^{18}F - sodium fluoride] ^{18}F -алтансерин [^{18}F -altanserin] ^{18}F -фтортиогептадекановая кислота [^{18}F - fluoro-6-thia-heptadecanoic acid (FTHA)] ^{18}F -фтордезоксиглюкоза [^{18}F -fluorodeoxyglucose (FDG)] ^{18}F -фтормизонидазол [^{18}F -fluoromisonidazole] (MISO) ^{18}F -холин [^{18}F -choline] ^{18}F -фтор-L-m-тирозин ^{18}F -fluoro-l-m-tyrosine (FMT) ^{18}F -ДОФА [^{18}F -DOPA] ^{18}F -флютеметамол [^{18}F -flutemetamol]	Онкология [oncology] Онкология (костные метастазы) [oncology (bone metastases)] Нейропсихиатрия [neuropsychiatry] Кардиология [cardiology] Кардиология, онкология, неврология [cardiology, oncology, neurology] Онкология [oncology] Онкология, нейроонкология [oncology, neurooncology] Неврология, эндокринология (нейроэндокринные опухоли) [neurology endocrinology (neuroendocrinal tumors)] Нейропсихиатрия (болезнь Альцгеймера) [neuropsychiatry (Alzheimer disease)]
^{68}Ga (генераторы) [generators]	68	^{68}Ga -DOTA-TATE ^{68}Ga -DOTA-NOC ^{68}Ga -PSMA	Неврология, онкология [neurology, oncology]
^{82}Rb (генераторы) [generators]	1,3	^{82}Rb - хлорид [^{82}Rb -chloride]	Кардиология [cardiology]

отделка, размещение оборудования, эффективность вентиляции и пр.), организация работы, обеспечение радиационной безопасности и дозиметрического контроля, удобства персонала, пациентов и сопровождающих их зависят от групп радиационной опасности одновременно используемых радионуклидов, их максимальной суммарной активности на рабочем месте и устанавливаемого по этим показателям класса работ с открытыми ИИИ, а категория потенциальной опасности объекта зависит от потенциальной опасности возникновения радиационной аварии и их возможных максимальных последствий для населения и персонала.

В настоящее время основным документом, регламентирующим вопросы проектирования центров и отделений ПЭТ, является СанПиН 2.6.1.3288-15⁴. Однако большинство функционирующих сегодня центров и отделений были спроектированы и построены без учета специальных гигиенических требований обеспечения радиационной безопасности при проведении ПЭТ-диагностики, т.к. документа прямого действия до момента принятия СанПиН 2.6.1.3288-15 в стране не было. В соответствии с этим до его принятия приходилось пользоваться документами, содержащими лишь общие подходы к проектированию данных объектов: ОСПРБ-99/2010 (СП 2.6.1.2612-10⁵) и

⁴ СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии» [SanPiN 2.6.1.3288-15 "Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the preparation and performance of the positron emission tomography" (In Russian)]

⁵ СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» [SP 2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010)" (In Russian)]

МУ 2.6.1.1892-04⁶ или касающимися отдельных вопросов, например требования к вентиляции, освещению и пр. (СанПиН 2.1.3.2630 – 10⁷). В сводах правил, регламентирующих требования к проектированию медицинских организаций (СП 158.13330.2014⁸, СП 118.13330.2012⁹), содержатся лишь отдельные требования к проектированию центров и отделений ПЭТ-диагностики, нашедшие свое отражение в других документах.

Несомненно, при проектировании центров и отделений ПЭТ-диагностики ранее хорошим подспорьем являлись «Рекомендации по размещению основного оборудования», часто прикладываемые к импортному оборудованию. Но, как показывает опыт, эти рекомендации не всегда полностью соответствуют российскому законодательству и не всегда отвечают на вопросы, встающие при рассмотрении проектов, поэтому сегодня ориентироваться на них можно только в случае непротиворечия их российскому законодательству.

Сегодня большинство функционирующих центров и отделений ПЭТ-диагностики относятся к 4 категории потенциальной опасности, т.к., учитывая, что на объекте используются в основном ультра- и короткоживущие радионуклиды, вероятность их распространения за пределы рабочих помещений объекта мала. Однако центры, производящие РФП для сторонних организаций, могут относиться к 3 категории потенциальной опасности, что зависит от вида и суммарной активности производимых и используемых радионуклидов и РФП.

Нормативно-правовыми документами определено, что центр или отделение ПЭТ-диагностики должны состоять из неконтролируемой зоны свободного доступа, где при нормальной эксплуатации объекта радиоактивное загрязнение помещений исключено, и контролируемой, где осуществляются любые виды работ с радионуклидами и РФП и радиоактивное загрязнение возможно. В неконтролируемой зоне должны располагаться кабинеты персонала, архив, регистратура, помещения для предварительного обследования пациентов, ожидальня для пациентов до введения РФП, санитарные комнаты. К этим помещениям специальных требований по обеспечению радиационной безопасности не предъявляется.

Контролируемая зона в зависимости от полноты технологического процесса может содержать блоки радионуклидного обеспечения и радиодиагностического исследования. Блок радионуклидного обеспечения включает в себя помещения для 2 и/или 3 класса работ с открытыми радиоактивными источниками, в том чис-

ле помещения радионуклидного производства (бункер циклотрона, пультовая и вспомогательные помещения), радиохимическую лабораторию, подразделение контроля качества РФП, помещения временного хранения РАО.

Блок радиодиагностических исследований состоит из кабинета ПЭТ, ПЭТ/КТ и/или ПЭТ/МРТ, пультовой, фасовочной, процедурной для ввода пациентам РФП, боксов ожидания сканирования для пациентов с введенным препаратом, дозиметрии, комнат отдыха пациентов после процедуры и санузла. Конкретный набор помещений и их оборудование определяются медико-техническим заданием на проектирование. К планировке, размещению и оборудованию помещений контролируемой зоны предъявляются специальные требования по обеспечению радиационной безопасности, основные положения которых изложены в СанПиН 2.6.1.3288-15.

Между контролируемой и неконтролируемой зонами надлежит располагать санпропускник, планировка и оборудование которого должны предусматривать разделение потоков и исключать возможность беспрепятственного прохода из помещений зоны контролируемого доступа в помещения зоны свободного доступа с целью предотвращения заноса радионуклидов из контролируемой зоны в неконтролируемую.

Учитывая, что часть центров ПЭТ-диагностики при полном технологическом цикле синтезируют РФП для сторонних организаций, встает вопрос их транспортировки – наличия или аренды специализированных транспортных средств, предназначенных для перевозки радионуклидных источников за пределами радиационного объекта, разработки маршрутов их доставки и обеспечения радиационной безопасности на этапе транспортирования. И если основные вопросы транспортирования РФП решены СанПиН 2.6.1.1281-03¹⁰, требования по наличию транспортной площадки для отгрузки и приема РФП, ее местоположению на территории медицинской организации и оборудованию в вышеуказанных документах не определены.

Также при рассмотрении проектов центров и отделений ПЭТ-диагностики следует обращать внимание на логику выстраивания технологических процессов. Все операции должны выполняться последовательно, с максимальным соблюдением и разделением потоков перемещения ИИИ, пациентов, персонала, медицинских и радиоактивных отходов, при оптимизации маршрутов перемещения РФП и радиоактивных отходов в сторону их минимизации.

⁶ МУ 2.6.1.1892-04 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов» [МУ 2.6.1.1892-04 "Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the nuclear medicine diagnostics with radiopharmaceuticals" (In Russian)]

⁷ СанПиН 2.1.3.2630-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность» [SanPiN 2.1.3.2630-10 "Sanitary-hygienic requirements to the organizations, performing medical activities" (In Russian)]

⁸ СП 158.13330.2014 «Свод правил. Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования» [SP 158.13330.2014 "Code of practice. Buildings and premises of the medical facilities. Rules of design" (In Russian)]

⁹ СП 118.13330.2012* «Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06-2009 (с Изменениями N 1, 2)» [SP 118.13330.2012* "Public facilities. Actual version of SNiP 31-06-2009 (with Changes 1 and 2)" (In Russian)]

¹⁰ СанПиН 2.6.1.1281-03 «Санитарные правила по радиационной безопасности персонала и населения при транспортировании радиоактивных материалов (веществ)» [SanPiN 2.6.1.1281-03 "Sanitary rules on the radiation safety of the staff and public during the transportation of the radioactive materials" (In Russian)]

Учитывая, что синтез РФП основан на проведении различных сложных химических реакций с использованием различных химических реактивов, к проектированию, отделке помещений, вентиляции, водоснабжению, организации работы и обеспечению радиационной безопасности ко всем помещениям радиохимической лаборатории также должны предъявляться жесткие требования к обеспечению химической безопасности, а к помещениям синтеза РФП и контроля их качества должны предъявляться требования не только как к радиационным лабораториям, но и как к помещениям по производству лекарственных средств с учетом современных требований GMP (Good Manufacturing Practice) по обеспечению надлежащей производственной практики^{11, 12, 13} производства лекарственных средств (обеспечению стерильности производимых лекарственных форм, эффективности вентиляции и пр.)

К процедурным, где пациентам выполняются по инъекции РФП, должны предъявляться требования не только по обеспечению радиационной безопасности, но и по соблюдению требований асептики и антисептики, изложенных в СанПиН 2.1.3.2630-10.

Учитывая, что современные центры и отделения ПЭТ-диагностики будут оборудоваться в большей степени ПЭК/КТ-сканерами как более эффективными, при их размещении следует учитывать требования СанПиН 2.6.1.1192-03¹⁴ в части, касающейся компьютерных томографов. При проектировании ПЭТ-центров и отделений, оснащенных ПЭТ/МРТ-сканерами, должна быть предусмотрена защита от электромагнитных полей помещений, расположенных вокруг процедурной со сканером, например в виде «клетки Фарадея».

Так как в контролируемой зоне возможно выделение радиоактивных и химических веществ в воздух рабочей зоны, все помещения должны быть оборудованы общей и местной (специальные камеры, вытяжные шкафы) вытяжной вентиляцией с аэрозольными фильтрами радиоактивных газов и приточной вентиляцией, воздух которой перед подачей в рабочую зону должен очищаться от пыли на фильтрах и при необходимости подогреваться для поддержания благоприятного микроклимата. Во всех

контролируемых помещениях вытяжка должна преобладать над притоком воздуха, что позволит создать в этих помещениях отрицательный воздушный баланс и будет препятствовать поступлению загрязненного воздуха в соседние неконтролируемые помещения. В помещениях неконтролируемой зоны приток должен преобладать над вытяжкой.

Все помещения, оборудованные компьютерами, в том числе автоматизированные рабочие места в пультах циклотрона, ПЭТ-, ПЭТ/КТ- и/или ПЭТ/МРТ-сканера, должны проектироваться с учетом требований СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03¹⁵. В том числе это важно при решении вопросов организации рационального освещения.

Также хочется обратить внимание на то, что ни в одном нормативно-правовом документе в настоящее время не рассматриваются вопросы, связанные с устройством, оборудованием и организацией работы передвижных установок ПЭТ-диагностики. Где и как они могут располагаться на территории населенных пунктов при обследовании пациентов, как будет обеспечиваться режим радиационной безопасности персонала, лиц, сопровождающих пациентов, остается не вполне ясным.

Таким образом, сегодня при проектировании и рассмотрении проектов центров и отделений ПЭТ-, ПЭТ/КТ- и ПЭТ/МРТ-диагностики необходимо пользоваться не только СанПиН 2.6.1.3288-15, но и другими нормативно-правовыми документами, регулирующими те или иные требования к обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия на этих объектах. Необходимо решить вопросы, связанные с обеспечением радиационной безопасности при организации работы передвижных ПЭТ, разработать требования к транспортным площадкам отгрузки и приема радиофармпрепаратов, а также аккумулировать практическую информацию по другим вопросам, вызывающим затруднения при проектировании и рассмотрении проектов, с целью внесения дополнений в СанПиН 2.6.1.3288-15.

Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2017 году (заболеваемость и смертность) / Под ред. А.Д. Каприна,

¹¹ Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 03.11.2016 N 77 «Об утверждении Правил надлежащей производственной практики Евразийского экономического союза»: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207780/ (дата обращения: 13.12.18) [Resolution of the council of the Eurasian economic commission №77, 03.11.2016 "On the establishment of the Rules of the proper manufacturing practice of the Eurasian economic Union" (In Russian)]

¹² Приказ Минпромторга России от 14.06.2013 № 916 (ред. от 18.12.2015) «Об утверждении Правил надлежащей производственной практики» (Зарегистрировано в Минюсте России 10.09.2013 N 29938): http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152004/ (дата обращения: 13.12.18) [Decree of the Ministry of Trade of Russia, N916, 14.06.2013 "On the establishment of the rules of the proper manufacturing practice" (In Russian)]

¹³ «ГОСТ Р 57496-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Радиофармацевтические препараты. Общее руководство по организации производства» (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.06.2017 № 508-ст) [GOST R 57496-2017. National standard of the Russian Federation. Radiopharmaceuticals. General guidelines on the management of the manufacturing (In Russian)]

¹⁴ СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [SanPiN 2.6.1.1193-03 "Hygienic requirements on the installation and exploitation of the X-ray rooms, units and X-ray examinations." (In Russian)]

¹⁵ СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [SanPiN 2.2.2/2.4.1340-03 "Hygienic requirements to the personal computers and conduction of works" (In Russian)]

- В.В. Старинского, Г.В. Петровой - М.: МНИОИ им. П.А. Герцена - филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. - 2018. - С. 4 – 8.
2. Чазова, И.Е. Опыт борьбы с сердечно-сосудистыми заболеваниями в России / И.Е. Чазова, Е.В. Ощепкова // Аналитический вестник. – 2015 – № 44 (597). – С. 4 – 8.
 3. Постановление Правительства РФ от 26 декабря 2017 г. N 1640 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» на 2018–2025 годы. 2017. base.garant.ru/71848440/ (дата обращения: 11.12.18).
 4. Дубинкин, Д.О. Развитие ядерной медицины в РФ / Д.О. Дубинкин // Медицина целевые проекты. – 2013. – №16. – С. 71–74.
 5. Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года (в гражданской части). – М., 2016. – 76 с.
 6. Романова, С. Ядерная медицина: состояние и перспективы развития / С. Романова // Remedium. – 2013. – № 6. – С. 8 – 20.
 7. Красикова, Р.Н. Синтез биологически активных соединений, меченных короткоживущими радиоактивными изотопами, – диагностических агентов для позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ). <http://www1.lti-gti.ru/seminar/Seminar8/8.pdf> (дата обращения: 21.11.18).
 8. Национальное руководство по радионуклидной диагностике / Под. ред. Ю.Б. Лимшманова, В.И. Чернова. – В 2-х т. – Томск: STT, 2010. – Т.1. – 290 с.
 9. Zimmermann R. Nuclear Medicine: Radioactivity for Diagnosis and Therapy = La Médecinenucléaire. La radioactivité au service du diagnostic et de la thérapie. Lez-Yulis: EDP Sciences, 2007, 173 p.
 10. Galldiks N., Langen K.J., Pope W.B. From the clinician's point of view – what is the status quo of positron emission tomography in patients with brain tumors. *Neuro Oncol.*, 2015, vol. 17, no. 11, pp. 1434 – 1444.
 11. Дубинкин, Д.О. О гармонизации требований радиационной безопасности для развития ядерной медицины в России / Д.О. Дубинкин // Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы радиационной гигиены», 2014. http://www.fcpr.ru/netcat_files/userfiles/NIIRG_021014/Doklad-FTsPR_Dubinkin.pdf (дата обращения: 21.11.18)
 12. Кумар, А. Обзор российского рынка ядерной медицины / А. Кумар, В.С. Киреев // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 2. – С. 134–138. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42088> (дата обращения: 18.11.2018).
 13. Голикова, Т.А. Развитие ядерной медицины в Российской Федерации. – Доклад министра здравоохранения и социального развития. 2010. https://bio.spbu.ru/news/pdf/Yadernaya_Meditcina_29042010.pdf (дата обращения: 21.11.18)
 14. Костылев, В.А. Статус и перспектива развития методов позитронно-эмиссионной томографии в России / В.А. Костылев, О.А. Рыжикова, В.Б. Сергиенко // Медицинская физика. – 2015. – Т. 2, с. 5–16.
 15. Чипига, Л.А. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России / Л.А. Чипига, И.А. Звонова, Д.В. Рыжкова, М.А. Меньков, М.Б. Долгушин // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10 № 4. – С. 31 – 41.
 16. Martin C.J., Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Brit. J Radiol.*, 2007, Vol. 80, pp. 639–647.
 17. Iball G.R., Bebbington N.A., Burniston M. (et al.). A national survey of computed tomography doses in hybrid PET-CT and SPECT-CT examinations in the UK. *Nucl. Med. Commun.*, 2017, Vol. 38, pp. 459–470.
 18. Willowson K.P., Bailey E.A., Bailey D.L. A retrospective evaluation of addition dose associated with low dose FDG protocols in whole-body PET/CT. *Austral. Phys. Eng. Sci.*, 2012, Vol. 35, №1, pp. 49–53.
 19. Radiation Protection 180 pt. 2. Diagnostic Reference Levels in Thirty-six European Countries. European Commission, 2014, 73 p.
 20. Avramova-Cholakova S., Ivanova S., Petrova E., Garcheva M., Vassileva J. Patient Doses from PET-CT Procedures. *Radiat. Protect. Dosim.*, 2015, Vol. 165, №1–4, pp. 430–433.
 21. Etard C., Celier D., Roch P., Aubert B. National survey of patient doses from whole-body FDG PET-CT examinations in France in 2011. *Radiat. Protect. Dosim.*, 2012, Vol. 152, № 4, pp. 334–338.
 22. International Commission on Radiological Protection. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. Ann. ICRP 44(2S), 2015.
 23. Чипига, Л.А. Оптимизация радиационной защиты пациентов при проведении диагностических исследований методом позитронно-эмиссионной томографии: автореф. дисс ... канд. технических наук / Чипига Л.А. – СПб. – 2018. – 24 с.
 24. Кодина, Г.Е. Методы получения радиофармацевтических препаратов и радионуклидных генераторов для ядерной медицины / Г.Е. Кодина, Р.Н. Красикова. – М.: МЭИ, 2014. – 282 с.
 25. Позитронная эмиссионная томография: Руководство для врачей / под ред. А.М. Гранова и Л.А. Тютина. – СПб.: Фолиант, 2008. – 368 с.

Поступила: 11.01.2019 г.

Мироненко Ольга Васильевна – доктор медицинских наук, профессор кафедры организации здравоохранения и медицинского права Санкт-Петербургского государственного университета, декан медико-профилактического факультета, заведующая кафедрой коммунальной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербургский Государственный университет. **Адрес для переписки:** 195067, Санкт-Петербург, Пискаревский пр. 47; E-mail: miroolga@yandex.ru

Балтрукова Татьяна Борисовна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Башкетова Наталия Семеновна – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

Горский Григорий Анатольевич – начальник отдела радиационной гигиены Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу, Санкт-Петербург, Россия

Крюкова Татьяна Васильевна – начальник учебного отдела Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Федорова Екатерина Андреевна – студентка 6 курса медико-профилактического факультета Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: МIRONENKO О.В., Балтрукова Т.Б., Башкетова Н.С., Горский Г.А., Крюкова Т.В., Федорова Е.А./ Гигиенические требования к проектированию центров и отделений позитронно-эмиссионной томографии // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 25-33. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-25-33

Hygienic requirements to the design of the positron-emission tomography centers and departments

Olga V. Mironenko^{1,4}, Tatyana B. Baltrukova¹, Nataliya S. Bashketova², Grigory A. Gorskiy², Tatyana V. Kryukova³, Ekaterina A. Fedorova¹

¹North-western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Ministry of Healthcare and social development of the Russian Federation, St-Petersburg, Russia

²Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being of Saint-Petersburg, Saint-Petersburg, Russia

³Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-being, Saint-Petersburg, Russia

⁴ St.-Petersburg University, Saint-Petersburg, Russia

The aim of the current study is to provide a critical analysis of the current hygienic requirements to the design of the PET, PET/CT and PET/MRI centers and departments. The study included the evaluation of the Russian legislative documents containing the requirements for the design of the PET centers and departments, engineering, technological, licensing and other documentation of the working PET centers in St-Petersburg. It was determined, that, despite the existence of the actual direct action document (SanPiN 2.6.1.3288-15 "Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the preparation and performance of the positron emission tomography", it is necessary to consider the hygienic requirements from other legislative documents, hence complicating the process of design and project approval. Some of the actual issues related to the design and allocation of these objects have not been considered in detail: requirements for the transfer platforms for the dispatch and reception of the radiopharmaceuticals, management of the activities and allocation of the mobile PET complexes, etc. Considering the planned increase of the number of PET centers in Russia, it is necessary to further increase and optimize the existing legislation.

Key words: PET centers and departments, design, radiation safety, hygienic expertise.

References

1. Malignant neoplasms in Russia in 2017 (mortality and morbidity). Ed. by A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, G.V. Petrova. Moscow, MNIIO after P.A. Gerzen – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russia, 2018, pp. 4-8 (In Russian).
2. Chasova I.E., Oshchepkova E.V. Experience of the control of the cardiovascular diseases in Russia. *Analiticheskiy vestnik = Analytical messenger*, 2015, № 44 (597), pp. 4 – 8. (In Russian)
3. Resolution of the Government of the Russian Federation N1640, 26.12.2017 "On the establishment of the governmental programme of the Russian Federation "Development of the healthcare" on 2018-2025". Available from: base.garant.ru/71848440/ (Accessed: 11.12.2018) (In Russian).
4. Dubinkin D.O. Development of the nuclear medicine in the Russian Federation. *Medsina tselevye proekty = Medicine target projects*, 2013, No. 16, pp. 71-74. (In Russian).
5. Passport of the program of the innovative development and technological modernization of the governmental corporation "Rosatom" up to 2030 (civilian part). Moscow, 2016, 76 p. (In Russian).
6. Romanova S. Nuclear medicine – current state and trends of the development. *Remedium*, 2013, No. 6, pp. 8-20. (In Russian).
7. Krasikova R.N. Synthesis of the biologically active substances marked with short-lived radioactive isotopes – diagnostic agents for the positron-emission tomography (PET). Available from: <http://www1.lti-gti.ru/seminar/Seminar8/8.pdf> (Accessed: 21.11.18). (In Russian).
8. National guidebook on the nuclear medicine. Ed. by Ju.B. Limshmanov, V.I. Chernov. In two vol., Tomsk, STT, 2010, Vol. 1, 290 p. (In Russian).
9. Zimmermann R. Nuclear Medicine: Radioactivity for Diagnosis and Therapy = La Médecine nucléaire. La radioactivité au service du diagnostic et de la thérapie. Lez-Yulis: EDP Sciences, 2007, 173 p.

Olga V. Mironenko

North-western State Medical University named after I.I. Mechnikov; St.-Petersburg University

Address for correspondence: Piskarevskiy av., 47, Saint-Petersburg, 195067, Russia; E-mail: miroolga@yandex.ru

10. Galldiks N., Langen K.J., Pope W.B. From the clinician's point of view – what is the status quo of positron emission tomography in patients with brain tumors. *Neuro Oncol.*, 2015, vol. 17, no. 11, pp. 1434 – 1444.
11. Dubinkin D.O. On the harmonization of the requirements of the radiation safety for the development of the nuclear medicine in Russia / International scientific-practical conference "Actual issues of the radiation hygiene", 2014. Available from: http://www.fcpr.ru/netcat_files/userfiles/NIIRG_021014/Doklad-FTsPR_Dubinkin.pdf (Accessed: 21.11.18) (In Russian).
12. Kumar A., Kireev V.S. Review of the russian market of the nuclear medicine. *Fundamentalnye issledovaniya = Fundamental research*, 2018, No. 2, pp.134-138. Available from: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42088> (Accessed: 18.11.2018). (In Russian).
13. Golikova T. A. Development of the nuclear medicine in the Russian Federation – report of the minister of healthcare and social development, 2010. Available from: https://bio.spbu.ru/news/pdf/Yadernaya_Meditcina_29042010.pdf (Accessed: 21.11.18) (In Russian).
14. Kostilev V.A., Rizhikova O.A., Sergienko V.B. Status and perspectives of the development of the PET in Russia. *Meditinskaya fizika = Medical physics*, 2015, Vol. 2, pp. 5–16. (In Russian).
15. Chipiga L.A., Zvonova I.A., Ryzhkova D.V., Menkov M.A., Dolgushin M.B. Levels of patients exposure and a potential for optimization of the pet diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4):31-43. (In Russian).
16. Martin C.J., Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Brit. J Radiol.*, 2007, Vol. 80, pp. 639–647.
17. Iball G.R., Bebbington N.A., Burniston M. (et al.). A national survey of computed tomography doses in hybrid PET-CT and SPECT-CT examinations in the UK. *Nucl. Med. Commun.*, 2017, Vol. 38, pp. 459–470.
18. Willowson K.P., Bailey E.A., Bailey D.L. A retrospective evaluation of addition dose associated with low dose FDG protocols in whole-body PET/CT. *Austral. Phys. Eng. Sci.*, 2012, Vol. 35, №1, pp. 49-53.
19. Radiation Protection 180 pt. 2. Diagnostic Reference Levels in Thirty-six European Countries. European Commission, 2014, 73 p.
20. Avramova-Cholakova S., Ivanova S., Petrova E., Garcheva M., Vassileva J. Patient Doses from PET-CT Procedures. *Radiat. Protect. Dosim.*, 2015, Vol. 165, №1–4, pp. 430–433.
21. Etard C., Celier D., Roch P., Aubert B. National survey of patient doses from whole-body FDG PET-CT examinations in France in 2011. *Radiat. Protect. Dosim.*, 2012, Vol. 152, № 4, pp. 334–338.
22. International Commission on Radiological Protection. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. *Ann. ICRP* 44(2S), 2015.
23. Chipiga L.A. Optimization of the radiation safety of the patients in PET diagnostics: abstract of a PhD thesis. St-Petersburg, 2018, 24 p. (In Russian).
24. Kodina G.E., Krasikova R.N. Methods of the production of the radiopharmaceuticals and radionuclide generators for the nuclear medicine. Moscow, 2014, 282 p. (In Russian).
25. Positron emission tomography: guidelines for the physicians. Ed. by A.M. Granov and L.A. Tutin, St-Petersburg, 2008, 368 p. (In Russian).

Received: January 11, 2019

For correspondence: Olga V. Mironenko – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of public health and medical law of the Saint-Petersburg University, Dean of the Faculty of Health and Prevention, Head of the Department of Communal Hygiene of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; St.-Petersburg University (Piskarevskiy pr., 47, Saint-Petersburg, 195067, Russia; E-mail: miroolga@yandex.ru)

Tatyana B. Baltrukova – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Hygiene of the conditions of education, training, labor and radiation hygiene of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg, Russia

Natalya S. Bashketova – chief of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Grigory A. Gorskiy – chief of the radiological hygiene department of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Tatyana V. Kryukova – chief of the organizational and methodical Department of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Saint-Petersburg, Russia

Ekaterina A. Fedorova – a student of the Faculty of Health and Prevention of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Mironenko O.V., Baltrukova T.B., Bashketova N.S., Gorskiy G.A., Kryukova T.V., Fedorova E.A. Hygienic requirements to the design of the positron-emission tomography centers and departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 2, pp.25-33. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-25-33

Обоснование методологических и методических подходов к оценке доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия

И.К. Романович, Т.А. Кормановская, Н.А. Королева, К.А. Сапрыкин

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для принятия решения о необходимости проведения реабилитационных мероприятий или применения мер защиты населения, а также о соответствии реабилитированных участков территории установленным критериям или референтным уровням требуется корректная оценка доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия. Нормативного документа, регламентирующего оценку доз облучения этой категории населения, в настоящее время не существует. В результате анализа нормативно-методических документов и научных публикаций по радиационному обследованию участков территории, подвергшихся радиоактивному загрязнению, и оценки доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационных объектов, на радиоактивно загрязненных территориях и облучающегося в повышенных дозах природными радионуклидами, установлено, что применяемые в этих методических указаниях подходы, модели и формулы расчета доз облучения от техногенных и природных радионуклидов могут быть применимы для населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия. При радиационном обследовании ограниченных по масштабам участков территории (получении исходных данных для расчетов) количество контрольных точек измерения и отбираемых проб должно быть достаточным для достоверной оценки доз облучения населения.

Ключевые слова: ядерное наследие, радиационное наследие, реабилитация, дозы облучения, техногенные радионуклиды, природные радионуклиды.

Введение

Ядерное и радиационное наследие страны приводит к дополнительному облучению населения, проживающего в зоне их влияния [1–5].

В настоящее время существует значительное количество методических указаний и рекомендаций по радиационному обследованию участков территории, подвергшихся радиоактивному загрязнению, и оценке доз облучения населения, проживающего в зонах наблюдения радиационных объектов (МР 2.6.1.0063-12), на радиоактивно загрязненных территориях (МУ 2.6.1.2153-06, МУ 2.6.1.2003-05, МР 2.6.1.0006-10) и облучающихся в повышенных дозах природными радионуклидами (МУ 2.6.1.2397-08, МУ 2.6.1.1088-02). Однако облучение населения, проживающего вблизи объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности, имеет свои особенности, а нормативного документа, регламентирующего оценку доз облучения этой категории населения, в настоящее время не существует.

Такой нормативный документ необходим для корректной оценки доз облучения населения при принятии решения о необходимости проведения реабилитационных мероприятий или применения мер защиты населения и при принятии решения о соответствии реабилитированных участков территории установленным критериям или референтным уровням. Проведение реабилитационных мероприятий промышленных площадок объектов ядерного наследия должно проводиться, если облучение населения при их использовании превысит 0,3 мЗв/год (критерий освобождения от регулирующего (радиационного) контроля) [6–9]. Применение мер защиты в отношении населения, проживающего в зоне влияния объекта ядерного или радиационного наследия, на радиоактивно загрязненных территориях проводится при превышении критерия в 1 мЗв/год [10].

Цель исследования – разработка и обоснование методологических и методических подходов к оценке доз облучения населения, проживающего вблизи объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности

Романович Иван Константинович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.
Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности, с использованием результатов анализа существующих методических документов по оценке доз облучения населения и научных публикаций по данному вопросу.

Краткая характеристика радиационной обстановки и путей облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия

Характеристика объектов ядерного и радиационного наследия и радиационной обстановки на площадках их размещения, доз облучения населения, проживающего вблизи этих объектов, а также на радиоактивно загрязненных территориях нами дана в предыдущих публикациях [2, 4, 11–16].

На основе анализа источников ионизирующего излучения, выявленных на объектах ядерного наследия и на прилегающих территориях, установлен перечень основных радионуклидов, обуславливающих облучение населения, проживающего в зоне их влияния. К таким основным радионуклидам относятся: H-3, C-14, Fe-55, Co-60, Sr-90, Sb-125, Cs-137, Ra-226, Th-232, U-234, U-238, U-природный, Pu-239, Pu-240, Am-241 [2, 7].

Загрязнение окружающей среды природными радионуклидами на предприятиях ядерной и неядерных отраслей промышленности представлено радионуклидами уранового и ториевого рядов [4].

При радиоактивном распаде U-природного образуются следующие дочерние радионуклиды – Th-234, Ra-234m, U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210 [4].

При радиоактивном распаде Th-природного образуются следующие дочерние радионуклиды – Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Tl-208 (0.36), Po-212 (0.64) [4].

Установлено, что население, проживающее вблизи объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности, подвергается облучению по всем известным путям облучения:

- внешнему облучению от радионуклидов, содержащихся в почве или конструкциях зданий;
- внутреннему облучению за счет ингаляции радионуклидов, находящихся в воздухе в результате их ресуспензии, и за счет радона;
- внутреннему облучению за счет поступления радионуклидов в организм с продуктами питания (растительно-го и животного происхождения) и питьевой водой.

Следовательно, методический документ по оценке доз облучения населения, проживающего вблизи объектов и территорий, загрязненных техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной и неядерных отраслей промышленности, должен определять

для всех перечисленных выше источников и путей облучения:

- перечни необходимых для расчета доз исходных данных;
- методику радиационного контроля с целью их получения;
- модели формирования доз и полученные на их основе расчетные формулы.

Кроме того, должна быть обеспечена возможность расчета средней годовой эффективной дозы облучения критической группы населения и средней годовой эффективной дозы облучения жителей населенного пункта.

Оценка доз внешнего облучения от радионуклидов, содержащихся в объектах внешней среды

В МР 2.6.1.0063-12¹ рассматриваются следующие модели внешнего облучения:

- от подстилающей поверхности;
- от радиоактивного облака;
- при погружении в загрязненную радионуклидами воду и при нахождении на поверхности воды (на лодке и т.п.);
- от почвы, загрязненной при разливах рек и при использовании загрязненной воды для полива сельскохозяйственных и огородов.

Суммарная доза техногенного внешнего облучения от подстилающей поверхности определяется следующими основными компонентами:

- гамма-излучением Cs-137, выпавшего на поверхность земли в результате испытаний ядерного оружия (глобальные выпадения);
- гамма-излучением Cs-137 «чернобыльского» происхождения (остальные радионуклиды к настоящему времени либо распались, либо их вкладом в дозу внешнего облучения можно пренебречь);
- гамма-излучением локального радиоактивного загрязнения за счет работы радиационных объектов.

В качестве базовой модели используется модель облучения человека на открытой местности. Величина средней годовой эффективной дозы i -й группы населения (СГЭД i -й группы населения при облучении от подстилающей поверхности гамма-излучением k -го радионуклида) $E_{i,\varepsilon}^k$ определяется следующим образом:

$$E_{i,\varepsilon}^k = e_{i,\varepsilon}^k \cdot \sigma_k, \text{ мкЗв/год, (1)}$$

где, $e_{i,\varepsilon}^k$ – дозовый коэффициент при внешнем облучении от подстилающей поверхности i -й группы населения гамма-излучением k -го радионуклида, (мкЗв/год)/(кБк/м²);

σ_k – поверхностная активность k -го радионуклида на почве, кБк/м².

Для получения полной дозы внешнего облучения i -й группы населения необходимо с использованием выражения (1) рассчитать вклады в дозу внешнего облучения всех входящих в состав радиоактивного загрязнения техногенных радионуклидов и просуммировать их.

¹ МР 2.6.1.0063-12. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. – 55 с. [MR 2.6.1.0063-12 Control of the doses of the public residing in a surveillance zone of the radiation facility in normal operation situation and radiation accidents. Methodical recommendations. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2013, 55 p.]

Далее в МУ 2.6.1.0063-12 приводятся значения антропогенных факторов уменьшения дозы, значения дозовых коэффициентов для расчета СГЭД при облучении человека от радиоактивного облака (на открытой местности), значения дозовых коэффициентов для расчета СГЭД при погружении в загрязненную радионуклидами воду и при нахождении на поверхности воды, значения дозовых коэффициентов для расчета СГЭД внешнего облучения от почвы на берегах рек, подвергшихся загрязнению, и при использовании загрязненной воды для полива сельскохозяйственных и огородов.

Широкий спектр рассмотренных ситуаций облучения и техногенных радионуклидов позволяет использовать приведенные в данном документе модели облучения при формировании методического документа по оценке доз облучения населения, проживающего вблизи объектов ядерного наследия. Но все эти модели ориентированы только на загрязнение территории выбросами и сбросами радиационного объекта, что не в полной мере соответствует ситуациям облучения на объектах ядерного наследия.

В МУ 2.6.1.2003-05² используется следующая градация НП по типам:

– тип I (село или поселок городского типа): населенный пункт с числом жителей не более 10 тыс. человек, в котором большинство домов одноэтажные с личными подсобными хозяйствами (ЛПХ);

– тип II (поселок городского типа или город): населенный пункт с числом жителей не более 100 тыс. человек, в котором, наряду с одноэтажными, имеются многоэтажные дома без ЛПХ и значительная часть дозообразующих пищевых продуктов приобретается в торговой сети;

– тип III (город): населенный пункт, в котором большая часть жителей проживает в многоэтажных домах без ЛПХ, приобретает пищевые продукты в торговой сети, а большая часть улиц и дорог имеет твердое покрытие.

Содержание и объем текущего радиационного мониторинга, а также выбор способа расчета доз определяются уровнями облучения критических групп жителей населенных пунктов. В соответствии с этим все НП, расположенные на загрязненных территориях, подразделяются на две группы:

– НП группы 1: населенные пункты, где предварительная оценка СГЭД критической группы населения ($E_{КГр}$) составляет величину менее 1,0 мЗв/год;

– НП группы 2: населенные пункты, где предварительная оценка $E_{КГр}$ составляет величину, равную или большую 1,0 мЗв/год.

В соответствии с МУ 2.6.1.2003-05 оценку СГЭД внешнего облучения критической (по внешнему облучению) группы населения для НП группы 1 выполняют путем модельных расчетов. Исходными данными для расчета являются средняя величина поверхностной активности ^{137}Cs в почве на территории НП (по данным Росгидромета) и структура жилого фонда, характерная для НП данного типа.

Сначала определяют среднюю годовую эффективную дозу внешнего облучения жителей НП ($E_{НП}^{ext}$) по формуле:

$$E_{НП}^{ext} = k_y \cdot \sigma_{137} \cdot \text{мЗв/год}, \quad (2)$$

где, σ_{137} – среднее значение поверхностной активности ^{137}Cs в почве на территории данного НП в рассматриваемом году (по данным Росгидромета), кБк/м²;

k_y – дозовый коэффициент, мЗв · м²/(кБк · год).

Численные значения коэффициентов k_y на период 2012–2020 гг. приведены в таблице 6.1 МУ 2.6.1.2003-05. Они определены для усредненной структуры жилого фонда, характерной для средней полосы Российской Федерации:

– НП типа I: 60% населения проживает в одноэтажных деревянных домах, 40% – в одноэтажных каменных домах;

– НП типа II и III: 20% населения проживает в одноэтажных деревянных домах, 40% – в одноэтажных каменных домах, 40% – в многоэтажных домах.

Если структура жилого фонда в населенном пункте существенно отличается от приведенной выше, то для выполнения дозовых расчетов используют данные о фактической структуре жилого фонда в этом НП. В этом случае $E_{НП}^{ext}$ определяют согласно формуле:

$$E_{НП}^{ext} = \sigma_{137} \cdot \sum_{k=1} w_k \cdot k_{jk} \cdot \text{мЗв/год}, \quad (3)$$

где, w_k – доля населения, проживающего в домах k -го типа (одноэтажных деревянных, одноэтажных каменных, многоэтажных), отн. ед.;

k_{jk} – дозовый коэффициент, мЗв × м²/(кБк × год).

Численные значения коэффициентов k_{jk} на период 2012–2020 гг. приведены в таблице 6.2 МУ 2.6.1.2003-05.

В НП группы 2 величину $E_{НП}^{ext}$ рассчитывают по формуле (3) с использованием фактических данных о структуре жилого фонда в населенном пункте.

СГЭД внешнего облучения критической (по внешнему облучению) группы населения ($E_{КГр}^{ext}$) для населенных пунктов типа I определяют согласно выражению:

$$E_{КГр}^{ext} = 1,8 \cdot E_{НП}^{ext} \quad (4)$$

а для населенных пунктов типов II или III – согласно выражению:

$$E_{КГр}^{ext} = 2,0 \cdot E_{НП}^{ext} \quad (5)$$

Таким образом, в МУ 2.6.1.2003-05 дана подробная методология учета антропогенных факторов при проведении дозовых оценок, в том числе при определении средних доз критической группы населения, но все это представлено только для радиоактивного загрязнения ^{137}Cs . Кроме того, оценка дозы облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационных объектов и на радиоактивно загрязненной территории, в соответствии с действующими нормативными документами производится только за счет техногенных радионуклидов, без учета вклада природных.

² МУ 2.6.1.2003-05. Оценка средних годовых доз облучения критических групп жителей населенных пунктов РФ, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005. – 19 с. [МУ 2.6.1.2003-05. Assessment of the mean annual doses of the critical groups of the population of the residential areas of the Russian Federation radioactively contaminated after the Chernobyl NPP accident. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2005, 19 p.]

Оценка доз внутреннего облучения

Оценка доз внутреннего облучения производится по набору моделей, соответствующих количеству путей внутреннего облучения. В МР 2.6.1.0063-12 рассматриваются следующие потенциально возможные критические группы населения: представители взрослого населения (> 17 лет), дети в возрасте 8–12 лет и дети младшего возраста (1–2 года). Каждая из моделей включает свой дозовый коэффициент, связывающий концентрацию радионуклидов в объектах окружающей среды с характеристикой облучения человека – эффективной дозой. Дополнительными данными для расчета ингаляционного поступления радионуклидов в организм человека является среднегодовой объем вдыхаемого воздуха, а для расчета поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания и водой – их годовое потребление. Годовое потребление продуктов питания должно быть оценено на основании региональных данных.

В МР 2.6.1.0063-12 рассматриваются следующие модели внутреннего облучения:

- пероральный путь, т.е. внутреннее облучение за счет поступления техногенных радионуклидов при потреблении питьевой воды из источников хозяйственно-питьевого водоснабжения, использующих воду поверхностных водоемов, а также при потреблении пищевых продуктов, загрязненных в данной местности вследствие выбросов радиационного объекта;

- ингаляционный путь облучения, т.е. внутреннее облучение от поступления радионуклидов в организм человека через органы дыхания;

- ингаляционный путь облучения в результате вторичного подъема выпавших радионуклидов (ресуспензия).

По результатам анализа сведений об источниках выброса устанавливают перечень радионуклидов, выбрасываемых в атмосферный воздух, химическую форму веществ, в виде которых эти радионуклиды поступают в окружающую среду, и дисперсный состав выбрасываемых аэрозолей. Элементный состав выброса, дисперсный состав выбрасываемых аэрозолей и химическую форму радионуклидов следует принимать во внимание при последующих оценках их миграционной способности в окружающей среде, а также в ряде случаев при определении дозовых коэффициентов.

Дозу внутреннего облучения за счет перорального поступления радионуклидов с пищей и водой оценивают по формуле:

$$E_{i,ing}^{int} = \sum_k \sum_j e_{i,ing}^k \cdot V_{ij} \cdot S_{kj}, \text{ мЗв/год, (6)}$$

Где, $e_{i,ing}^k$ – зависящий от возраста дозовый коэффициент для k -го радионуклида в случае его перорального поступления в организм человека из i -й группы населения, мЗв/Бк;

V_{ij} – годовое потребление j -го продукта (питьевой воды и основных пищевых продуктов) для i -й группы населения, кг/год;

S_{kj} – среднегодовая удельная активность k -го радионуклида в j -м пищевом продукте, Бк/кг.

Значения дозовых коэффициентов $e_{i,ing}^k$ представлены в приложении 2 НРБ-99/2009 для критических возрастных групп населения.

При отсутствии результатов измерений ожидаемая удельная активность радионуклида в пищевом продукте, производимом в ЗН радиационного объекта, может быть оценена на основе данных о поверхностной активности радионуклида на почве и численных значений коэффициентов перехода радионуклида из почвы в растительность и пищевые продукты.

Численные значения коэффициентов перехода в растительность и пищевые продукты в зависимости от типа почв для наиболее значимых и биологически активных (т.е. включающихся в миграционную цепочку почва – растение – животное – человек) долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr приведены в таблицах 6.9 и 6.10 МР 2.6.1.0063-12.

При отсутствии измерений для оценки значения ожидаемой удельной активности радионуклидов в рыбе в водоемах ЗН используют значения равновесных отношений удельных активностей радионуклидов в пресноводной рыбе к их объемным активностям в воде (коэффициент накопления), представленных в таблице 6.12 МР 2.6.1.0063-12.

Для оценки дозы внутреннего облучения по ингаляционному пути поступления радионуклидов в организм человека используют формулу:

$$E_{i,inh}^{int} = \sum C_{k,a} \cdot Br_i \cdot e_{i,inh}^k \cdot [(1 - F_i) + 0,3 \cdot F_i], \text{ мЗв/год, (7)}$$

где, $e_{i,inh}^k$ – дозовый коэффициент для k -го радионуклида и представителей i -й группы населения в случае ингаляционного поступления, мЗв/Бк;

Br_i – зависящий от возраста человека среднегодовой объем вдыхаемого воздуха для i -й группы населения, м³/год (принимается равным: 1900 м³/год – для детей 1–2 лет, 5200 – для детей в возрасте 8–12 лет и 8100 – для взрослых);

$C_{k,a}$ – среднегодовая объемная активность k -го радионуклида в приземном слое воздуха, Бк/м³;

F_i – годовая доля времени, в течение которого представитель i -й группы населения находится внутри помещений, отн. ед., представлены в таблицах 6.6, 6.7 рассматриваемых рекомендаций;

0,3 – принятое отношение объемных активностей радионуклидов в воздухе внутри помещения и вне помещения.

Значения дозовых коэффициентов $e_{i,inh}^k$ представлены в приложении 2 НРБ-99/2009 для критических возрастных групп населения.

В соответствии с МУ 2.6.1.2003-05 оценку СГЭД внутреннего облучения выполняют одним из двух способов.

Первый способ основан на использовании результатов СИЧ-измерений жителей данного НП. Расчет средней по НП дозы внутреннего облучения населения производится по формуле:

$$E_{HI}^{int} = k_d \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Q_i / M_i), \text{ мЗв/год, (8)}$$

где, k_d – дозовый коэффициент; $k_d = 2,3 \text{ мЗв} \times \text{кг}/(\text{кБк} \times \text{год})$;

Q_i – содержание ^{137}Cs в организме i -го человека по данным СИЧ-измерения, кБк;

M_i – масса тела i -го человека, кг;

n – количество обследованных на СИЧ жителей.

В связи с существующей сезонной зависимостью содержания ^{137}Cs в организме для корректной оценки среднего за год содержания при однократном (один раз в течение года) измерении на СИЧ необходимо полученные результаты умножить на поправочные коэффициенты, учитывающие эту зависимость. Поправочные коэффициенты должны быть получены из результатов СИЧ-измерений, проведенных в разные сезоны года в течение периода усреднения в 2–3 НП каждого типа.

Второй способ основан на использовании результатов измерений удельной активности ^{137}Cs в потребляемых населением данного НП пищевых продуктах. Расчет средней по НП дозы внутреннего облучения населения производится по формуле:

$$E_{\text{НП}}^{\text{int}} = d_k \cdot \sum_i A_i \cdot V_i^{\text{эфф}} \cdot K_i, \text{ мЗв/год.} \quad (9)$$

где, A_i – средняя удельная активность ^{137}Cs в i -м пищевом продукте, Бк/кг;

$V_i^{\text{эфф}}$ – эффективное годовое потребление i -го пищевого продукта, учитывающее вклад в дозу других компонентов рациона питания, кг/год;

K_i – коэффициент снижения содержания ^{137}Cs в годовом i -м пищевом продукте по сравнению с исходным, вследствие его кулинарной обработки, отн. ед.; $K_i = 1,0$ для молока, $K_i = 0,5$ для грибов;

d_k – дозовый коэффициент для пищевого пути поступления ^{137}Cs в организм человека; для взрослых мужчин и женщин принято среднее значение $d_k = 1,2 \times 10^{-5} \text{ мЗв} \times \text{Бк}^{-1}$.

При расчете величины $E_{\text{НП}}^{\text{int}}$ следует использовать численные значения $V_i^{\text{эфф}}$, соответствующие рациону питания взрослого человека.

Расчеты ведут по данным о содержании ^{137}Cs в двух основных дозообразующих пищевых продуктах – молоке и грибах лесных. Численные значения $V_i^{\text{эфф}}$ для этих продуктов на период 2012–2020 гг. приведены в таблице 7.1 МУ 2.6.1.2003-05. При этом поступление ^{137}Cs с молоком, указанное в данной таблице, эквивалентно (по формируемой дозе) поступлению ^{137}Cs и ^{90}Sr со всеми продуктами местного сельскохозяйственного производства, а с грибами – поступлению со всеми продуктами природного происхождения.

При выполнении дозовых расчетов для НП группы 1 допускается использовать оценочные значения величины A_p , полученные по формуле:

$$A_i = K P_i \cdot \sigma_{137}, \text{ Бк/кг,} \quad (10)$$

где, $K P_i$ – коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в i -й пищевой продукт, $10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$; численные значения этого параметра на период 2012–2020 гг. для молока и различных групп (видов) грибов, производимых и произрастающих на почвах разных групп, приведены в таблицах 7.2 и 7.3 МУ 2.6.1.2003-05;

σ_{137} – поверхностная активность ^{137}Cs в почве на территории НП в рассматриваемом году (по данным Росгидромета), $\text{кБк}/\text{м}^2$.

Если почвенный покров на территории хозяйства или в лесных массивах сформирован различными группами почв, то для расчетов используют средневзвешенное по площадям, занимаемым этими почвами, численное значение коэффициента перехода.

Представленная в вышеописанных документах методология оценки доз внутреннего облучения в большей мере применима к дозовым оценкам для населения, проживающего вблизи объектов ядерного наследия. Но и в этом случае имеется определенная специфика, требующая учета.

Оценка доз облучения населения природными радионуклидами

Методические указания МУ 2.6.1.2397-08³ предназначены для оценки доз:

- внешнего облучения за счет природных радионуклидов, содержащихся в строительных материалах и конструкциях зданий, а также рассеянных в окружающей среде;

- внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона (^{222}Rn – радон и ^{222}Rn – торон) и их короткоживущих дочерних продуктов (ДПР и ДПТ), содержащихся в воздухе жилых и общественных зданий и производственных помещений;

- внутреннего облучения за счет ингаляции природных радионуклидов, содержащихся в приземном слое атмосферы на территории населенных пунктов;

- внутреннего облучения за счет перорального поступления долгоживущих природных радионуклидов, содержащихся в воде источников питьевого водоснабжения и пищевых продуктах.

В соответствии с МУ 2.6.1.2397-08 исходные данные для расчета индивидуальных годовых эффективных доз групп населения с повышенными уровнями облучения за счет природных источников ионизирующего излучения должны включать:

- данные о среднегодовых значениях эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) дочерних продуктов изотопов радона в воздухе жилых, общественных и производственных зданий, а также в атмосферном воздухе на территории населенного пункта (района и т.п.);

- данные о средних значениях мощности дозы гамма-излучения в жилых, общественных и производственных зданиях, а также на территории населенного пункта (района и т.п.);

- данные о содержании природных радионуклидов в воде источников питьевого водоснабжения;

- данные об основных компонентах рациона питания населения, годовом потреблении пищевых продуктов и значениях удельной активности природных радионуклидов в них;

- данные о среднегодовом содержании пыли (аэрозолей) в приземном слое атмосферного воздуха и удельной активности долгоживущих природных радионуклидов в пыли на территории населенного пункта;

³ МУ 2.6.1.2397-08. Оценка доз облучения групп населения, подвергающихся повышенному облучению за счет природных источников ионизирующего излучения. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 20 с. [МУ 2.6.1.2397-08. Assessment of the doses of the groups of the public with increased exposure by the natural sources of the ionizing radiation. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rosпотребнадзор, 2009, 20 p.]

– сведения о среднегодовом содержании пыли (аэрозолей) и удельной активности долгоживущих природных радионуклидов в пыли в воздухе рабочей зоны.

Оценку суммарных значений средних индивидуальных годовых эффективных доз облучения групп населения с повышенными уровнями природного облучения рассчитывают по формуле:

$$E_{\Sigma} = E_{\text{ЖД}} + E_{\text{ОЗд}} + E_{\text{ПрЗд}} + E_{\text{ОМ}} + E_{\text{ПП}} + E_{\text{ПВ}} + E_{\text{НР}}, \text{ мЗв/год}, (11)$$

где $E_{\text{ЖД}}$, $E_{\text{ОЗд}}$, $E_{\text{ПрЗд}}$, $E_{\text{ОМ}}$, $E_{\text{ПП}}$, $E_{\text{ПВ}}$ и $E_{\text{НР}}$ – вклад в суммарную дозу облучения за счет пребывания в жилых домах, общественных зданиях, в производственных условиях и на открытой местности на территории населенного пункта, содержания природных радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде, а также нерегулируемых природных источников соответственно, мЗв/год.

Значение средней индивидуальной годовой эффективной дозы внешнего облучения взрослых жителей НП определяется по результатам измерений мощности дозы гамма-излучения в жилых домах, общественных зданиях и на открытой местности на территории населенного пункта, а также в производственных зданиях.

Эффективная доза внешнего облучения рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{внеш}} = d \cdot \sum_i 10^{-3} \cdot T_i \cdot \bar{P}_i, \text{ мЗв/год}, (12)$$

где 10^{-3} – коэффициент перехода от мкЗв к мЗв;

T_i – время облучения в течение года за счет пребывания в i -й локации НП (жилые, общественные, производственные здания, открытая местность), ч;

$\bar{P}_i$ – среднее значение мощности дозы гамма-излучения в i -й локации НП;

d – дозовый коэффициент, численное значение которого принимается равным:

– 0,7 мкЗв/мкЗв, если в качестве $\bar{P}_i$ используется $\bar{H}_i$ – средняя в i -й локации НП мощность эквивалентной (амбиентной) дозы гамма-излучения, выраженная в мкЗв/ч;

– 0,7 мкЗв/мкГр, если в качестве $\bar{P}_i$ используется $\bar{D}_i$ – средняя в i -й локации НП мощность поглощенной дозы гамма-излучения, выраженная в мкГр/ч;

– 0,0061 мкЗв/мкР, если в качестве $\bar{P}_i$ используется $\bar{X}_i$ – средняя в i -й локации НП мощность экспозиционной дозы гамма-излучения, выраженная в мкР/ч.

Оценка индивидуальных годовых эффективных доз внутреннего облучения населения за счет изотопов радона и их короткоживущих дочерних продуктов в воздухе производится на основании данных измерений средних годовых значений ЭРОА дочерних продуктов изотопов радона в воздухе по формуле:

$$E_{\text{Rn}}^{\text{вн}} = 9,45 \cdot 10^{-6} \sum T_i \cdot \bar{A}_i^{\text{ЭКВ}}, \text{ мЗв/год} (13)$$

где $9,45 \cdot 10^{-6}$ – дозовый коэффициент [в единицах мЗв/(ч·Бк/м³)], принимаемый в соответствии с докладом НК ДАР ООН за 2000 г. [17], с учетом вклада материнских радионуклидов ^{220}Rn и ^{222}Rn , составляющего примерно 5% от дозы облучения за счет их короткоживущих дочерних продуктов распада;

$\bar{A}_i^{\text{ЭКВ}}$ – среднегодовое значение ЭРОА дочерних продуктов изотопов радона в воздухе в i -й локации НП (жилые, общественные, производственные здания, открытая местность), Бк/м³;

T_i – время облучения в течение года за счет пребывания в i -й локации НП, ч.

Если для атмосферного воздуха на территории данного населенного пункта (района и т.п.) данные о значениях $\bar{A}_i^{\text{ЭКВ}}$ отсутствуют, то для расчетов доз облучения населения за счет этого фактора следует принимать $\bar{A}_i^{\text{ЭКВ}} = 6,5 \text{ Бк/м}^3$ в соответствии с данными НК ДАР ООН [17] о средних мировых значениях ЭРОА дочерних продуктов изотопов радона в приземном слое атмосферного воздуха.

Среднегодовое значение ЭРОА дочерних продуктов изотопов радона в воздухе в i -й локации НП рассчитывается по формуле:

$$\bar{A}_i^{\text{ЭКВ}} = \bar{A}_i^{\text{ЭКВ}, \text{Rn}} + 4,64 \cdot \bar{A}_i^{\text{ЭКВ}, \text{Tn}} (14)$$

где $\bar{A}_i^{\text{ЭКВ}}$ и $\bar{A}_i^{\text{ЭКВ}, \text{Rn}}$ – среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона соответственно в воздухе в i -ой локации НП.

Методология оценки дозы внутреннего облучения за счет перорального поступления долгоживущих природных радионуклидов, содержащихся в воде источников питьевого водоснабжения и пищевых продуктах, использованная в МУ 2.6.1.2397-08, аналогична методологии и моделям, содержащимся в МР 2.6.1.0063-12.

В дополнение к вышеперечисленным методическим указаниям нами проанализированы научные публикации по организации и методикам оценки доз и уровням облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов с повышенным содержанием природных радионуклидов [18–21].

Общий вывод состоит в том, что при подготовке методического документа по проведению оценки доз облучения населения за счет проживания вблизи объектов ядерного и радиационного наследия необходимо максимально использовать наработанные методические материалы по проведению подобных оценок в иных ситуациях. Но при этом необходимо учитывать специфику данной задачи по конфигурации возможного радиоактивного загрязнения, по его радионуклидному составу, а также по технологиям, используемым для проведения реабилитационных мероприятий.

Требования к исходным данным для расчета доз облучения

В результате анализа нормативно-методических документов и научных публикаций по радиационному обследованию участков территории, подвергшихся радиоактивному загрязнению, и оценке доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационных объектов, на радиоактивно загрязненных территориях и облучающихся в повышенных дозах природными радионуклидами установлено, что применяемые в этих методических указаниях подходы, модели и формулы расчета доз облучения от техногенных и природных радионуклидов могут быть применимы для населения, проживающего в зоне влияния объекта ядерного наследия.

Однако точность и достоверность оценки доз облучения населения напрямую зависит от исходных данных, которые используются в моделях и расчетных формулах.

Действующие методические указания (2.6.1.0063-12, МУ 2.6.1.2003-05) предназначены для оценки доз населения, проживающего на значительных по размеру терри-

ториях с десятками, сотнями и тысячами населенных пунктов, в которых проживают тысячи, десятки и сотни тысяч человек. И в этой связи при радиационном обследовании указанных территорий (получении исходных данных) для оценки доз облучения в каждом отдельном населенном пункте проводится ограниченное количество измерений и проводится ограниченный отбор проб (единицы). При обследовании территорий, загрязненных в результате аварий на ПО «Маяк» и Чернобыльской АЭС, исследования и отбор проб проводятся не во всех населенных пунктах, а только выборочно, в так называемых реперных (типичных) НП. В случае с обследованием ограниченного по масштабам участка территории количество точек измерения и отбираемых проб должно быть достаточным для достоверной оценки доз облучения населения, проживающего на этой территории.

Для получения достоверных исходных данных для расчета доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объекта ядерного наследия, представляется наиболее адекватным использование организации и схемы радиационного обследования, изложенных в следующих методических документах:

1. Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при проведении дезактивационных работ по ликвидации локального радиоактивного загрязнения (территорий, жилых, общественных и производственных объектов)». Утверждены 27.05.2005 г. заместителем руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

2. МУ 2.6.1.2398-08 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий, сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности».

3. МУ 2.6.1.2838-11 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности».

Так, измерения мощности дозы гамма-излучения должны проводиться в контрольных точках, равномерно расположенных по территории участка в узлах сетки с шагом 10×10 м. В тех же контрольных точках, где производилось измерение мощности дозы гамма-излучения, проводится контроль глубинного распределения активности в грунте методом бурения скважин и отбор проб грунта на определение удельной активности содержащихся в нем радионуклидов.

Отбор проб воды должен производиться из всех водоемов и ручьев, обнаруженных на обследуемом участке, а также из наблюдательных скважин.

Более подробно требования по радиационному обследованию участков территории, загрязненных техногенными и природными радионуклидами на объектах ядерного наследия, нами изложены в проектах методических указаний «Организация и проведение радиационного обследования объектов и территорий, загрязненных техногенными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий ядерной отрасли, после окончания мероприятий по их реабилитации» и «Организация и проведение радиационного обследования объектов и

территорий, загрязненных природными радионуклидами в результате прошлой деятельности предприятий неядерных отраслей промышленности», проходящих в настоящее время рецензирование.

Заключение

Одним из важных направлений деятельности Госкорпорации «Росатом» является ликвидация ядерного и радиационного наследия, на что направлена Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» (ФЦП ЯРБ-2), которой предусмотрена и разработка нормативно-методических документов по обеспечению радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды.

Для принятия решения о необходимости проведения реабилитационных мероприятий или применения мер защиты населения требуется достоверная оценка доз облучения населения за счет проживания в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия. Подходы, модели и формулы расчета доз облучения от техногенных и природных радионуклидов изложены в десятке действующих методических указаний и рекомендаций. Они могут быть использованы и для оценки доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного или радиационного наследия. Адаптированные модели и формулы для расчета доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия, целесообразно изложить в целевом методическом документе, с учетом имеющихся особенностей. Кроме того, требуется проработка вопросов получения достоверных исходных данных.

Литература

1. Шандала, Н.К. Радиационно-гигиенический мониторинг в районе размещения пункта временного хранения отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов в губе Андреева / Н.К. Шандала, А.А. Филимонова, Е.С. Щелканова, М.К. Снег с соавт. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2014. – Т.59, № 2. – С. 5-11.
2. Романович, И.К. Научное обоснование подходов к организации и проведению радиационного обследования реабилитированных радиационных объектов / И.К. Романович // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10, № 3. – С. 90-102. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-90-102.
3. Лунёва, К.В. Современные дозовые нагрузки на население и речную биоту в районе расположения Сибирского химического комбината (2000-2010 гг.) / К.В. Лунёва, А.И. Крышев, А.Ю. Пахомов, И.А. Пахомова // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2012. – Т. 21, № 4. – С. 24-30.
4. Романович, И.К. Научное обоснование методических подходов к организации и проведению заключительного радиационного обследования участков территории, реабилитированных после загрязнения природными радионуклидами / И.К. Романович, Т.А. Кормановская, Н.А. Королева, Э.П. Лисаченко, К.А. Сапрыкин // Радиационная гигиена. – 2018. – Т.11, № 3. – С. 7-21.
5. Карпенко, Е.И. Оценка доз облучения населения и природных объектов на территории, прилегающей к предприятию по добыче и переработке урановых руд / Е.И. Карпенко, С.И. Спиридонов, Н.И. Санжарова // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2012. – Т. 21, № 2. – С. 46-53.

6. Серия Норм МАГАТЭ по безопасности «Освобождение площадок от регулирующего контроля после завершения практической деятельности». Руководство № WS-G-5.1. – Вена, 2008. – 42 с.
7. Голиков, В.Ю. Обоснование радиологических критериев использования территорий с остаточным радиоактивным загрязнением на основе дозового подхода / В.Ю. Голиков, И.К. Романович // Радиационная гигиена. – 2017. – Т.10, № 4. – С. 6-22. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-6-22.
8. Романович, И.К. Критерии реабилитации объектов и территорий, загрязненных радионуклидами в результате прошлой деятельности: Часть 1. Выбор показателей для обоснования критериев реабилитации / И.К. Романович, И.П. Стамат, Н.И. Санжарова, А.В. Панов // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 4. – С. 6-15.
9. Романович, И.К. Ликвидация ядерного наследия: радиационно-гигиенические критерии безопасности дезактивированных участков территории, зданий и сооружений / И.К. Романович // Здоровье населения и среда обитания. – 2018. – № 4 (301). – С. 21-26.
10. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna, 2014, 436 p.
11. Романович, И.К. Обоснование концепции перехода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения / И.К. Романович, Г.Я. Брук, А.Н. Барковский, А.А. Братилова, А.В. Громов, М.В. Кадука // Радиационная гигиена. – 2016. – Т. 9, № 1. – С. 6-18.
12. Брук, Г.Я. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2017 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) / Г.Я. Брук, И.К. Романович, А.Б. Базюкин, А.А. Братилова, А.Ю. Власов, А.В. Громов, Т.В. Жеско, М.В. Кадука, О.С. Кравцова, К.А. Сапрыкин, В.С. Степанов, Н.В. Титов, В.А. Яковлев // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 73-78.
13. Брук, Г.Я. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и Основные направления дальнейшей работы на предстоящий период / Г.Я. Брук, А.Б. Базюкин, А.Н. Барковский, А.А. Братилова, А.Ю. Власов, Ю.Н. Гончарова, А.В. Громов, Т.В. Жеско, С.А. Иванов, М.В. Кадука, О.С. Кравцова, В.В. Кучумов, И.К. Романович, К.А. Сапрыкин, Н.В. Титов, И.Г. Травникова, В.А. Яковлев // Радиационная гигиена. – 2014. – Т. 7, № 4. – С. 72-77.
14. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. – СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2016. – Т. 1. – 448 с.
15. Романович, И.К. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / И.К. Романович [и др.]; под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко. – СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. – 336 с.
16. Санжарова, Н.И. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности / Н.И. Санжарова, С.В. Фесенко, И.К. Романович, Т.А. Марченко, А.Н. Раздайковин, А.В. Панов, О.А. Шубина, П.В. Прудников, Н.Н. Исамов, А.И. Радин, Г.Я. Брук // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2016. – Т. 56, № 3. – С. 322-335.
17. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, VI: Sources. UN, NY, 2000, 654 p.
18. Андреев, А.И. Оценка эффективных доз внутреннего облучения населения за счёт изотопов радона на территориях с различной степенью радоноопасности / А.И. Андреев, К.В. Пупатенко, И.М. Тесленко // В книге: Современные проблемы регионального развития Тезисы VI Международной научной конференции. Под редакцией Е.Я. Фрисмана. – 2016. – С. 69-72.
19. Пивоварова, Е.А. Оценка доз внутреннего облучения населения республики Хакасия при потреблении питьевой воды, не соответствующей нормам радиационной безопасности. Расчет рисков возникновения стохастических эффектов / Е.А. Пивоварова, А.А. Пивоваров // Здоровье населения и среда обитания. – 2016. – № 6 (279). – С. 33-35.
20. Романович, И.К. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / И.К. Романович, И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко [и др.]; Под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. – Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. – 432 с.
21. Назаров, Х.М. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан / Х.М. Назаров, К.А. Эрматов, Дж.А. Саломов, С.М. Бахронов, У.М. Мирсаидов // Радиационная гигиена. – 2018. – Т. 11, № 2. – С. 83-90.

Поступила: 01.04.2019 г.

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

Кормановская Татьяна Анатольевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Королева Надежда Андреевна – старший научный сотрудник лаборатории дозиметрии природных источников Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Сапрыкин Кирилл Александрович – заведующий лабораторией дозиметрии природных источников, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Романович И.К., Кормановская Т.А., Королева Н.А., Сапрыкин К.А. Обоснование методологических и методических подходов к оценке доз облучения населения, проживающего в зоне влияния объектов ядерного и радиационного наследия // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 2. – С. 34-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-34-43

Justification of the methodical approaches to the assessment of the doses of the public residing in the zone of influence of the facilities of the nuclear and radiation legacy

Ivan K. Romanovich, Tatyana A. Kormanovskaya, Nadezhda A. Koroleva, Kirill A. Saprykin

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

To justify the decision on the necessity of the execution of the remediation actions or public safety measures as well as the correspondence of the remediated territories to the established criteria or reference levels it is necessary to correctly perform the assessment of the doses of the public residing in the zone of influence of the facilities of the nuclear and radiation legacy. Currently, there is no legislative document, regulating the doses of that category of the public. Based on the result of the regulatory documents and scientific publications on the radiation surveys of the contaminated territories and assessment of the doses to the public residing in the surveillance zone of the radiation facilities, on the radioactively contaminated territories and exposed by natural radionuclides, it was estimated that approaches, models and equations for the estimation of the doses from man-made and natural radionuclides can be applied for the public residing in the zone of influence of the facilities of the nuclear and radiation legacy. The number of control measurement points and samples for the radiation survey of the territories of the limited scale should be sufficient for the representative assessment of the doses to the public.

Key words: nuclear legacy, radiation legacy, remediation, doses, man-made radionuclides, natural radionuclides.

References

1. Shandala N. K., Filimonova A.A., Shelkanova E.S., Sneve M.K. [et al.] Radiation-hygienic monitoring in the area of the location of the temporary storage point of the spent nuclear fuel and radioactive wastes in Andreeva guba. Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation protection, 2014, vol. 52, No 2, pp. 5-11. (In Russian)
2. Romanovich I.K. Scientific substantiation of approaches to organization and conducting radiation surveys at the rehabilitated radiation sites. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017;10(3):90-102. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-90-102>
3. Luneva K.V., Kryshev A.I., Pakhomov A.U., Pakhomova I.A. Present-day radiation doses on population and river biota near Siberian Chemical Combine (2000-2010). Radiatsiya i risk = Radiation and risk (Bulletin of the National radiation-epidemiological register), 2012, vol. 21 No 4, pp. 24-30. (In Russian)
4. Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Koroleva N.A., Lisachenko E.P., Saprykin K.A. Scientific justification of the methodical approaches to the establishment and conduction of the conclusive radiation survey of the areas remediated after contamination with natural radionuclides. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(3):7-21. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-7-21>
5. Karpenko E.I., Spiridonov S.I., Sanzharova N.I. Assessment of radiation doses to the population and natural objects on the territory adjacent to facility for mining and processing of uranium ores. Radiatsiya i risk = Radiation and risk (Bulletin of the National radiation-epidemiological register), 2012, vol. 21 No 2, pp. 46-53 (In Russian)
6. IAEA Safety Standard Series WS-G-5.1. "Release of sites from regulatory control on termination of practices". Vienna, 2008, 42 p. (In Russian)
7. Golikov V.Y., Romanovich I.K. Justification for the radiological criteria for the use of areas with residual radioactive contamination based on the dose approach. Radiatsionnaya Gygiena

Ivan K. Romanovich

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

- = Radiation Hygiene. 2017;10(4):6-22. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-6-22>
8. Romanovich I.K., Stamat I.P., Sanzharova N.I., Panov A.V. 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. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2016;9(4):6-15. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-4-6-15>
 9. Romanovich I.K. Liquidation of the nuclear legacy: radiation-hygienic safety criteria for the decontaminated sites of territories, buildings and constructions. I.K. Zdorovye naseleniya i sreda obitaniya = Health of the public and the environment, 2018, No4 (301), pp. 21-26 (In Russian)
 10. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna, 2014, 436 p.
 11. Romanovich I.K., Bruk G.Ya., Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Gromov A.V., Kaduka M.V. Substantiation of the concept of transfer to conditions of normal population activity of the settlements considered to be zones of radioactive contamination after the Chernobyl NPP accident. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2016;9(1):6-18. (In Russian)
 12. Bruk G.Ya., Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Vlasov A.Yu., Gromov A.V., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S., Saprykin K.A., Stepanov V.S., Titov N.V., Yakovlev V.A. The average annual effective doses for the population of the settlements of the Russian Federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for the zonation purposes), 2017. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017;10(4):73-78. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-4-73-78>
 13. Bruk G.Ya., Bazyukin A.B., Barkovsky A.N., Bratilova A.A., Vlasov A.Y., Goncharova Y.N., Gromov A.V., Jesko T.V., Ivanov S.A., Kaduka M.V., Kravtsova O.S., Kuchumov V.V., Romanovich I.K., Saprykin K.A., Titov N.V., Travnikova I.G., Yakovlev V.A. The exposure for populations of the Russian Federation due to the Chernobyl accident and main directions of further work in the coming period. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2014;7(4):72-83. (In Russian)
 14. Radiation-hygienic aspects of the negotiation of the Chernobyl NPP consequences. Ed. By academic of RAS G.G. Onischenko and prof A.Yu. Popova. Saint-Petersburg, NIIRG after P.V. Ramzaev, 2016, vol. 1, 448 p. (In Russian)
 15. Romanovich I.K. [et al.] NPP "Fukushima-1" accident: management of the prophylactic actions aimed at the preservation of health of the public of the Russian Federation. Ed. by academic of RAS G.G. Onischenko. Saint-Petersburg, NIIRG after P.V. Ramzaev, 2012, 336 p. (In Russian)
 16. Sanzharova N.I., Fesenko S.V., Romanovich I.K., Marchenko T.A., Razdaivodin A.N., Panov A.V., Shubina O.A., Prudnikov P.V., Isamov N.N., Radin A.I., Bruk G.Ya. Radiological Aspects of Transition of Russian Areas Affected by the Chernobyl Accident to Normal Activities. Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology, 2016, vol. 56, No 3, pp. 322-335. (In Russian)
 17. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR Report to the General Assembly, VI: Sources. UN, NY, 2000, 654 p.
 18. Andreev A.I., Pupatenko K.V., Teslenko I.M. Assessment of the effective doses from the internal exposure of the public from the radon daughters on the areas with different grade of radon hazard. Modern issues of the regional development. Proceedings of the VI International scientific conference. Ed. By E. Ya. Frisman, 2016, pp. 69-72 (In Russian)
 19. Pivovarova E.A., Pivovarov A.A. Assessment of the doses of internal exposure of the public in Hakasiya Republic from the drinking water not compliant to the norms of the radiation safety. Calculation of the risks of the stochastic effects. Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Health of the public and environment, 2016, No. 6 (279), pp. 33-35. (In Russian)
 20. Romanovich I.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V. [et al.] Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic actions. Ed. By academic of RAS G.G. Onischenko and prof A.Yu. Popova. Saint-Petersburg, NIIRG after P.V. Ramzaev, 2018, 432 p. (In Russian)
 21. Nazarov K.M., Ermatov K.A., Salomov D.A., Bahronov S.M., Mirsaidov U.M. Assessment of potential radiation hazard of the former uranium facilities for the population of the Istiklol city of the republic of Tadjikistan. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2018;11(2):83-90. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-83-90>

Received: April 01, 2019

For correspondence: Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Director of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru)

Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Nadezhda A. Koroleva – Senior Researcher, Natural Sources Dosimetry Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Kirill A. Saprykin – Acting head of the laboratory of the natural sources dosimetry Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Koroleva N.A., Saprykin K.A. Justification of the methodical approaches to the assessment of the doses of the public residing in the zone of influence of the facilities of the nuclear and radiation legacy. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No 2, pp.34-43 (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-34-43

Improved radiation risk models applied to different patient groups in Sweden

M. Andersson¹, K. Eckerman², D. Pawel³, A. Almén¹, S. Mattsson¹

¹ Medical Radiation Physics, Department of Translational Medicine, Malmö, Lund University, Sweden

² Center for Radiation Protection Knowledge, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA

³ U.S. Environmental Protection Agency, Washington, USA

In radiological diagnostics and therapy, it is important that practitioners, referrers, (i.e. radiologists, radiation oncologists and others in health-care) are aware of how much radiation a patient may receive from the various procedures used and associated health risk. The profession has a duty to inform patients or their representatives of the advantages and disadvantages of specific investigations or treatment plans. The need to estimate and communicate risks in connection with medical use of ionizing radiation is highlighted e.g. in the Russian Federation State Law No 3, §17.2, 1996 and in the EU directive (2013/59/EURATOM 2014). The most commonly used way to express harm in relation to low doses of ionizing radiation is use of the quantity effective dose (E). Effective dose, a radiation protection quantity, however is not intended to provide risk estimates for medical exposures. Its purpose is to optimize conditions for radiation workers (18-65 years) or the general public; all groups with age distributions that differ from patients. In this paper the lifetime attributable risk was used to estimate the excess risk of receiving and dying of radiogenic cancer. The lifetime attributable risk estimations are generated from three different variables, gender, attained age and age at exposure giving the possibility to create age and gender specific cancer risk estimations. Initially, the US Environmental Protection Agency lifetime attributable risk coefficients which are intended to predict the cancer risk from ionizing radiation to a normal US population were applied. In this work, the lifetime attributable risk predictions were modified to the normal Swedish population and to cohorts of Swedish patients undergoing radiological and nuclear medicine examinations or treatments with survival times that differ from the normal population. For Swedish males, all organs were given the same absorbed dose, exposed at 20, 40 and 70 years, the lifetime attributable risk coefficients (Gy^{-1}) were 0.11, 0.068, and 0.038, respectively, which is lower than the corresponding figures for US males, 0.13, 0.077, and 0.040. For Swedish females, all organs were given the same absorbed dose, exposed at 40 years of age with a diagnosis of breast, colon or liver cancer, the lifetime attributable risk coefficients are 0.064, 0.034, and 0.0038, respectively, which is much lower than if a 40 years female without known cancer is exposed, 0.073.

Key words: effective dose, life time attributable risk, radiation risk predictions.

Улучшенные модели оценки радиационного риска для отдельных когорт пациентов в Швеции

М. Андерссон¹, К. Эккерман², Д. Павел³, А. Олмен¹, С. Маттссон¹

¹ Группа медицинской физики отдела трансляционной медицины Лундского университета, г. Мальмё, Университетский госпиталь округа Скона, Швеция

² Центр данных по радиационной защите, Национальная лаборатория Ок-Ридж, Ок-Ридж, Теннесси, США

³ Агентство по защите окружающей среды США, Вашингтон, округ Колумбия, США

В лучевой диагностике и терапии крайне важно, чтобы медицинский персонал (врачи-рентгенологи, лечащие врачи, радиационные онкологи и пр.) имели представление о том, какую дозу облучения получил пациент от различных рентгенорадиологических исследований и с каким риском для здоровья эта доза связана. Медицинский персонал несет ответственность за информирование пациентов и их законных представителей о достоинствах и недостатках выбранных исследований или планов лечения. Так, например, необходимость оценки и коммуникации рисков в контексте использования ионизирующего излучения в медицине особо отмечена в Федеральном законе Ф3-3 «О радиационной безопасности населения» в Российской Федерации и в директиве Евросоюза 2013/59/EURATOM 2014. Наиболее распространенным способом выражения вреда от низких доз ионизирующего излучения является использование эффективной дозы, которая, хотя и является основной величиной в радиационной защите, не предназначена для оценки рисков от медицинского

Mattsson Sören

Medical Radiation Physics Malmö

Address for correspondence: ITM, Lund University, Skåne University Hospital Malmö, SE-205 02 Malmö, Sweden;

E-mail: soren.mattsson@med.lu.se

облучения. Ее задачей является обеспечение оптимизации радиационной защиты персонала (людей в возрасте 18–65 лет) и населения — групп с возрастным распределением, резко отличающимся от возрастных распределений пациентов. В данном исследовании величина пожизненного атрибутивного риска была использована для оценки избыточного риска получить и умереть от радиогенного рака различной нозологии. Оценки значений пожизненного атрибутивного риска основывались на трех переменных: пол, возраст дожития и возраст при облучении, что позволило определить риски развития радиогенного рака с учетом пола и возраста пациентов. Изначально были использованы коэффициенты пожизненного атрибутивного риска, разработанные Агентством по защите окружающей среды США, которые позволяют оценить избыточные радиогенные раки для нормальной популяции США. В данной работе значения коэффициентов пожизненного атрибутивного риска были изменены с учетом специфики здорового шведского населения, а также когорт шведских пациентов, проходящих различные рентгенорадиологические исследования и курсы лучевой терапии, время дожития которых существенно отличалось от такового для обычного населения. Для шведских мужчин, при условии, что все органы организма получили одну и ту же поглощенную дозу и облучение произошло в возрасте 20, 40 и 70 лет, соответствующие коэффициенты пожизненного атрибутивного риска (Gr^{-1}) составили 0,11, 0,068, и 0,038 соответственно, что ниже по сравнению с аналогичными данными для американских мужчин — 0,13, 0,077, и 0,040 соответственно. Для шведских женщин, при условии, что все органы организма получили одну поглощенную дозу и облучение произошло в возрасте 40 лет с диагнозом рака груди, прямой кишки или печени, коэффициенты пожизненного атрибутивного риска (Gr^{-1}) составили 0,064, 0,034, и 0,0038 соответственно, что существенно ниже значения 0,073 в случае облучения 40-летних женщин, у которых диагноз рака установлен не был.

Ключевые слова: эффективная доза, пожизненный атрибутивный риск, оценка радиационного риска.

1. Introduction

In radiological diagnostics and therapy, it is important that practitioners, referrers, radiologists, radiation oncologists and others in health-care understand how much radiation a patient may receive from the various procedures used and the associated risk. National and international directives state e.g. that "... based on the citizens' or patients' request they shall receive full information on expected or received dose and possible consequences due to the x-ray examination ..." (Russian Federation State Law No 3, § 17.2 "On the radiation safety of the public, 1996") [1] and the need to "... ensure wherever practicable and prior to the exposure taking place adequate information relating to the benefits and risks associated with the radiation dose from the medical exposure" (EU directive 2013/59/EURATOM 2014) [2].

The most commonly used way to express harm in relation to low doses of ionizing radiation is to use the quantity effective dose (E) defined by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) [3]. However, effective dose was not intended to provide risk estimates for medical exposures. Its purpose is to optimize conditions for radiation workers (18-65 years) or the general public – groups with different age distributions than patients. In spite of that, effective dose is also frequently used for risk estimates for patients undergoing medical exposures and even for individual patients. The effective dose is a weighted sum of tissue specific doses. ICRP [3] determined tissue weights by first calculating tissue-specific "nominal risks adjusted for lethality and quality of life" which are the tissue-specific cancer (and hereditary) risk estimates multiplied by a "lethality fractions", and "relative cancer free life lost". The tissue weights were then subjectively rounded and normalized to sum to 1, resulting in values of 0.01, 0.04, 0.08, or 0.12. Based on estimates of detriment for lifetime exposure to uniform whole-body radiation, ICRP established risk coefficients of 5.5% per Sv for a population of all ages and 4.1% per Sv for radiation workers. The effective dose is a robust unit for many populations exposed to environmental and occupational sources of radiation, but it does not

Введение

В лучевой диагностике и терапии крайне важно, чтобы медицинский персонал (врачи-рентгенологи, лечащие врачи, радиационные онкологи и пр.) имел представление о том, какую дозу облучения получил пациент от различных рентгенорадиологических исследований и с каким радиационным риском для здоровья эта доза связана. Это условие является обязательным в соответствии с различными национальными и международными законодательными актами. Так, в российском Федеральном законе № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» прописано, что «По требованию гражданина (пациента) ему предоставляется полная информация об ожидаемой или о получаемой им дозе облучения и о возможных последствиях при проведении медицинских рентгенорадиологических процедур». Директива Евросоюза 2013/59/EURATOM 2014 предусматривает необходимость предоставления адекватной информации о пользе и рисках от доз медицинского облучения перед проведением исследования.

Наиболее распространенной мерой вреда от низких доз ионизирующего излучения является эффективная доза (ЭД), определенная Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ). Однако эффективная доза не была предназначена для оценки риска от медицинского облучения. ЭД использовалась для оптимизации условий работы персонала (в возрасте 18–65 лет) или населения – групп с иными возрастными распределениями по сравнению с пациентами. Несмотря на данные ограничения, ЭД часто используется для оценки риска у пациентов при медицинском облучении, в том числе и для индивидуальных пациентов. Эффективная доза является взвешенной суммой тканеспецифичных доз. МКРЗ определило взвешивающие коэффициенты путем расчета тканеспецифичных «номинальных рисков с поправкой на смертность и качество жизни», которые представляют собой тканеспецифичные оценки риска рака (и наследственных эффектов), умноженные на «доли летальности» и «относительную потерю лет жизни без рака». Данные

take age and sex into account (e.g., for specific individuals undergoing medical procedures). The reason for this, stated by the ICRP, is that the system of protection should be sufficiently simple and robust [3, 4].

A step forward, as it relates to specific patients, could be to define an "index of harm" as the effective dose (keeping the tissue weighting factors) multiplied by a relative risk factor which is age dependent. Almén and Mattsson [5] used a risk factor between 2 and 3 for children and adolescents and Wall et al., [6], Balonov and Shrimpton [7] and Balonov et al. [8] a relative risk factor of 2 for children and adolescents < 18 y, 1 for adults < 65 y and 0.1 for seniors 65+ years. Simple adjustments of ICRP's nominal risk coefficient to account for age differences have in this way made effective dose a useful tool for the description of the radiation detriment.

An alternative approach to effective dose is to base risk assessments directly on calculations of lifetime attributable risk (LAR). There are different organizations performing risk models for assessing LAR [9, 10]. For these calculations, we adopted the approach used by the United States' Environmental Protection Agency (EPA) [9]. For most cancer sites, the EPA risk models and other underlying assumptions are identical to those recommended in the United States' National Research Council BEIR VII report [11]. For example, the models for most cancers were derived from incidence data from the Lifespan Study of the Japanese atomic bomb survivors and a dose and dose rate effectiveness factor of 1.5 assumed for cancers other than leukemia, bone, and skin. Extensions and modifications to the BEIR VII approach include risk estimates for alpha particles and a more extensive analysis of uncertainties associated with the radiogenic risk estimates. These risk models are used to assess both excess risk of cancer incidence and premature cancer death. For most cancer sites, the EPA assumed both relative and absolute excess risk to be proportional to the absorbed dose with a slope that depends on the tissue, age at exposure, attained age and sex. An important exception is leukemia, for which risk depends also on time since exposure.

In a previous analysis [12] we used EPA LAR coefficients – as an alternative to effective dose – to quantify sex and age specific cancer risks for patients undergoing x-ray examinations, nuclear medicine examinations and treatments. The study also assessed differences in outcome between effective dose and LAR risk estimation, as illustrated in Fig. 1. The effective dose-based risk for adults (4.1% per Sv) and the LAR risk are presented for a ^{99m}Tc bone scintigraphy, for ages at exposure between 0 and 110 years. We also showed that if the difference in cancer risk for different ages at exposure and sex is known, it is possible to perform bone scintigraphy procedures with the same risk for stochastic effects by varying the activity administered for patients of different age and sex. However, for that study, the LAR coefficients that were applied had been developed for a standard (healthy) US population. The aim of the current project was to explore the need to modify the approach by applying LAR coefficients that are appropriate for a standard Swedish population and also for specific cohorts of Swedish patients.

2. Materials and Methods

2.1. Investigated cohorts of patients in medicine

The cohorts of patients range from diagnostic radiology/subject – especially those examined using computed tomography (CT) – to cohorts of patients undergoing nuclear medicine

взвешивающие коэффициенты были затем округлены и нормализованы к сумме в 1, что позволило получить значения 0,01, 0,04, 0,08, или 0,12. На основе оценки вреда от равномерного облучения всего тела в течение всей жизни МКРЗ установило коэффициенты риска в размере 5,5% на 1 Зв для населения всех возрастных групп и 4,1% на 1 Зв для персонала. Эффективная доза является надежной величиной для различных популяций, которые подвергаются природному и профессиональному облучению, но она не учитывает пол и возраст (например, для отдельных индивидуумов при медицинском облучении). Это объясняется тем, что, согласно МКРЗ, система радиационной защиты должна быть простой и надежной.

Развитием данной системы, применительно к отдельным категориям пациентов, является определение «индекса вреда», путем умножения эффективной дозы (с сохранением текущих взвешивающих коэффициентов) на возраст-зависимый относительный коэффициент риска. В работах Almén и Mattsson [5] были использованы коэффициенты риска в диапазоне 2–3 для детей и подростков; Wall и др., [6], Balonov и Shrimpton [7] и Balonov и др. [8] использовали коэффициенты риска равные 2 для детей и подростков (до 18 лет), 1 для взрослых (18–65 лет) и 0,1 для лиц старше 65 лет. Простые коррекции номинального коэффициента риска МКРЗ с учетом различий в возрасте превращают эффективную дозу в полезный инструмент для описания радиационного вреда (риска).

Альтернативой эффективной дозе является использование показателей риска – например, пожизненного атрибутивного риска (LAR). Разработкой моделей для расчета LAR занимается целый ряд организаций. Для задач данной работы был использован подход Агентства по защите окружающей среды США (EPA). Для большинства локализаций рака, модели риска EPA и базовые предположения являются идентичными представленным в отчете Национального научного совета США BEIR VII. Для примера, модели для большинства раков были разработаны на базе данных по заболеваемости из пожизненных исследований на японской когорте выживших после атомных бомбардировок (так называемой LSS-когорте); для всех раков, кроме лейкоз, раков кожи и костей, были приняты коэффициенты эффективности дозы и мощности дозы, равные 1,5. Дополнения и модификации к отчету BEIR VII включают оценку риска для альфа-частиц и более детальный анализ неопределенностей, ассоциированных с оценкой радиационного риска. Данные модели риска используются как для оценки избыточного риска заболеваемости раком, так и для преждевременной смерти от рака. Для большинства локализаций рака EPA предположила, что как относительный, так и абсолютный избыточный риск пропорциональны поглощенной дозе с наклоном, который определяется тканью, возрастом на момент облучения, возрастом дожития и полом. Исключением является лейкоз, для которой риск зависит также от времени, прошедшего с момента облучения.

В предыдущих анализах мы использовали значения пожизненного атрибутивного риска по модели EPA – в качестве альтернативы эффективной дозы – для количественной оценки специфичных по полу и возрасту рисков радиогенного рака для пациентов при проведении лучевой диагностики и терапии, процедур ядерной медицины. Также было показано различия между расчетами на ос-

and external beam radiation therapies. To properly assess the risk associated with medical procedures, one must consider the range of circumstances under which the radiation exposures occurred. CT examinations are administered to many patients for a wide range of medical indications. The purpose of the exposures is to provide information on the disease, (e.g., to exclude or stage disease) as part of treatment planning or as an aid in executing the treatment. Other exposures are performed to verify treatment results in connection with the treatment but also used to follow-up disease – sometimes up to several years after the actual treatment ends. Thus, medical exposures involve healthy (normal), diseased, and potentially cured persons (which are assumed to re-enter the cohort of healthy individuals), and for these three types of patient groups there are different sets of survival rates. Exposure levels can vary greatly, depending both on the type of examination and the hospital where the examination is performed.

For radiation treatments (e.g., therapy with radiopharmaceuticals and external beam radiation therapy) concern about acute radiation effects takes precedence and less interest is devoted to the mitigation of radiation induced cancer. Before an external beam radiation therapy treatment is performed the absorbed dose is planned, using a sophisticated dose planning calculation, and the dose distribution is optimized in the planning target volume, with attention to doses in tissues at risk for acute effects. Outside this volume, absorbed dose and radiation risk levels are to a less extent assessed and considered. However, larger volumes of healthy tissues are exposed to doses of varying magnitude in patients undergoing external beam radiation therapy [13]. Also, in nuclear medicine therapy, the absorbed dose distribution in the patient is not routinely assessed and the dose distribution for the individual patient is to a less extent optimized. Radiopharmaceuticals include both alpha and beta emitting radionuclides resulting in high doses to small volumes of tissues. However, organs outside targeted tissues can receive a high radiation absorbed dose resulting in acute radiation effects in some nuclear medicine procedures.

новой эффективной дозы и LAR (рис. 1). На рисунке представлены результаты оценки риска на основе эффективной дозы для взрослых (4,1% на Зв) и на основе LAR для сцинтиграфии костей с ^{99m}Tc для диапазона возрастов на момент облучения 0–110 лет. Также было показано, что при известных различиях в риске для различного возраста при облучении и поле возможно провести сцинтиграфию костей с одинаковым риском развития стохастических эффектов для пациентов различного пола и возраста за счет изменения вводимой активности. Однако использовались значения LAR для стандартного (здорового) населения США.

Цель исследования – анализ необходимости изменения подхода к оценке радиационных рисков путем применения значений LAR для стандартного шведского населения и для отдельных когорт шведских пациентов.

Материалы и методы

Исследованные когорты пациентов при медицинском облучении

В исследовании были использованы различные когорты пациентов: от проходящих стандартные рентгенографические исследования и особенно компьютерную томографию до проходящих исследования методами ядерной медицины и лучевую терапию. Для достоверной оценки риска, ассоциированного с медицинским облучением, необходимо учитывать обстоятельства, при которых данное облучение произошло. Например, КТ-исследования используются для различных пациентов для широкого диапазона клинических назначений. Целью исследования является предоставление информации о заболевании (исключить заболевание и правильно его стадировать) в качестве части планирования лечения или поддержки при проведении лечения. Другие исследования используются для подтверждения результатов лечения или для наблюдения за пациентами в стадии ремиссии – иногда вплоть до нескольких лет после окончания курса лечения. Таким образом, медицинское облучение включает в себя здо-

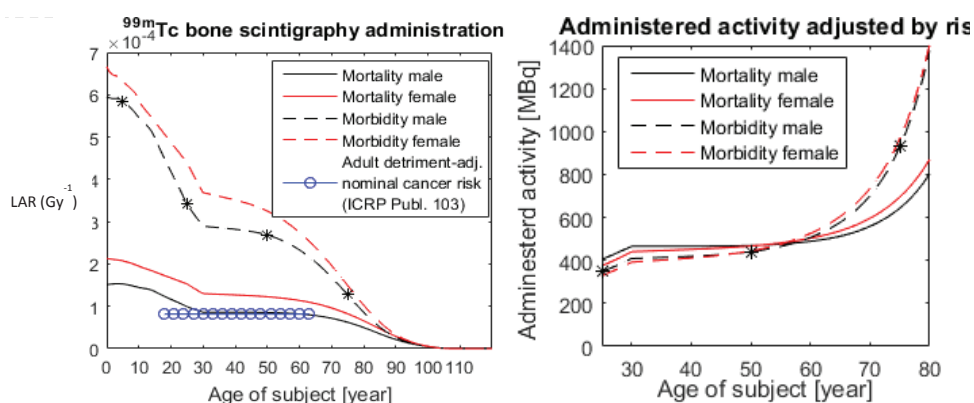


Fig. 1. Left: Age at exposure and sex dependent cancer morbidity and mortality risks from an intravenously administered ^{99m}Tc -phosphonates for bone scintigraphy using recommended age dependent administrations [12]. Right: Adjusted administered activity to get the same radiation risk independent of age and gender [12]

[Рис. 1. Слева: возраст при облучении и риски заболеваемости и смертности от рака с учетом пола пациента при внутривенном введении ^{99m}Tc -фосфоната для сцинтиграфии костей с использованием рекомендованных активностей для соответствующих возрастных категорий. Справа: скорректированные значения активности данного препарата для достижения одного и того же риска вне зависимости от пола и возраста]

2.2. Risk estimates using LAR

For cancer patients the lifetime attributable risk of a secondary primary cancer caused by radiation and the risk of dying of this cancer is estimated. The term “secondary primary cancer” describes, in this case, a new primary cancer that occurs in a person who has had cancer in the past. The second primary cancers may occur years after the original (primary) cancer was diagnosed and is independent of the first cancer. This is important as most radiation treatments for cancer involve many examinations. For non-cancer patients the LAR coefficients for estimating the morbidity and mortality risk for radiation induced primary cancer for 14 specific cancers: bone, breast, colon, kidney, leukaemia, liver, lung, ovary, prostate, skin, stomach, thyroid, urinary bladder, uterus; and the category ‘residual site’ cancers are available [9]. The residual site cancers include cancers for which there were insufficient data from the Life Span Study of Japanese Atomic Bomb Survivors or other epidemiological studies to reliably quantify radiogenic site-specific risks. The LAR cancer risk predictions for a specific cancer site are presented in Eq. 1, which basically can be described in three steps. The first step is to calculate, for each of the 15 different cancer types, age specific excess rate of cancer diagnosis, $M(D, b, a)$. The $M(D, b, a)$ is a function of three variables, the absorbed dose (D) of the specific organ, the age (e) at the exposure and the attained age (a) of cancer diagnosis. The next step is to multiply the excess cancer rates by the probability of being alive at age a , $S(a)$, each year after the exposure, normalized by the probability of being alive at exposure. Finally, the LAR is obtained by integrating these adjusted excess cancer rates though integration over attained age starting post a latent period of five years (two for leukemia) after the age of exposure. Thus,

$$LAR(D, e)_{Sex} = \int_{e+L}^{110} M(D, e, a) \cdot \frac{S(a)}{S(e+L)} da \quad (1)$$

where D is the absorbed dose, e is the age (year) at exposure, L is the latency period (year) after exposure for which stochastic effects occurs, a is the attained age (year), $S(a)$ and $S(e)$ is the survival rate at age a and e respectively.

2.3. Risk Modification of LAR

Our radiogenic cancer risk projections are combinations of projections based on excess absolute risk (EAR) and excess relative risk (ERR). A projection based solely on an EAR model assumes that radiation risks for the “target” population is the same as for the Life-Span Study, whereas, a projection based solely on the ERR assumes risks are proportional to baseline cancer risks. The BEIR VII Committee concluded that “mechanistic considerations” suggested that for most cancer sites more emphasis should be placed on an ERR model. It can be noted that ICRP used equal weights for ERR and EAR models. The EPA [9], following the advice of the BEIR VII Committee, assigned a weight of 0.7 to the ERR model for most cancers. e.g. the EPA predicted excess cancer rate for male stomach cancer is:

$$M(D, e, a)_{I, Male(St)} = 0.7 * (ERR(D, e, a)_{I, Male(St)} * \lambda(a)) + 0.3 * (EAR(D, e, a)_{I, Male(St)}) \quad (2)$$

where $M(D, e, a)_{I, Male(St)}$ is the excess incidence cancer risk, $\lambda(a)$ is the base line cancer risk at age a and the ERR

ровых (нормальных), заболевших и возможно вылеченных индивидуумов (предполагается что данная категория в дальнейшем войдет в состав когорты здоровых); для всех этих категорий индивидуумов коэффициенты выживаемости существенно отличаются. Также существенно будут отличаться уровни облучения пациентов, в зависимости от типа исследования и материально-технического оснащения медицинской организации.

Для лучевой терапии (как для радионуклидной, так и для дистанционной терапии) в первую очередь актуально исключение детерминированных эффектов; оценке развития радиогенных раков уделяется меньше внимания. До проведения дистанционной терапии производится оценка поглощенной дозы с использованием комплексных алгоритмов; проводится оптимизация распределений доз в планируемом объеме лечения с учетом поглощенных доз в тканях, близких к уровню развития детерминированных эффектов. За пределами данной области оценка и учет поглощенных доз и уровней риска проводятся крайне редко. Однако большие объемы здоровых тканей облучаются различными дозами при проведении дистанционной лучевой терапии. Также в радионуклидной терапии крайне редко проводится оценка распределений поглощенных доз у индивидуальных пациентов. Радиофармпрепараты для радионуклидной терапии содержат альфа- и бета-излучатели, что приводит к высоким дозам в небольших объемах ткани. Ткани за пределами органа-мишени могут получать высокие уровни поглощенной дозы, что будет приводить к развитию детерминированных эффектов.

Расчет пожизненного атрибутивного риска

Для онкологических пациентов оцениваются пожизненный атрибутивный риск развития «вторичного первичного рака» от облучения и риск смерти от данного рака. Термин «вторичный первичный рак» в данном случае относится к новому первичному раку, который возникает у индивидуума, у которого в прошлом уже был рак. Вторичный первичный рак может возникнуть спустя несколько лет после того, как исходный (первичный) рак был диагностирован; он развивается независимо от первого рака. Это является очень важным, так как большинство схем лучевой терапии рака предусматривают большое количество исследований с применением лучевой диагностики. Для нераковых пациентов доступны значения LAR для оценки заболеваемости и смертности от первичного радиогенного рака 14 локализаций: костная ткань, молочная железа, прямая кишка, лейкемия, печень, легкое, яичники, простата, кожа, желудок, щитовидная железа, мочевого пузыря, матка. Дополнительная категория «раки прочих локализаций» включает в себя раки, для которых было собрано недостаточно данных в пожизненных исследованиях на японской когорте выживших после атомных бомбардировок и прочих эпидемиологических исследованиях для достоверной количественной оценки радиационных рисков, специфичных для локализации. Расчет LAR для специфической локализации рака производится по формуле (1). Процедуру расчета LAR можно разбить на три этапа. Первый этап заключается в расчете возраст-специфичной избыточной частоты диагностики рака $M(D, e, a)$ для каждой из 15 локализаций. $M(D, e, a)$ является функцией трех переменных: поглощенной дозы в конкретном органе D , возраста на момент облучения (e) и

and EAR are the two different cancer risk estimates of male stomach cancer for an absorbed stomach dose, at an age of exposure e and an attained age of a .

To apply the excess cancer risk on populations other than the U.S., the baseline cancer statistics for the ERR predictions should be changed. The LAR predictions published by the EPA [9] were recalculated for a Swedish population, based on survival rates from the Swedish National Board of Health and Welfare [14] and cancer statistics from NORDCAN [15]. It should also be noted that cancer risk projections shown in Fig 2. for environmental exposures are based on survival functions for normal populations. For specific populations of patients, e.g., patients suspected to have a life-shortening illness, the survival fraction $S(a)$ in eq. 1 often needs to be modified. For example, in the data analyzed by Critz et al. [16], the 10, 15, 20, and 25-year disease-free survival for prostate cancer treated with brachytherapy and external beam radiotherapy is 75%, 73%, 73%, 73%, respectively. As the data indicates, no further recurrence was detected between 15 and 25 years, which indicates that no further follow up for this type of cancer is needed after 15 years to fully evaluate any prostate cancer treatment and that after 15 years patients can be treated as normal. These assumptions were used to estimate excess cancer risk for these patients, which will not follow the same survival rate as a normal population. The survival rates in the LAR equations has been modified with the longest time duration age and sex dependent cancer statistics data for the creation of population specific patient survival rates, as shown in Fig. 3. The EPA ERR and EAR models with Swedish survival rates in Fig. 3 were modified to account for the shorter expected survival for subpopulations of cancer patients as compared to survival rates for standard (relatively healthy) populations. This shows the effect modification of survival rates for different groups of cancer patients has on the predicted LAR. For calculating LAR, the EPA risk models were applied to survival rates and female incidence cancer data for three groups

достигнутого возраста на момент диагностирования рака (a). Следующим этапом является умножение избыточной частоты рака на вероятность дожития от рождения до возраста a , $S(a)$, нормализованную на вероятность быть в живых на момент облучения. И наконец, на третьем этапе пожизненный атрибутивный риск $LAR(D, e)_{Sex}$ определяется путем интегрирования скорректированных избыточных частот рака по достигнутому возрасту в пределах от возраста на момент облучения с учетом латентного периода в 5 лет (2 года для лейкемии) до 110 лет. Таким образом,

$$LAR(D, e)_{Sex} = \int_{e+L}^{110} M(D, e, a) \cdot \frac{S(a)}{S(e+L)} da \quad (1)$$

где D – поглощенная доза; e – возраст на момент облучения (лет); L – латентный период после облучения (лет), после которого начнут проявляться стохастические эффекты; a – достигнутый возраст (лет); $S(a)$ и $S(e)$ – вероятности дожития до возрастов a и e соответственно.

Модификация моделей для расчета пожизненного атрибутивного риска

Наши модели риска радиогенного рака являются комбинацией моделей, основанных на избыточном абсолютном риске (EAR) и избыточном относительном риске (ERR). Модель, основанная исключительно на EAR, подразумевает, что радиационный риск для выбранной группы населения идентичен таковому для LSS-когорты. В свою очередь, модель, основанная на ERR, предполагает, что радиационный риск пропорционален фоновому уровню риска рака данной локализации в популяции. Комитет BEIR VII заключил, что для большинства локализаций рака целесообразно использовать модель ERR. Следует отметить, что МКРЗ использовала модели ERR и EAR с одинаковыми взвешивающими коэффициентами. EPA, в соответствии с рекомендациями Комитета BEIR VII, присвоила взвешивающий коэффициент, равный 0,7 модели ERR для раков большинства локализаций. Например, предсказанная избыточная частота развития рака желудка для мужчин составит:

$$M(D, e, a)_{I, Male(St)} = 0.7 * (ERR(D, e, a)_{I, Male(St)} * \lambda(a)) + 0.3 * (EAR(D, e, a)_{I, Male(St)}) \quad (2)$$

где $M(D, e, a)_{I, Male(St)}$ – избыточная частота заболеваемости раком желудка среди мужчин; $\lambda(a)$ – фоновый уровень заболеваемости раком желудка в возрасте a ; ERR и EAR – два различных показателя избыточного риска развития рака желудка для мужчин при поглощенной дозе в желудке D в возрасте на момент облучения e , рассчитанные для достигнутого возраста a .

Для применения избыточного риска развития рака для других (не американских) популяций необходимо использовать другие уровни фоновой заболеваемости раком в модели избыточного относительного риска ERR. Результаты расчетов пожизненного атрибутивного риска, опубликованные EPA, были пересчитаны для шведского населения, основываясь на вероятностях дожития, публикуемых Шведским национальным советом по здоровью и благополучию, и онкологической статистике

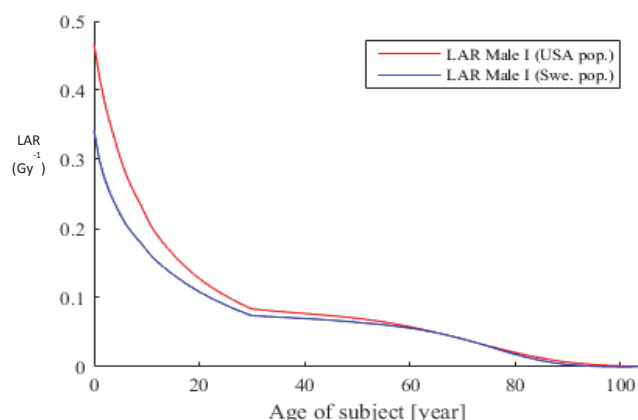


Fig. 2. LAR incidence as function of the age at exposure for a Swedish male population based on the last 30 years of Swedish cancer statistic [15] and a US male population both based on the risk prediction given by US EPA [9]. All organs are given the same absorbed dose.

[Рис. 2.] Зависимость пожизненного атрибутивного риска от возраста при облучении для шведских мужчин по данным шведской онкостатистики за последние 30 лет [15] и аналогичные данные для американских мужчин, основанные на оценке рисков по данным Агентства по защите окружающей среды [9]. Все органы получили одинаковую поглощенную дозу

of patients (i.e., healthy, breast, colon and liver). Here the survival rate for female breast cancer is high while the survival rate for liver cancer is low.

The survival rates in the LAR equations has been modified with the longest time duration age and sex dependent cancer statistics data for the creation of population specific patient survival rates. The probability of survival rate for age a is calculated as the number of persons alive at year a divided by the initial persons alive at age 0. The patient specific survival rates, $S(a)_{Pat.Spec}$ for e.g. liver are modified for the first five years after exposure as from:

$$S(a)_{Pat.Spec} = \frac{N(a)^*}{N(0)} = \frac{N(a) * ASP_5(liver)}{N(0)} \quad (3)$$

where $N(a)$ and $N(0)$ are the total number of health sex specific person alive at age a and 0. $N(a)^*$ is the total number of patients live at age a generated by multiplying $N(a)$ with the annual 5-year survival probability of liver cancer patients. The results of three different cancer patients are shown in Fig. 3. The EPA ERR and EAR models with Swedish survival rates in Fig. 3 were modified to account for the shorter expected survival for subpopulations of cancer patients as compared to survival rates for standard (relatively healthy) populations. This shows the effect modification of survival rates for different groups of cancer patients has on the predicted LAR. For calculating LAR, the EPA risk models were applied to survival rates and female incidence cancer data for three groups of patients (i.e., healthy, breast, colon and liver). Here the survival rate for female breast cancer is high while the survival rate for liver cancer is low.

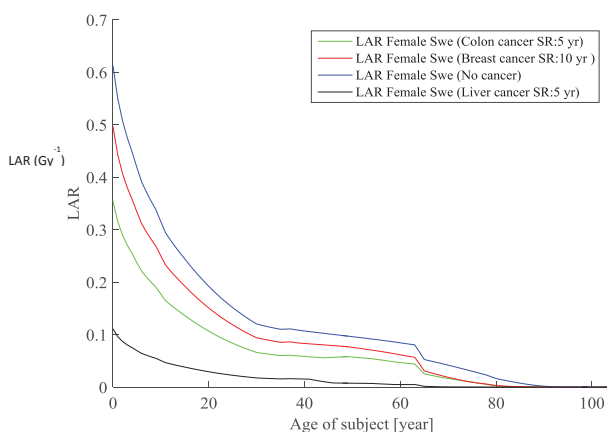


Fig. 3. LAR incidence as function of the age at exposure for a normal Swedish female population and for three different groups of Swedish female cancer patients (diagnosed with any stage of, and treated against colon cancer, breast cancer and liver cancer, respectively). SR means years of included survival rate. All organs were given the same absorbed dose.

[Рис. 3. Зависимость пожизненного атрибутивного риска от возраста при облучении для нормального (здорового) шведского населения и для трех различных групп шведских онкобольных женского пола (с установленным диагнозом или проходящих лечение при раке прямой кишки, молочной железы и печени). SR – годы учтённого периода дожития. Все органы получили одинаковую поглощенную дозу]

NORDCAN. Следует отметить, что значения показателя риска возникновения рака, представленные на рисунке 2 для фонового облучения, основаны на функциях выживания для нормального населения. Для специфических выборок пациентов (например, пациентов с заболеванием, которое существенно сократит срок жизни), вероятность дожития $S(a)$ в выражении (1) зачастую должна быть модифицирована. Например, в данных, проанализированных Critz et al., 10-, 15-, 20- и 25-летняя выживаемость без заболевания для рака простаты после проведенного курса лечения с помощью брахитерапии и дистанционной лучевой терапии составила 75%, 73%, 73%, 73%, соответственно. Как показывают данные, никаких рецидивов не было выявлено между 15 и 25 годами; таким образом, после 15 лет наблюдения пациентов можно относить к группе здоровых. Данные предположения были использованы для оценки избыточного риска рака для таких пациентов, вероятности дожития которых отличаются от нормального населения. Вероятности дожития в выражении для расчета пожизненного атрибутивного риска были заменены на специфические для популяции вероятности дожития для пациентов (рис. 3). Для этого была использована статистика по онкозаболеваемости среди различных половозрастных групп, охватывающая максимально продолжительный период времени. Модели ERR и EAR, разработанные EPA, с учетом вероятностей дожития для шведского населения были модифицированы с целью учета меньшей ожидаемой вероятности дожития для групп онкопациентов по сравнению с вероятностью дожития для стандартных (практически здоровых) популяций. Это позволяет показать эффект, который оказывает модификация вероятности дожития для различных групп онкопациентов на пожизненный атрибутивный риск. Для расчета LAR модели риска EPA были применены к вероятностям дожития и данным по заболеваемости раком среди женщин (здоровые, рак молочной железы, рак прямой кишки, рак печени). Вероятности дожития в случае рака молочной железы высоки по сравнению с вероятностями дожития в случае рака печени.

Вероятность дожития до возраста a рассчитывалась как отношение числа живых индивидуумов возраста a к исходному числу на момент рождения. Вероятности дожития, специфические для пациентов (например, с раком печени), $S(a)_{Pat.Spec}$, модифицированы для первых пяти лет после облучения в соответствии с выражением:

$$S(a)_{Pat.Spec} = \frac{N(a)^*}{N(0)} = \frac{N(a) * ASP_5(liver)}{N(0)} \quad (3)$$

где $N(a)$ и $N(0)$ – общее количество здоровых живых индивидуумов с учетом их пола в возрасте a и на момент рождения соответственно. $N(a)^*$ – общее количество живых пациентов в возрасте a , полученное умножением $N(a)$ на ежегодную пятилетнюю вероятность выживания пациентов с раком печени.

Результаты для пациентов с тремя различными раками представлены на рисунке 3.

3. Results and discussion

3.1. Changing the cancer base line and survival fractions of the LAR estimations

A comparison between the LAR (Gy^{-1}) incidence for a Swedish male population, based on survival rates from the Swedish National Board of Health and Welfare [14] and the last 30 years of Swedish cancer statistic from NORDCAN [15] and for a US population is shown in Fig 2. Both estimates are based on risk predictions given by EPA [9]. All tissues received the same absorbed dose. For newborn, children and adolescents of the Swedish male population, the LAR is lower than for similar US groups. This is probably due to differences in cancer statistics. For adult and senior (60+ year) males, there is no significant difference between the countries. The impact of any differences in cancer statistics will be less for the elderly due to shorter survival.

3.2. Changing LAR estimations from a healthy Swedish population to a cohort of Swedish patients

In Fig 3 LAR (Gy^{-1}) predictions are shown for a normal Swedish female population and for three different groups of Swedish female cancer patients. The LAR risks are the risk of receiving a cancer, incidence, for a cohort of breast, colon and liver cancer subjects. All tissues received the same absorbed dose. The result can be interpreted in two ways. For colon cancer, patients who have a low probability of survival, additional diagnostic imaging would have a low impact. In some cases, examinations are performed on both normal (healthy) populations and a cohort of a specific (potentially diseased) patient groups with an average risk somewhere in between the risk for these two subgroups. Optimization tools would include as input the fractions associated with each of these groups.

4. Conclusions

In radiological diagnostics and therapy, it is important that practitioners and referrers (i.e., radiologists, radiation oncologists and other health-care professionals) understand the radiation doses and the associated risk for patients undergoing various procedures. The risk for radiation induced cancer should be known and considered for all types of medical exposures and patient cohorts, but unfortunately the knowledge among health care professionals is limited. There is a need to include both more valid assessments of absorbed dose, and reasonable estimates of induced number of radiation cancer cases that would occur later in life for specific patient cohorts.

The most commonly used quantity to estimate the stochastic effects (mainly cancer) in medical radiology is the effective dose (E). However, LAR estimates offer a more suitable and direct approach for assessing cancer risk from the exposure to ionizing radiation associated with medical procedures. For cohorts of Swedish patients, LAR values should be based on Swedish statistics on survival rates with adjustments to account for the patient's health status. Assuming the same absorbed dose for all organs, LAR coefficients (Gy^{-1}) for Swedish males were 0.11, 0.068, and 0.038 for ages at exposure 20, 40 and 70 years, respectively; this is lower than the corresponding figures for US males, 0.13, 0.077, and 0.040. For Swedish females exposed at 40 years of age with a diagnosis of breast, colon or liver cancer, the LAR coefficients were 0.064, 0.034,

Результаты и обсуждение

Изменение фоновой заболеваемости раком и вероятностей дожития при оценке пожизненного атрибутивного риска

Сравнение между значениями LAR (Гр^{-1}) для шведского мужского населения, основанными на вероятностях дожития, публикуемых Шведским национальным советом по здоровью и благополучию, и онкологической статистике NORDCAN, и для американского населения представлено на рисунке 2. Обе оценки получены по модели риска, разработанной EPA. Все ткани получили одинаковую поглощенную дозу. Для шведских новорожденных, детей и подростков мужского пола значения LAR ниже по сравнению с аналогичными американскими когортами. Это может быть объяснено различиями в онкологической статистике. Для взрослого и пожилого населения достоверных различий между странами установлено не было. Влияние любых различий в онкологической статистике для пожилых будет минимально в связи с более коротким периодом дожития.

Изменение пожизненного атрибутивного риска при переходе от здорового шведского населения к когортам шведских пациентов

На рисунке 3 представлены результаты расчета LAR (Гр^{-1}) для нормального шведского женского населения и для трех различных групп шведских онкологических пациентов женского пола. Все ткани получили одинаковую поглощенную дозу. Результат можно интерпретировать двояко. Для рака прямой кишки дополнительные диагностические исследования с применением ионизирующего излучения будут слабо влиять на радиационные риски в связи с тем, что у пациентов низкие шансы выживания. В некоторых случаях исследования будут проводиться как на нормальном (здоровом) населении, так и на специфической когорте (потенциально больных) пациентов, со средним риском, лежащим в диапазоне рисков для указанных когорт.

Заключение

В лучевой диагностике и терапии крайне важно, чтобы медицинский персонал (врачи-рентгенологи, лечащие врачи, радиационные онкологи и пр.) имели представление о том, какую дозу облучения получил пациент от различных рентгенорадиологических исследований и с каким риском для здоровья эта доза связана. Риски развития радиогенных раков должны быть известны и учтены для всех видов лучевой диагностики и терапии и для всех групп пациентов. К сожалению, знания медицинского персонала в данной области ограничены. Необходимо проводить более достоверные оценки поглощенных доз и оценку возможного количества случаев радиогенного рака, которые проявятся в дальнейшем у различных когорт пациентов.

Наиболее распространенным способом оценки стохастических эффектов (главным образом, рака) в лучевой диагностике является эффективная доза. Однако метод расчета пожизненного атрибутивного риска предлагает более подходящий и прямой подход к оценке радиационного риска при медицинском облучении. Для когорт шведских пациентов значения пожизненного атрибутив-

and 0.0038, respectively, which is much lower than the LAR coefficient (0.073) for a 40-year-old female without known cancer. Appropriate LAR predictions can help improved radiation risk estimates for normal (healthy) populations as well as for various groups of patients, and simplify the justification process for referring physicians as well as professionals in diagnostic radiology, nuclear medicine and radiation therapy. The information to patients will also be improved.

5. Acknowledgement

This project was funded by Swedish Radiation Safety Authority (grant number: SSM2018-2163)

Disclaimer:

The views expressed in this article are those of the author and do not necessarily represent the views or policies of their organizations.

ного риска должны основываться на шведской статистике по вероятностям дожития с учетом текущего статуса здоровья пациента. Для шведских мужчин, при условии, что все органы организма получили одну и ту же поглощенную дозу, и облучение произошло в возрасте 20, 40 и 70 лет, соответствующие значения пожизненного атрибутивного риска (Гр-1) составили 0,11, 0,068, и 0,038 соответственно, что ниже по сравнению с аналогичными результатами для американских мужчин – 0,13, 0,077, и 0,040 соответственно. Для шведских женщин, при условии, что все органы организма получили одну поглощенную дозу и облучение произошло в возрасте 40 лет с диагнозом рака груди, прямой кишки или печени, значения пожизненного атрибутивного риска (Гр-1) составили 0,064, 0,034, и 0,0038 соответственно, что существенно ниже значения 0,073 в случае облучения 40-летних женщин, у которых раковые заболевания диагностированы не были. Расчеты пожизненного атрибутивного риска могут повысить достоверность оценки радиационного риска как для нормального (здорового) населения, так и для различных групп пациентов, и упростить процесс обоснования для лечащих врачей и специалистов-рентгенологов, радиологов и онкологов. Информирование пациентов также существенно улучшится.

References

1. The Russian Federation Federal Law No. 3-FZ of January 9, 1996 (Approved by the State Duma, December 5, 1995), Moscow, Russian Federation, 1996. (In Russian)
2. EU. European Council Directive 2013/59/Euratom on basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. O.J. of the EU. L13; 57: 1–73. 2014.
3. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP. 2007, 37(2–4):1–332.
4. Harrison J. D., Balonov M., Martin C. J., Ortiz Lopez P., Menzel H.G., Simmonds J.R., Smith-Bindman R., Wakeford R. Use of effective dose. Ann. ICRP. 2016, 45(1S): 215–224.
5. Almén A., Mattsson S. On the calculation of effective dose to children and adolescents. J. Radiol. Prot. 1996, 16: 81–89.
6. Wall B. F., Haylock R., Jansen, J. T. M., Hillier, M. C. Radiation risks from medical x-ray examinations as a function of the age and sex of the patient. Report HPACRCE-028. Health Protection Agency, U.K., 2011.
7. Balonov M., Shrimpton C. Effective dose and risks from medical x-ray procedures. In: Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection. Ann. ICRP 2012, 41(3–4): 129–141.
8. Balonov M., Golikov V., Kalnitsky S., Zvonova I., Chipiga L., Sarycheva S., Shatskiy I., Vodovatov A. Russian practical guidance on radiological support for justification of x-ray and nuclear medicine examinations. Radiat. Prot. Dosim. 2015, 165: 39–42.
9. EPA. Radiogenic cancer risk models and projections for the US population. 402-R-11-001 pp 1–175, 2011. – Available from: <https://www.epa.gov/radiation/epa-radiogenic-cancer-risk-models-and-projections-us-population>. (Accessed: 20.10.2018)
10. Berrington de Gonzalez A., Iulian Apostolaei A., Veiga L.H., Rajaraman P., Thomas B.A., Owen Hoffman F., Gilbert E., Land C. RadRAT: a radiation risk assessment tool for lifetime cancer risk projection. J. Radiol. Prot. 2012, 32:205–222.
11. NAS (National Academy of Sciences). Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. BEIR VII Phase 2. Washington, DC, USA: National Academy Press, 2006.
12. Andersson M., Eckerman K., Mattsson S. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. Phys. Med. Biol. 2017, 62: 9177–9188.
13. Gudowska I., Ardenfors O., Toma-Dasu I., Dasu A. Radiation burden from secondary doses to patients undergoing radiation therapy with photons and light ions and radiation doses from imaging modalities. Radiat. Prot. Dosim. 2014, 161(1–4):357–362.
14. Swedish National Board of Health and Welfare. – Available from: <http://www.socialstyrelsen.se/statistics/statisticaldatabase/help/causeofdeath> (Accessed: 20.10.2018)
15. Engholm G., Ferlay J., Christensen N., Hansen H.L., Hertzum-Larsen R., Johannesen T.B., Kejs AMT., Khan S., Ólafsdóttir E., Petersen T., Schmidt LKH., Virtanen A., Storm H.H. NORDCAN: Cancer Incidence, Mortality, Prevalence and Survival in the Nordic Countries, Version 8.1 (28.06.2018). Association of the Nordic Cancer Registries. Danish Cancer Society. – Available from: <http://www.ancr.nu> (Accessed: 20.10.2018).
16. Critz F.A., Benton J.B., Shrake P., Merlin M.L. 25-Year disease-free survival rate after irradiation for prostate cancer calculated with the prostate specific antigen definition of recurrence used for radical prostatectomy. J. Urol. 2013, 189(3):878–883.

Received: February 15, 2019

Andersson Martin – PhD, leading researcher, Medical Radiation Physics Malmö, Department of Translational Medicine, Lund University, Malmö, Sweden

Eckerman Keith – PhD, senior researcher, Center for Radiation Protection Knowledge, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA

Pawel David – PhD, statistician, United States Environmental Protection Agency, Washington, USA

Almén Anja – PhD, senior researcher, Medical Radiation Physics Malmö, Department of Translational Medicine, Lund University, Malmö, Sweden

Mattsson Sören – PhD, PhD(h.c.), professor, Medical Radiation Physics Malmö, Department of Translational Medicine, Lund University. **Address for correspondence:** Skåne University Hospital Malmö, SE-205 02 Malmö, Sweden; E-mail: soren.mattsson@med.lu.se

For citation: Andersson, M., Eckerman, K., Pawel D., Almén, A., Mattsson, S. Improved radiation risk models applied to specific cohorts of Swedish patients. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2019;12(2):44-54. DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-44-54

Литература

1. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 N 3-ФЗ. Утвержден Государственной Думой 05.12.1995. – Москва, 1996.
2. EU. European Council Directive 2013/59/Euratom on basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. O.J. of the EU. L13; 57: 1–73. 2014.
3. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP. 2007, 37(2–4):1–332.
4. Harrison J. D., Balonov M., Martin C. J., Ortiz Lopez P., Menzel H.G., Simmonds J.R., Smith-Bindman R., Wakeford R. Use of effective dose. Ann. ICRP. 2016, 45(1S): 215–224.
5. Almén A., Mattsson S. On the calculation of effective dose to children and adolescents. J. Radiol. Prot. 1996, 16: 81–89.
6. Wall B. F., Haylock R., Jansen, J. T. M., Hillier, M. C. Radiation risks from medical x-ray examinations as a function of the age and sex of the patient. Report HPACRCE-028. Health Protection Agency, U.K., 2011.
7. Balonov M., Shrimpton C. Effective dose and risks from medical x-ray procedures. In: Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection. Ann. ICRP 2012, 41(3–4): 129–141.
8. Balonov M., Golikov V., Kalnitsky S., Zvonova I., Chipiga L., Sarycheva S., Shatskiy I., Vodovotov A. Russian practical guidance on radiological support for justification of x-ray and nuclear medicine examinations. Radiat. Prot. Dosim. 2015, 165: 39–42.
9. EPA. Radiogenic cancer risk models and projections for the US population. 402-R-11-001 pp 1–175, 2011. – Available from: <https://www.epa.gov/radiation/epa-radiogenic-cancer-risk-models-and-projections-us-population>. (Accessed: 20.10.2018)
10. Berrington de Gonzalez A., Iulian Apostoaei A., Veiga L.H., Rajaraman P., Thomas B.A., Owen Hoffman F., Gilbert E., Land C. RadRAT: a radiation risk assessment tool for lifetime cancer risk projection. J. Radiol. Prot. 2012, 32:205–222.
11. NAS (National Academy of Sciences). Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. BEIR VII Phase 2. Washington, DC, USA: National Academy Press, 2006.
12. Andersson M., Eckerman K., Mattsson S. Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. Phys. Med. Biol. 2017, 62: 9177–9188.
13. Gudowska I., Ardenfors O., Toma-Dasu I., Dasu A. Radiation burden from secondary doses to patients undergoing radiation therapy with photons and light ions and radiation doses from imaging modalities. Radiat. Prot. Dosim. 2014, 161(1–4):357–362.
14. Swedish National Board of Health and Welfare. – Available from: <http://www.socialstyrelsen.se/statistics/statisticaldata-base/help/causeofdeath> (Accessed: 20.10.2018)
15. Engholm G., Ferlay J., Christensen N., Hansen H.L., Hertzum-Larsen R., Johannesen T.B., Kejs AMT., Khan S., Ólafsdóttir E., Petersen T., Schmidt LKH., Virtanen A., Storm H.H. NORDCAN: Cancer Incidence, Mortality, Prevalence and Survival in the Nordic Countries, Version 8.1 (28.06.2018). Association of the Nordic Cancer Registries. Danish Cancer Society. – Available from: <http://www.ancr.nu> (Accessed: 20.10.2018).
16. Critz F.A., Benton J.B., Shrake P., Merlin M.L. 25-Year disease-free survival rate after irradiation for prostate cancer calculated with the prostate specific antigen definition of recurrence used for radical prostatectomy. J. Urol. 2013, 189(3):878–883.

Поступила: 15.02.2019 г.

Андерссон Мартин – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Группа медицинской физики отдела трансляционной медицины Лундского университета, г. Мальмё, Университетский госпиталь округа Скона, Швеция

Маттссон Сорен

Группа медицинской физики отдела трансляционной медицины Лундского университета, Университетский госпиталь округа Скона

Адрес для переписки: ITM, Lund University, Skåne University Hospital Malmö, SE-205 02 Malmö, Sweden; E-mail: soren.mattsson@med.lu.se

Эккерман Кейт – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центр данных по радиационной защите, национальная лаборатория Оук Ридж, Оук Ридж, Теннесси, США

Павел Девид – кандидат биологических наук, статистик, Агентство по защите окружающей среды США, Вашингтон, округ Колумбия, США

Олмен Аня – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Группа медицинской физики отдела трансляционной медицины Лундского университета, г. Мальмё, Университетский госпиталь округа Скона, Швеция

Адрес для переписки: Маттссон Сорен – кандидат биологических наук, профессор, Группа медицинской физики отдела трансляционной медицины Лундского университета, Университетский госпиталь округа Скона. (ITM, Lund University, Skåne University Hospital Malmö, SE-205 02 Malmö, Sweden; E-mail: soren.mattsson@med.lu.se)

Для цитирования: Андерссон М., Эккерман К., Павел Д., Олмен А., Маттссон С. Улучшенные модели оценки радиационного риска для отдельных когорт пациентов в Швеции // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 2 – С. 44-54. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-44-54

Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека

В.Ю. Голиков

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлен метод и разработанная на его основе компьютерная программа расчета дозиметрических характеристик, необходимых для оценки или ограничения воздействия ионизирующего излучения (средние organные дозы, эффективная доза, распределение поглощенной дозы в критическом органе), на основе измеряемых характеристик полей фотонного излучения (керма в воздухе, показания индивидуальных дозиметров) с энергией 0,02–10 МэВ. Программа позволяет рассчитывать значения более чем 20 средних organных доз в восьми расчетных моделях тела взрослого человека и детей, эффективную дозу, распределение поглощенной дозы в красном костном мозге. Кроме того, рассчитываются отношения значений эффективной дозы к показаниям «индивидуальных дозиметров», размещенных в 48 фиксированных точках на поверхности фантома. Разработанный расчетный метод и компьютерная программа могут быть эффективно использованы: 1) для расчета доз внешнего облучения и прогноза степени радиационного поражения в случаях острого аварийного облучения персонала и населения; 2) при разработке моделей облучения персонала, работающего в полях с резко неравномерным распределением их характеристик по пространству, занимаемому человеком; 3) при планировании контрмер при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения территорий (расчет маршрутов и времени пребывания персонала в опасных зонах); 4) при обучении и тренинге персонала, участвующего в расследовании и ликвидации последствий радиационных аварий.

Ключевые слова: внешнее излучение, модели облучения, расчет доз, organные дозы, эффективная доза, фантомы тела человека.

Введение

В настоящее время любой дозиметрический критерий воздействия ионизирующего излучения на человека, независимо от того, оценивает он вероятность возникновения отдаленных эффектов (эквивалентные дозы в органах, эффективная доза) или тяжесть острого лучевого поражения (поглощенная доза в органе), связан с пространственными характеристиками поля излучения в облучаемом объекте. Получить такие сведения непосредственно на практике чрезвычайно сложно или невозможно. Поэтому необходимо иметь средства установления связи между измеряемыми на практике величинами и оцениваемыми критериями воздействия излучения. Возможны два подхода к решению этой проблемы – экспериментальный и расчетный. Оба они предполагают использование фантомов (моделей) тела человека.

Анализ тенденций в выборе методов решения указанной проблемы показывает, что соотношение экспериментальных и расчетных способов определения характеристик поля фотонного излучения в теле человека

постоянно изменяется в пользу последних. Главная причина этого заключается в возрастающих успехах в развитии методов вычислений и самих компьютеров, с одной стороны, и во все большем усложнении и удорожании современного эксперимента – с другой. Кроме того, геометрические и физические условия в экспериментах обычно приспособлены к прямым практическим приложениям. Поэтому зависимость получаемых результатов от входных параметров значительно затрудняет выделение из них физических данных, пригодных для использования при других отличных обстоятельствах. Иными словами, методы математического моделирования условий облучения человека с использованием математических фантомов в качестве модели тела представляют собой мощный инструмент в решении целого ряда задач радиационной безопасности.

В настоящее время расчетные оценки средних доз в органах человека, в основном, ограничиваются их значениями в полях протяженных источников с однородными характеристиками поля излучения в пространстве, занимаемом человеком [1, 2]. Однако на практике очень часто имеет место резко неоднородное облучение тела чело-

Голиков Владислав Юрьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

века (острое аварийное облучение, профессиональное облучение работника в случае выполнения целого ряда операций с источниками ионизирующего излучения). В случае острого аварийного облучения быстрая оценка органических доз или распределения доз по отдельным органам (например, в красном костном мозге) необходима для сортировки пострадавших и выбора тактики их лечения в условиях ограниченности медицинских ресурсов. При профессиональном облучении для корректной оценки эффективной дозы в условиях резко неравномерного облучения одним из основных моментов является выбор количества и мест расположения индивидуальных дозиметров на теле работника.

Цель исследования – разработка метода и компьютерной программы (алгоритма) расчета дозиметрических характеристик, необходимых для оценки или ограничения воздействия ионизирующего излучения (средние органические дозы, эффективная доза, распределение поглощенной дозы в критическом органе), на основе измеряемых характеристик полей фотонного излучения (керма в воздухе, показания индивидуальных дозиметров) с энергией 0,02–10 МэВ.

Описание метода расчета

В настоящее время при расчетах прохождения излучения через различные среды используются два «точных» метода – численное решение уравнения переноса и метод Монте-Карло (МК). Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Численные методы решения уравнения переноса, позволяющие получать результат с необходимой точностью при приемлемых затратах машинного времени, разработаны лишь для сравнительно простых геометрий задачи – бесконечная или полубесконечная среда, бесконечная пластина. С усложнением геометрии задачи, кроме трудностей математического характера, существенно возрастают затраты машинного времени и требования к необходимому объему памяти компьютера. Поэтому численное решение уравнения переноса остается наиболее эффективным путем получения детальной картины поля излучения, если в качестве модели тела человека используется, например, бесконечная пластина. Если же в качестве модели тела использовать антропоморфный гетерогенный фантом, то более адекватным методом расчета будет метод МК, позволяющий проводить расчеты для геометрии любой сложности. Однако существенным его недостатком являются присущие ему относительно большие затраты машинного времени. Все это накладывает ограничения на эффективное использование прямых расчетов методом МК в повседневной практике радиационной безопасности.

Для решения практических задач расчета полей фотонного излучения в ограниченных средах могут быть использованы приближенные методы расчета, которые допускают на отдельных этапах использование «точных» численных методов. Применительно к задаче расчета распределения доз и их средних значений в органах тела человека в рамках настоящего исследования был использован следующий подход. Доза гамма-излучения в произвольной точке интересующего нас органа определяется с помощью соответствующей функции ослабления дозы $D(l)$, где l – пробег частицы внутри тела до выбранной точки. Функция $D(l)$ для данной энергии фотонного излучения рассчитывается с помощью численного решения уравнения переноса в одномерной, плоской геометрии, где в качестве фантома используется бесконечная тканезквивалентная пластина. Затем вычисляется функция распределения длин пробегов частиц до органа – $p(l)dl$, имеющая смысл вероятности нахождения элемента массы dm органа на глубине между l и $l+dl$. После этого можно рассчитать распределение дозы по органу или ее среднее значение:

$$\bar{D} = \int_V D(l) \cdot p(l) \cdot dl / \int_0^\infty p(l) \cdot dl \quad (1)$$

Функция распределения $p(l) \cdot dl$ для данной геометрии поля и ориентации фантома рассчитывается методом МК, случайным образом выбирая элемент массы dm внутри органа и повторяя этот процесс до достижения заданной статистической погрешности расчета.

Подобный метод расчета характеристик поля фотонного излучения в антропоморфной гетерогенной модели тела человека (CHORD-method) впервые был обоснован в работе [3]. В последующем он с успехом использовался при оценке доз облучения жителей японских городов Хиросимы и Нагасаки, пострадавших в результате атомной бомбардировки в 1945 г.

В качестве базовой информации для определения функции ослабления фотонного излучения использовались результаты расчета дифференциальных и интегральных характеристик поля гамма-излучения плоского мононаправленного источника с различным энергетическим распределением плотности потока в гомогенной тканезквивалентной пластине, полученные методом интегральных уравнений [4, 5]. В качестве материала пластины использовалась 11-компонентная смесь [6], имитирующая усредненный элементный состав биологической ткани всего тела человека, включая костные структуры скелета. Расчет проводился методом интегральных уравнений с использованием 23-групповой библиотеки констант (табл. 1).

Таблица 1

Значения параметров, используемых в формулах (2) и (3)

[Table 1]

Parameter values used in formulas (2) and (3)]

№ гр. [#Gr]	Границы группы, МэВ [Group borders, MeV]	μ , см ⁻¹ [μ , cm ⁻¹]	Керма, Гр×см ² ·10 ⁻¹¹ [Kerma, Gy×cm ² ·10 ⁻¹¹]	α	β	γ	γ_1	γ_2	γ_3
1	9,0–11,0	0,0219	2,475	0,005	0,0126	0	0,010	0,044	0,84
2	7,0–9,0	0,0240	2,098	0,006	0,0132	0	0,031	0,048	0,80

№ гр. [#Gr]	Границы группы, МэВ [Group borders, MeV]	μ , см ⁻¹ [μ , cm ⁻¹]	Керма, Гр×см ² ·10 ⁻¹¹ [Kerma, Gy×cm ² ·10 ⁻¹¹]	α	β	γ	γ_1	γ_2	γ_3
3	5,5–7,0	0,0273	1,772	0,008	0,0158	0	0,058	0,055	0,75
4	4,5–5,5	0,0300	1,514	0,010	0,0181	0	0,076	0,061	0,71
5	3,5–4,5	0,0337	1,309	0,012	0,0220	0	0,10	0,068	0,68
6	2,5–3,5	0,0393	1,086	0,018	0,0273	0	0,14	0,079	0,63
7	2,0–2,5	0,0460	0,878	0,030	0,0360	0	0,17	0,093	0,58
8	1,5–2,0	0,0523	0,7383	0,050	0,0470	0	0,21	0,11	0,55
9	1,0–1,49	0,0633	0,5788	0,076	0,0626	0	0,25	0,13	0,50
10	0,74–1	0,0752	0,4336	0,120	0,0820	0,0028	0,30	0,14	0,44
11	0,58–0,74	0,0852	0,3397	0,149	0,0996	0,0052	0,33	0,15	0,40
12	0,44–0,58	0,0954	0,2647	0,190	0,1250	0,0073	0,36	0,16	0,35
13	0,35–0,44	0,1057	0,204	0,200	0,1580	0,0100	0,40	0,18	0,30
14	0,27–0,35	0,1157	0,1564	0,300	0,1900	0,0128	0,42	0,19	0,26
15	0,22–0,27	0,1255	0,1194	0,350	0,2280	0,0159	0,45	0,20	0,22
16	0,18–0,22	0,1344	0,0936	0,397	0,2535	0,0180	0,47	0,22	0,21
17	0,14–0,18	0,1442	0,0707	0,440	0,2850	0,0208	0,49	0,23	0,23
18	0,11–0,14	0,1548	0,0518	0,520	0,3300	0,0235	0,50	0,28	0,28
19	0,09–0,11	0,1650	0,0399	0,602	0,3590	0,0244	0,50	0,29	0,28
20	0,07–0,09	0,1765	0,0323	0,702	0,4120	0,0210	0,49	0,31	0,30
21	0,049–0,07	0,1968	0,0294	0,722	0,4584	0,0106	0,46	0,43	0,42
22	0,035–0,049	0,2485	0,0391	0,600	0,3100	0	0,39	0,66	0,66
23	0,020–0,035	0,4677	0,0894	0,170	0,3000	0	0,25	1,06	1,00

Анализ совокупности полученных расчетных результатов позволил подобрать аналитическое выражение, аппроксимирующее тканевую керму $K(E, l)$ фотонного излучения плоского мононаправленного источника с энергией E (МэВ) в точке на глубине l (см) внутри бесконечной пластины толщиной l_0 (см) в следующем виде:

$$K(E, l) = K(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot l) \cdot \left\{ 1 + [B_{1/2\infty} - 1] \cdot [1 - g_1(E) \cdot \exp(-g_2(E) \cdot (l_0 - l))] \cdot [1 - \exp(-g_3(E) \cdot l_0)] \right\} \quad (2)$$

$$B_{1/2\infty}(E, l) = 1 + \alpha + \beta \cdot l \cdot \exp(\gamma \cdot l) \quad (3)$$

где: $B_{1/2\infty}(E, l)$ – дозовый фактор накопления излучения плоского моноэнергетического мононаправленного источника фотонов с энергией, соответствующей k -й энергетической группе, в полубесконечной тканеэквивалентной среде на глубине l ; $K(E)$ – тканевая керма излучения рассматриваемого источника в той же точке в воздухе в отсутствие пластины; μ – линейный коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией, соответствующей k -й энергетической группе в биологической ткани тела человека; $g_1, g_2, g_3, \alpha, \beta, \gamma$ – эмпирические параметры.

Дополнительная погрешность оценки значений $K(E, l)$ за счет аппроксимации результатов «точных» расчетов, полученных методом интегральных уравнений, формулами (2) и (3), не превышала 6%.

Множитель $[1 - g_1(E) \cdot \exp(-g_2(E) \cdot (l_0 - l))]$ в формуле (2) учитывает пространственное распределение краевого эффекта в зависимости от расстояния $(l_0 - l)$ от

точки расчета до задней грани пластины, т.е. в направлении распространения излучения. Он описывает уменьшение дозы рассеянного компонента поля излучения в бесконечной пластине по сравнению с дозой на той же глубине в полубесконечной среде за счет «утечки» излучения через заднюю грань. «Утечка» на задней грани не зависит от толщины пластины при $l_0 > 3$ длин свободного пробега излучения источника. Для более тонких пластин появляется зависимость «утечки» от толщины пластины l_0 , которая описывается множителем $[1 - \exp(-g_3(E) \cdot l_0)]$.

Для учета ограниченных размеров расчетной модели в поперечном направлении в дозовые характеристики поля, рассчитанные для бесконечной в поперечном сечении пластины, вводили поправку на «утечку» излучения через боковые границы модели, полученную экспериментальным путем [7]. Согласно результатам экспериментов, проведенных с источниками гамма-излучения ^{60}Co ($E_{\text{ср.}} = 1,25$ МэВ), ^{137}Cs ($E = 0,662$ МэВ), ^{192}Ir ($E_{\text{ср.}} = 0,36$ МэВ) и ^{76}Se ($E_{\text{ср.}} = 0,22$ МэВ), оказалось, что влияние «утечки» на долю рассеянного излучения в точке детектирования в зависимости от расстояний l_1 и l_2 до боковых граней модели можно учесть с помощью выражения:

$$\frac{B_{\text{Д.огр.пл.}} - 1}{B_{\text{Д.беск.пл.}} - 1} = 1 - 0,5 \cdot \exp(-g_4 \cdot l_1) - 0,5 \cdot \exp(-g_4 \cdot l_2) \quad (4)$$

где $B_{\text{Д.огр.пл.}}$ и $B_{\text{Д.беск.пл.}}$ – дозовые факторы накопления на одинаковой глубине в ограниченной и бесконечной пластине соответственно, а $g_4(E)$ – параметр, значение

которого было найдено путем обработки экспериментальных данных [7]. Там же было показано, что с уменьшением энергии фотонного излучения для описания «утечек» излучения через боковую и заднюю грани пластины можно использовать одно значение параметра, т. е. $g_4 \approx g_2$ (при $E < 0,1$ MeV).

С учетом выражения (4), окончательную формулу для расчета функции ослабления дозы излучения в ограниченной тканеэквивалентной среде можно записать следующим образом:

$$K(E, l) = K(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot l) \cdot \left\{ \frac{1 + [B_{1/2\infty} - 1] \cdot [1 - g_1(E) \cdot \exp(-g_2(E) \cdot (l_0 - l)) \cdot [1 - \exp(-g_3(E) \cdot l_0)]]}{[1 - 0,5 \cdot \exp(-g_4 \cdot l_1) - 0,5 \cdot \exp(-g_4 \cdot l_2)]} \right\} \quad (5)$$

При расчете дозы по формуле (5) для точечного изотропного источника, находящегося на конечном расстоянии от поверхности тела человека, вводится поправка на закон обратных квадратов и используются факторы накопления для плоского мононаправленного источника. Для точек, расположенных на «косых» лучах, расчет дозы проводится для пробега $l/\cos\Theta$, где Θ – угол между прямой источник – точка расчета дозы и внешней нормалью к поверхности тела.

Значения параметров в зависимости от энергии гамма-излучения представлены в таблице 1.

Учет гетерогенности органов по плотности для внесения поправки в функцию ослабления мощности дозы осуществлялся только для легких, имеющих меньшую плотность ($0,3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$) по сравнению с плотностью других органов и мягких тканей тела ($1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Для этого в расчетах ослабления мощности дозы фотонного излучения использовалась эквивалентная длина пробега $l_{\text{экв}}$:

$$l_{\text{экв}} = l - 0,7 \cdot l_{\text{л}} \quad (6)$$

где: l – полный пробег фотона в ткани до точки расчета мощности дозы; $l_{\text{л}}$ – пробег фотона в легких.

Влияние скелета учитывалось путем модификации дозовых характеристик поля излучения. Она заключалась в том, что при проведении расчетов ослабления фотонного излучения в тканеэквивалентных пластинах использовались многогрупповые константы ослабления фотонного излучения для 11-компонентной смеси, включающей в себя и костную ткань. Переход же к дозовым характеристикам поля фотонного излучения осуществлялся с использованием групповых значений удельной кермы для 4-компонентной смеси [8], моделирующей в дозиметрическом отношении мягкие ткани человека, из которых состоят внутренние органы. При расчете дозы в красном костном мозге и в эндостальной ткани, моделируемой для дозиметрических целей слоем ткани, толщиной 10 мкм, выстилающим поверхности костных структур, дополнительно использовались поправочные коэффициенты, зависящие от возраста облучаемого человека [9].

Таким образом, для расчета распределения доз и их средних значений в органах тела человека был использован следующий подход. С помощью метода Монте-Карло случайным образом разыгрываются координаты точки внутри выбранного «органа» расчетной модели тела человека. Для этой точки последовательно определяются:

- эквивалентный пробег в теле ($l_{\text{экв}}$);
- толщина эквивалентной пластины (l_0);
- расстояние до ее задней грани ($l_0 - l$);

– расстояния до боковых граней модели (l_1, l_2).

После этого рассчитывается значение дозы в точке, как это описано выше (см. формулу (5)). Процесс многократно повторяется и продолжается до достижения статистической погрешности определения средней величины дозы в выбранном органе 5% (с доверительной вероятностью 0,95). По окончании расчета может быть получено распределение доз в выбранном органе, а также любые его характеристики (среднее значение, дисперсия, максимальное значение дозы и т.д.). Такая же процедура проводится и для других органов, что дает возможность получить необходимые дозиметрические характеристики для каждого из них. Для упрощения процедуры расчета и ускорения сходимости метода МК некоторые органы, имеющие значительную протяженность и сложную геометрическую форму (кожа, красный костный мозг, кишечник), разбиты на несколько частей, для каждой из которых расчет проводится отдельно.

В качестве модели тела людей различного пола и возраста в настоящей работе использовались формализованное описание восьми математических фантомов. История создания математических фантомов началась в 1960-х гг., когда в Оксфордской национальной лаборатории (США) впервые был разработан фантом MIRD-5 [10]. В 1978 г. этот фантом был усовершенствован в соответствии с новыми данными МКПЗ относительно структуры и состава органов и тканей взрослых «стандартных» мужчины и женщины [11]. Эта версия фантома MIRD-5 представляет собой математическую модель тела взрослого гермафродита, имеющего, кроме одинаковых для обоих полов органов как специфически мужские (семенники), так и женские (яичники, матка) органы, однако у фантома отсутствовала модель женской груди. Cristy [12] усовершенствовал взрослый фантом гермафродита и разработал серию детских фантомов 0-, 1-, 5-, 10- и 15-летнего возраста, включив в набор органов женскую грудь. В 2006 г. была проведена ревизия этих фантомов [13] с включением в расчетные модели дополнительных органов и учетом новых данных Публикации 89 МКПЗ [14] и Публикации 46 МКРЕ [15]. В 1982 г. в ФРГ были разработаны расчетные модели «стандартного» мужчины (ADAM) и женщины (EVA) [16], основанные на описании фантомов типа MIRD, а также на данных Публикации 23 МКПЗ [17]. Основные антропометрические характеристики используемых расчетных моделей представлены в таблице 2.

Каждый фантом состоит из трех основных секций: торса (с включенными в него бедрами и руками), головы и ног. Торс и голова представлены эллиптическими цилиндрами, а ноги – двумя усеченными круговыми конусами. Органы и их отделы моделируются телами вращения – цилиндрами, эллипсоидами, конусами или частью объема этих тел, образующейся при их сечении различными плоскостями. Поверхности органов задаются уравнениями второго порядка в декартовой системе координат, связанной с фантомом. В этой же системе координат задается положение источника излучения относительно фантома. Фантомы включают 3 тканевые зоны с различной плотностью и атомным составом: скелет, объединяющий собственно костные структуры, красный костный мозг и эндостальную ткань, выстилающую поверхности костных структур и включенную в список органов риска; легкие и остальную часть тела, представленную в основном мягки-

Основные антропометрические параметры расчетных моделей

Таблица 2

[Table 2]

Anthropometric parameters of computational models

Возраст, годы [Age, years]	Вес, кг [Weight, kg]	Рост, см [Height, cm]	Толщина торса, см [Thickness of trunk, cm]	
			Передне-задняя [Anterio-posterior]	Боковая [Lateral]
0	3,5	51,5	9,8	12,7
1	9,3	75	13	17,6
5	19	109	15	22,9
10	31,9	138,6	16,8	27,8
15	54,4	164	19,6	34,5
MIRD-5	71,1	174	20	40
ADAM	70,5	170	20	40
EVA	59,2	160	18,8	37,6

ми тканями. Плотности скелета (гомогенная смесь кости и костного мозга), легких и мягких тканей принимались равными 1,5; 0,3 и 1 г·см⁻³ соответственно.

Эффективная доза E является взвешенной суммой средних эквивалентных доз в радиочувствительных органах и тканях тела (для фотонного излучения радиационный взвешивающий фактор полагается равным единице):

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (7)$$

где H_T – средняя эквивалентная доза в органе или ткани T ; w_T – тканевые взвешивающие факторы [18, 19].

Значения тканевых взвешивающих факторов w_T представляют собой долевого вклад органа или ткани T в общий риск стохастических эффектов при однородном облучении всего тела.

Вышеописанный алгоритм расчета средних доз в органах и тканях и эффективной дозы для людей различного возраста был реализован в виде компьютерной программы РАДОФАН¹ (Расчет ДОз в ФАНтоме).

Верификация расчетного метода

Верификацию результатов, получаемых с помощью вышеописанной схемы расчета, проводили в несколько этапов. На первом из них значения глубинных доз моноэнергетического фотонного излучения в ткане-эквивалентных пластинах различной толщины, рассчитанные с помощью формул (2) и (3), сравнивали с соответствующими результатами «точных» расчетов методом МК с помощью программы MCNP [20, 21]. На рисунке 1 представлены результаты сравнения для глубинных доз моноэнергетического фотонного излучения с энергией 0,06 МэВ, 0,2 МэВ и 1,25 МэВ в пластине толщиной 30 см. Расхождение результатов, полученных обоими расчетными методами, не превысило 10%. На рисунке 2 для

моноэнергетического излучения с энергией 0,06 МэВ представлены результаты сравнения глубинных доз для пластин различной толщины: 5, 15 и 30 см. Отчетливо видно влияние краевого эффекта на задней грани пластины при сравнении результатов для полубесконечной среды и пластин толщиной 15 и 30 см. Для пластины 5 см дополнительно видно влияние небольшой толщины пластины на значение глубинной дозы. В случае пластин толщиной 15 и 30 см расхождение результатов, полученных методом МК и по формулам (2) и (3), не превышает 5%, достигая 10% в случае пластины толщиной 5 см.

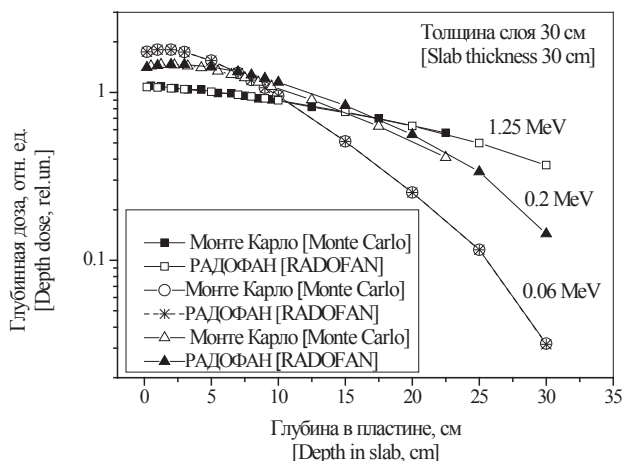


Рис. 1. Сравнение результатов расчетов глубинных доз фотонного излучения с различной энергией в тканеэквивалентной пластине толщиной 30 см, выполненных методом МК и с помощью выражений (2) и (3)

[Fig. 1. Comparison of the calculation results of deep doses of photon radiation with different energies in a tissue equivalent plate of 30 cm thick made by the MC method and using expressions (2) and (3)]

¹ Расчетный блок программы был написан Н.К. Барышковым, а пользовательскую оболочку для Windows разработал А.Ю. Власов. [Computing block of the software was developed by Baryshkov N. K., user interface in MS Windows environment – by Vlasov A.Yu.]

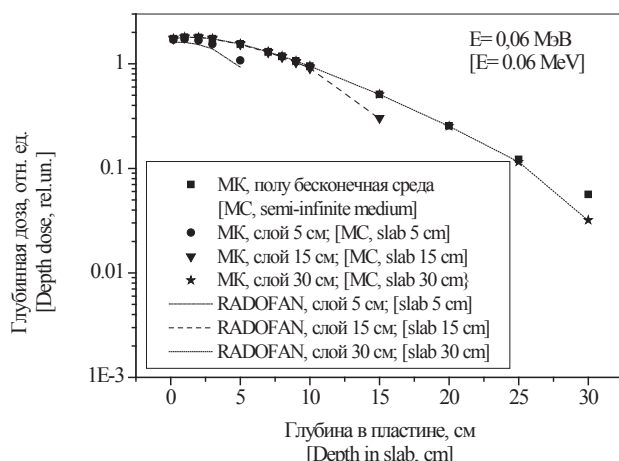


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов глубинных доз фотонного излучения с энергией 0,06 MeV в тканеэквивалентных пластинах различной толщины, выполненных методом МК и с помощью выражений (2) и (3)
[Fig. 2. Comparison of the calculation results of deep doses of photon radiation with the energy of 0.06 MeV in tissue equivalent plates with different thick made by the MC method and using expressions (2) and (3)]

На следующем этапе было проведено сравнение результатов собственных расчетов с результатами расчетов методом МК средних доз в отдельных органах при моделировании облучения фантома ADAM широким пучком моноэнергетического мононаправленного фотонного излучения. Здесь же для сравнения использовались также экспериментальные результаты определения доз в отдельных «органах» физического фантома Alderson Rando, близкого по своим характеристикам к математическому фантому ADAM [22]. Результаты сравнения, представленные в таблице 3,

свидетельствуют о хорошей сходимости как расчетных данных между собой, так и экспериментальных данных с расчетными.

Для верификации результатов расчета в случае крайне неравномерного облучения тела человека были выполнены собственные фантомные эксперименты с использованием закрытых радионуклидных источников гамма-излучения цилиндрической формы (диаметром 4–6 мм и высотой 5–10 мм) ^{192}Ir , ^{137}Cs и ^{60}Co , располагавшихся на расстоянии 20 см от передней поверхности фантома на высоте 120 см от пола.

Для измерений органных доз использовался физический антропоморфный фантом взрослого человека Alderson Rando [23]. Фантом содержал натуральный скелет. Мягкие ткани в фантоме моделируются специальным ткане-эквивалентным пластиком с эффективным атомным номером $z = 7,3$ и плотностью $0,99 \text{ г см}^{-3}$. Легкие изготовлены из того же пластика, но с плотностью $0,32 \text{ г см}^{-3}$. Фантом состоит из секций толщиной 2,5 см с просверленными отверстиями ($\varnothing = 5 \text{ мм}$, высота = 25 мм) для ТЛ-детекторов, что позволяет измерять распределение поглощенной дозы внутри фантома.

Измерение доз проводилось с использованием термолюминесцентных (ТЛ) детекторов LiF: Mg, Ti (ДТГ-4, Россия) толщиной 1 мм и диаметром 5 мм [24]. Для измерений была выбрана группа ТЛ-детекторов с разбросом чувствительности менее 7% (доверительный интервал 95%). ТЛ-детекторы были откалиброваны в воздухе в поле гамма-излучения образцового источника ^{137}Cs , относительная погрешность измерения мощности дозы которого не превышала 6% (доверительный интервал 95%). Суммарная основная относительная погрешность измерения составляла менее 10% (доверительный интервал 95%).

Подробно процедура измерения доз в «органах» тако-го фантома была описана нами ранее [25, 26].

Таблица 3

Отношение поглощенной дозы в органе к экспозиционной дозе на высоте 1 м на оси фантома $(\text{Гр} \times \text{Р}^{-1}) \cdot 10^{-2}$ при его облучении гамма-излучением точечного источника ^{241}Am , находящегося спереди от фантома на расстоянии 1 м от его поверхности

[Table 3]

Ratio of the absorbed dose in organ to the exposure on the height of 1 m on the phantom axis in $(\text{Gy} \cdot \text{R}^{-1}) \cdot 10^{-2}$ at its irradiation from gamma-radiation of ^{241}Am source located in front of phantom on the distance of 1 m]

Орган [Organ]	Органная доза/экспозиционная доза, $(\text{Гр} \times \text{Р}^{-1}) \cdot 10^{-2}$ [Organ dose/exposure, $(\text{Gy} \cdot \text{R}^{-1}) \cdot 10^{-2}$]	
	Настоящая работа (расчет) [Present work, calc.]	Е. Thomasz et. Al. [22] (эксперимент/расчет) [measured/calculated]
Щитовидная железа [Thyroid]	1,76	1,71/1,57
Яичники [Ovaries]	0,88	0,78/0,84
Легкие [Lungs]	1,29	1,28/1,01
Мужские гонады [Testes]	1,70	1,79/1,42

Относительное различие (Δ) между результатами расчета средних органных доз ($D_{\text{расч}}$) и их измерениями ($D_{\text{изм}}$) рассчитывали согласно выражению:

$$\Delta = \frac{(D_{\text{расч}} - D_{\text{изм}})}{D_{\text{изм}}} \cdot 100\% \quad (8)$$

Диапазон разброса значений (Δ) для восьми значений органных доз (рис. 3) составил $\pm 20\%$, с небольшим (+8%) систематическим превышением расчетных результатов над измерениями только в случае излучения источника ^{137}Cs .

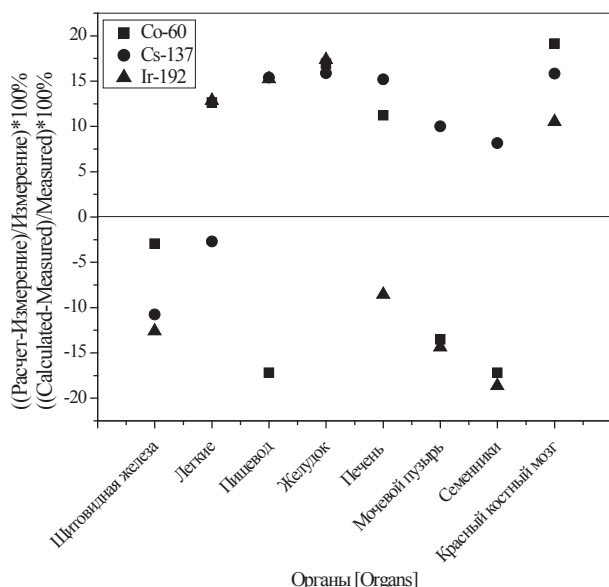


Рис. 3. Разброс отношений значений расчетных и измеренных органных доз при моделировании облучения расчетной модели тела взрослого человека и облучении физического фантома Alderson Rando гамма-излучением точечных источников ^{192}Ir , ^{137}Cs и ^{60}Co , располагавшихся на расстоянии 20 см от передней поверхности фантома

[Fig. 3. The scatter of the ratios of the calculated and measured organ doses at simulating the irradiation of the computational model of an adult's body and the irradiation of a physical Alderson Rando phantom with gamma radiation from point sources ^{192}Ir , ^{137}Cs and ^{60}Co located 20 cm from the front surface of the phantom]

Описание программы «РАДОФАН»

Все составляющие программы «РАДОФАН» объединены в пользовательской оболочке, обеспечивающей простоту и удобство работы. Оболочка программы предоставляет пользователю следующие возможности:

- быстрое создание файла исходных данных для расчетного варианта и запись его в библиотеку исходных данных;
- просмотр библиотеки исходных данных, выбор одного из файлов библиотеки и запуск на счет соответствующего варианта;
- просмотр библиотеки результатов расчета, выбор любого файла из библиотеки, просмотр его содержимого на экране дисплея и вывод на печать всего файла или его части;

Главное меню имеет пять позиций: 1) вариант, 2) запуск, 3) результаты, 4) конфигурация, 5) выход (рис. 4).

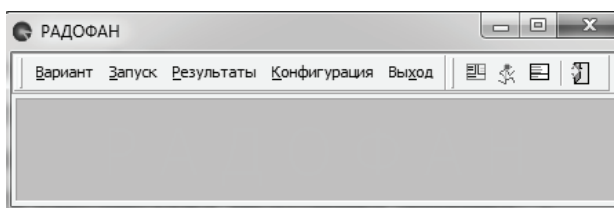


Рис. 4. Главное меню программы РАДОФАН
[Fig. 4. Main menu of the program RADOFAN]

В программе реализован запуск расчетных вариантов из файлов исходных данных, содержащих всю необходимую информацию и имеющих стандартизованную структуру. Подготовка таких файлов проводится в режиме диалога под управлением пользовательской оболочки в меню подготовки варианта расчета (рис. 5), после чего они помещаются в библиотеку исходных данных.

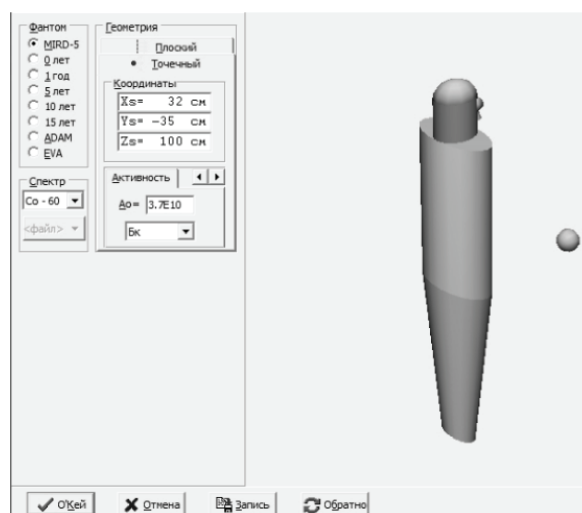


Рис. 5. Меню подготовки варианта расчета
[Fig. 5. Menu for the preparation of the calculation]

При выборе этой позиции главного меню пользователь попадает в меню задания исходных данных к расчетному варианту, включающему следующие позиции:

- выбор фантома;
- выбор геометрии облучения;
- задание координат точечного источника;
- выбор спектра источника;
- задание активности (мощности дозы) источника.

Программа позволяет использовать в расчетах:

- 8 различных расчетных моделей (фантомов), 6 фантомов «MIRD-5» от новорожденного до взрослого и фантомы стандартного взрослого мужчины и женщины – «ADAM» и «EVA»;
- 2 геометрии источника (плоский мононаправленный и точечный изотропный);
- радионуклидные источники и моноэнергетические из числа 9 фиксированных в базовой версии программы – ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir , $E=0,4 \text{ МэВ}$, $E=0,2 \text{ МэВ}$, $E=0,1 \text{ МэВ}$, $E=0,08 \text{ МэВ}$, $E=0,06 \text{ МэВ}$ и $E=0,04 \text{ МэВ}$.

Дополнительно есть возможность ввести произвольный спектр из файла, содержащегося в библиотеке спектров программы.

В стандартной конфигурации программы «РАДОФАН» библиотеке исходных данных отведена отдельная поддиректория «INP». Имена файлов устанавливаются пользователем произвольно, в режиме диалога, и всем им присваивается стандартное расширение «inp». Оболочка позволяет получить перечень имен файлов исходных данных, имеющихся в библиотеке, просмотреть их содержимое и запустить на счет выбранный вариант. Результаты расчетов помещаются в библиотеку расчетных результатов. При этом имя файла совпадает с именем соответствующего файла исходных данных, с расширением «out». В стандартной конфигурации программы этой библиотеке отведена специальная поддиректория «OUT».

Файл результатов расчета состоит из 4 страниц (рис. 6).

Первая страница содержит исходную информацию к варианту, соответствующую текстовой части файла исходных данных, а также дату и время выполнения расчета, продолжительность счета варианта.

Вторая страница содержит таблицу абсолютных и относительных значений средней мощности поглощенной дозы для более чем 20 органов и тканей, а также значения эффективных доз, согласно Публикациям 60 и 103 МКРЗ. Относительные значения мощностей доз соответствуют отношению их абсолютных значений к мощности поглощенной дозы (P_0) в воздухе в точке на оси вертикально стоящего фантома (в его отсутствии) на высоте 1 м от пола.

Третья страница содержит таблицу отношений значений эффективной дозы к показаниям «индивидуальных дозиметров», размещенных в 48 фиксированных точках на поверхности фантома.

Четвертая страница содержит гистограмму распределения мощности поглощенной дозы в красном костном мозге (ККМ), дополненную соответствующей таблицей. В левой колонке таблицы содержатся средние интервальные значения мощностей поглощенной дозы, а в правой – процент массы ККМ, облучаемый в этом интервале.

Такой набор выходных данных в комбинации с быстротой расчета (расчет одного варианта занимает менее 2 с) позволяет проанализировать большое количество ситуаций аварийного или планового облучения персонала и населения. После этого возможно промоделировать всю ситуацию облучения путем суперпозиции отдельных ситуаций облучения, характеризующихся взаимным расположением источника – человек, с весовыми коэффициентами, пропорциональными времени реализации каждой ситуации.

Заключение

Разработан новый метод и компьютерная программа расчета дозиметрических характеристик поля фотонного излучения с энергией от 0,02 до 10 МэВ в расчетных моделях тела человека различного возраста. Метод использует результаты «точного» метода расчета – решения транспортного уравнения Больцмана для конструирования глубинных

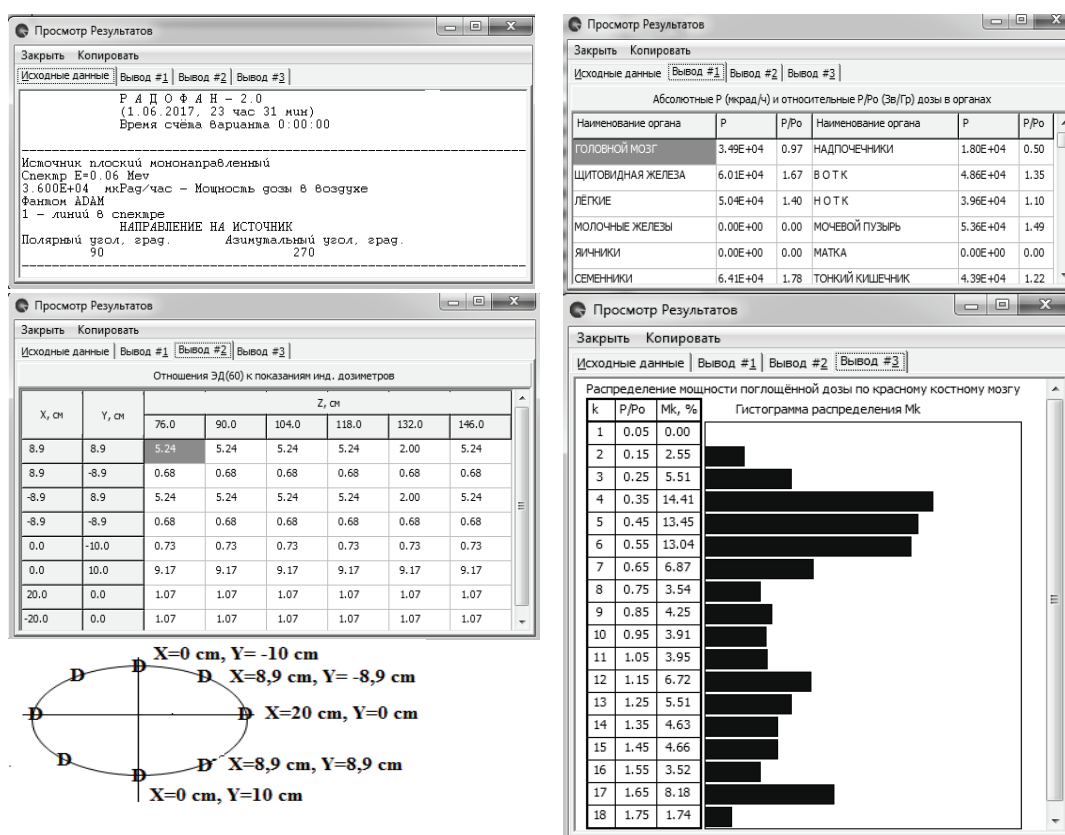


Рис. 6. Меню результатов расчета
[Fig. 6. Menu of calculation results]

кривых ослабления дозы и метод Монте-Карло для выполнения расчетов распределения доз в органах и их средних значений. Такое сочетание позволило получать корректные результаты при минимальном времени счета варианта (как правило, менее 1 с, т.е. практически мгновенно).

Существенным его достоинством является простота задания исходных данных и быстрота выполнения расчетов при сравнимости погрешностей оцениваемых величин с их погрешностями при расчете «точным» методом Монте-Карло. Это обеспечивает возможность его использования в повседневной практике радиационной безопасности:

- для расчета доз внешнего облучения и прогноза степени радиационного поражения в случаях острого аварийного облучения персонала и населения, когда требования быстроты получения информации о дозах облучения пострадавших являются первоочередными;

- при разработке моделей облучения персонала, работающего в полях с резко неравномерным распределением их характеристик по пространству, занимаемому человеком, когда, кроме установления связи между измеряемыми (керма в воздухе, доза, зарегистрированная индивидуальным дозиметром) и оцениваемыми дозиметрическими параметрами (органные дозы, эффективная доза), одним из ключевых моментов является выбор места и количества носимых индивидуальных дозиметров;

- при планировании контрмер при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения территорий (расчет маршрутов и времени пребывания персонала в опасных зонах);

- при обучении и тренинге персонала, участвующего в расследовании и ликвидации последствий радиационных аварий.

Литература

- ICRP, 1996b. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3/4).
- ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2–5).
- Jones, T. D. CHORD Operators for Cell-Survival Models and Insult Assessment to Active Bone Marrow. Rad. Res. 71, 260 – 283 (1977).
- Бергельсон, Р. Многогрупповой метод расчета защиты от нейтронов / Р. Бергельсон, А.П. Суворов, Б.З. Торлин. – Москва: Атомиздат, 1970. – 269 с.
- Николаев, М.Н. Многогрупповое приближение в теории переноса нейтронов / М.Н. Николаев и др. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 256 с.
- Ritts, J., Solomito, E., Stevens, P. Calculations of Neutron Fluence to Kerma Factors for Human Body. Nuclear Application Technology 7, 89–95 (1969).
- Голиков, В.Ю. Распределение поглощенной дозы фотонов в фантоме человека / В.Ю. Голиков, А.Н. Барковский, И.А. Лихтарев // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67, Вып. 6. – С. 396–399.
- ICRU. Radiation Quantities and Units. Report No. 33. Washington, DC: International Commission on Radiation Units and Measurements. (1980).
- King, S. D. and Spiers, F. W. Photoelectric enhancement of the absorbed dose from X-rays to human bone marrow. Experiment and theoretical studies. Br J Radiol, 58, 345–356 (1985).
- Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Fisher HL, Jr. Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRD Pamphlet No. 5. New York: Society of Nuclear Medicine; 1969.
- Snyder WS, Ford MR, Warner GG. Estimates of specific absorbed fractions for photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRD Pamphlet No. 5 (Revised). New York: Society of Nuclear Medicine; 1978.
- Cristy, M. Mathematical phantoms representing children of various ages for use in estimates of internal dose. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/NUREG/TM-367 (1980).
- Eun Young Han, Wesley E. Bolch, and Keith F. Eckerman. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema.
- International Commission of Radiological Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann ICRP 32 (3–4) (2002).
- ICRU, 1992. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
- Kramer, R., Zankl, M., Williams, G. and Drexler, G. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods. Part I: The male (ADAM) and female (EVA) adult mathematical phantoms. GSF-Report S-885, Institut für Strahlenschutz, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg-München (1982).
- ICRP (1975). International Commission on Radiological Protection, Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publication 23 (Pergamon Press, Oxford).
- ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
- ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
- X-5 Monte Carlo Team, “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5,” LA-UR-03-1987 (Vol 1: Overview and Theory), LA-CP-03-0245 (Vol 11: User’s Guide), LA-CP-03-0284 (Vol 111: Developer’s Guide) (April, 2003).
- Los Alamos National Laboratory. “MCNP 5: Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Version 1.40.” Contributed by Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, (2004).
- Thomasz E., Eckerl H., Drexler G. Experimental determination of conversion factors between organ doses and measured quantities for external photon irradiation. Health Physics, 1985, v. 49, p. 897–905.
- Alderson, S. W., Lanzl, L. H., Rollins, M., Spira, I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans. American Journal of Roentgenology, 87:185 (1962).
- ООО «Уралприбор». Дозиметры и детекторы: <http://akidk.ru> (дата обращения: 25.01.2019).
- Golikov, V. Yu., Nikitin, V.V. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements. Health Phys, 56 (1), 111–115 (1989).
- V. Golikov, A. Barkovsky, E. Wallström, Å. Cederblad. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. Radiation Protection Dosimetry, Volume 178, Issue 2, 1 January 2018, p. 223–234.

Поступила: 28.01.2019 г.

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

Для цитирования: Голиков В.Ю. Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 2 – С. 55-65. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-55-65

Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body

Vladislav Yu. Golikov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The current study is focused on the development of the method of the calculation of the dose quantities required for the assessment or limitation of the ionizing exposure (mean organ doses, effective dose, distribution of the absorbed dose in the critical organ) based on the measured characteristics of the fields of the photon computational (kerma free-in-air, readings of the individual dosimeters) with the energy of 0,02-10 mEv. The dedicated software was developed based on the results of the study, allowing estimating the values of more than 20 mean organ doses, effective dose and the distribution of the absorbed dose in the red bone marrow in 8 computational children and adult models. Additionally, it is possible to calculate the ratios of the effective dose to the readings of the "individual dosimeters", placed in 48 fixed points on the phantom surface. The developed method and software can be used for: (1) calculation of the doses from external exposure and estimation of the level of the radiation injuries in case of the acute radiation exposure of the staff and public; (2) development of the models of the exposure of the staff working in the radiation fields with non-uniform distribution of their characteristics; (3) planning of the countermeasures for the remediation of the consequences of the radioactive contamination (calculation of the routes and working time in contaminated zones); (4) education and training of the staff participating in the investigation and remediation of the consequences of the radioactive contamination.

Key words: External exposure, computational models, dose calculation, organ doses, effective dose, anthropomorphic phantoms.

References

1. ICRP, 1996b. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3/4).
2. ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2–5).
3. Jones, T. D. CHORD Operators for Cell-Survival Models and Insult Assessment to Active Bone Marrow. Rad. Res. 71, 260 – 283 (1977).
4. Bergelson, R., Suvorov, A. P., and Torlin, B. Z. Multi-Group Methods for Calculation of Protection from Neutrons. Moscow, Russia: Atomizdat (1970). (In Russian)
5. Nikolaev, M.N., Ryazanov, B.G., Savoskin, M.M. and Tsybulya A.M. Multigroup approximation in the theory of neutrons transfer. Moscow, Energoatomizdat, 256 pp. (1984). (In Russian)
6. Ritts, J., Solomito, E, Stevens, P. Calculations of Neutron Fluence to Kerma Factors for Human Body. Nuclear Application Technology 7, 89–95 (1969).
7. Golikov, V.Yu., Barkovsky, A.N., Likhtarev, I.A. Distribution of the absorbed photon dose in a human phantom. Atomnaya Energiya = Atomic Energy, 1989, Vol. 67, No. 6, pp. 396-399. (In Russian)
8. ICRU. Radiation Quantities and Units. Report No. 33. Washington, DC: International Commission on Radiation Units and Measurements. (1980).
9. King, S. D. and Spiers, F. W. Photoelectric enhancement of the absorbed dose from X-rays to human bone marrow. Experiment and theoretical studies. Br J Radiol, 58, 345-356 (1985).
10. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Fisher HL, Jr. Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRD Pamphlet No. 5. New York: Society of Nuclear Medicine; 1969.
11. Snyder WS, Ford MR, Warner GG. Estimates of specific absorbed fractions for photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRD Pamphlet No. 5 (Revised). New York: Society of Nuclear Medicine; 1978.

Vladislav Yu. Golikov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru

12. Cristy, M. Mathematical phantoms representing children of various ages for use in estimates of internal dose. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/NUREG/TM-367 (1980).
13. Eun Young Han, Wesley E. Bolch, and Keith F. Eckerman. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema.
14. International Commission of Radiological Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann ICRP 32 (3–4) (2002).
15. ICRU, 1992. Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues. ICRU Report 46. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
16. Kramer, R., Zankl, M., Williams, G. and Drexler, G. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods. Part I: The male (ADAM) and female (EVA) adult mathematical phantoms. GSF-Report S-885, Institut für Strahlenschutz, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg-München (1982).
17. ICRP (1975). International Commission on Radiological Protection, Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publication 23 (Pergamon Press, Oxford).
18. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21(1–3).
19. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
20. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5," LA-UR-03-1987 (Vol 1: Overview and Theory), LA-CP-03-0245 (Vol 11: User's Guide), LA-CP-03-0284 (Vol 111: Developer's Guide) (April, 2003).
21. Los Alamos National Laboratory. "MCNP 5: Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Version 1.40." Contributed by Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, (2004).
22. Thomasz E., Eckerl H., Drexler G. Experimental determination of conversion factors between organ doses and measured quantities for external photon irradiation. Health Physics, 1985, v.49, p.897-905.
23. Alderson, S. W., Lanzl, L. H., Rollins, M., Spira, I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans. American Journal of Roentgenology, 87:185 (1962).
24. «Uralpribor». Available from: <http://akidk.ru> (Accessed: 25.01.2019) (In Russian)
25. Golikov, V. Yu., Nikitin, V.V. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements. Health Phys, 56 (1), 111-115 (1989).
26. Golikov, V., Barkovsky, A., Wallström, E., Cederblad, Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. Radiation Protection Dosimetry, Volume 178, Issue 2, 1 January 2018, p. 223-234.

Received: January 28, 2019

For correspondence: Vladislav Yu. Golikov – Senior Researcher of the Medical Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru)

For citation: Golikov V.Yu. Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 55-65. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-55-65

Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов

М.О. Дёгтева¹, Е.А. Шишкина^{1,2}, Е.И. Толстых¹, В.И. Заляпин³, П.А. Шарагин¹, М.А. Смит⁴,
Б.А. Напье⁴

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

⁴ Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Ричланд, США

Цель исследования: разработка модели скелета для оценки дозы на красный костный мозг от остеотропных бета-излучающих радионуклидов. В настоящей статье представлено описание методологии моделирования, в которой учитывается индивидуальная вариабельность макро- и микроструктуры костной ткани. Материалы и методы: предлагается моделировать участки скелета с активным гемопоэзом путём их разбиения на небольшие сегменты, описываемые простыми геометрическими фигурами. Заполняющая сегменты спонгиоза моделируется как изотропная (пространственно-однородная) трёхмерная решётка (каркас) из стержнеобразных трабекул, «пронизывающих» костный мозг. В процессе моделирования каркас деформируется путём случайного изменения положений узлов решётки, также меняются и толщины стержней. Параметры модельной решётки выбираются в соответствии с параметрами микроструктуры спонгиоза, взятыми из литературы. Стохастическое моделирование транспорта излучений в гетерогенных средах, имитирующих распределение костной ткани и костного мозга внутри каждого из сегментов, осуществляется методом Монте-Карло. В качестве примера показаны результаты расчетов для поясничного позвонка. Сгенерированная модель позвонка позволила получить дозиметрические характеристики облучения костного мозга, значения которых сопоставимы с результатами расчетов по модели МКРЗ, основанной на данных микроизображений костных структур. Впервые были оценены доверительные интервалы дозиметрических характеристик, связанные с индивидуальной изменчивостью строения кости. Разработанная методология для расчета поглощенных в костном мозге доз от остеотропных радионуклидов не требует дополнительных исследований аутопсийного материала. Полученные результаты будут использованы для расчета индивидуальных доз в когорте облучённых жителей прибрежных сёл реки Теча, загрязнённой в результате сбросов жидких радиоактивных отходов производственным объединением «Маяк».

Ключевые слова: вычислительные фантомы, внутреннее облучение, остеотропные радионуклиды, красный костный мозг, стронций-90.

Введение

Радиационное воздействие на красный костный мозг (ККМ), который является одной из наиболее радиочувствительных тканей тела человека, увеличивает риск развития лейкозов и других гематологических и иммунных заболеваний. Надежные и точные оценки дозы облучения ККМ необходимы в практике радиационной защиты и радиационной медицины. Для реконструкции доз внутреннего облучения населения от глобального загрязнения биосферы долгоживущим ⁹⁰Sr, а также для прогноза доз у пациентов при использовании радиофармпрепаратов, в состав которых входит ⁸⁹Sr, необходимы адекватные дозиметрические модели.

Цель исследования – разработка модели скелета для оценки дозы в ККМ от остеотропных бета-излучающих радионуклидов. В настоящей статье представлено описание методологии моделирования участков скелета с активным гемопоэзом, с учетом индивидуальной вариабельности макро- и микроструктуры костной ткани.

Вычислительные фантомы скелета, используемые МКРЗ

Дозиметрия костной ткани, особенно в случаях внутреннего облучения, является одной из наиболее сложных задач, поскольку ККМ расположен внутри трабекулярной кости в небольших полостях, которые имеют неправильную геометрическую форму [1, 2]. Размеры полостей раз-

Дёгтева Марина Олеговна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства

Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского д. 68а. E-mail: marina@urcrm.ru

личаются для разных частей скелета, а также меняются с возрастом человека. Совокупность трабекулярной кости и мягких тканей, находящихся в её полостях, в фантомах МКРЗ называют термином «спонгиоза» (spongiosa) [3]. Участки спонгиозы снаружи покрыты слоем кортикальной кости. Радионуклиды стронция инкорпорируются в объёме трабекулярной и кортикальной кости, а излучаемые ими бета-частицы облучают клетки ККМ.

Для расчета доз в современной практике радиационной защиты используются так называемые воксельные фантомы (voxel phantoms) [3], в которых геометрическое строение скелета взрослых мужчины и женщины моделируют как совокупность 200–400 тысяч вокселей (прямоугольных параллелепипедов) объемом 15–30 мм³ с линейными размерами от 1,8 до 8 мм. В настоящее время для улучшения разрешающей способности геометрических моделей (до нескольких мкм) воксельные фантомы МКРЗ преобразуют в полигонально-сеточный формат (Polygon-Mesh или PM) [4, 5]. В PM-формате поверхности всех органов представлены в виде набора состыкованных плоских многоугольников (полигонов). Другими словами, поверхность каждого органа описывается сетчатой структурой, ячейками которой являются многоугольники неправильной формы, стороны которых имеют разную длину. Очевидно, что для представления геометрии сложных объектов необходимо большое количество полигонов, и PM-модели для описания скелета взрослых мужчины и женщины включают 605 и 865 тысяч значений длин сторон многоугольников соответственно [4]. Разрешающие способности PM-метода позволили отсепарировать тонкий слой хрящевой ткани, который ранее был включён в модель спонгиозы воксельного фантома мужчины [3], при этом значения массы спонгиозы в PM-модели уменьшились на 14% для поясничных позвонков, на 21% для рёбер и на 18% для бедра по сравнению с воксельным фантомом [5].

Геометрические модели скелета из Публикации 133 МКРЗ [6] основаны на данных работы [7] и относятся к так называемым гибридным (hybrid) фантомам, при создании которых используют и воксельный, и PM-формат. В работе [7] для создания фантома был детально исследован скелет взрослого мужчины 40 лет. Исследование включало компьютерно-томографические (КТ) снимки всего тела, ex-vivo КТ-снимки 38 образцов костей, а также исследование микроструктуры спонгиозы из разных участков скелета методами компьютерной микротомографии (микро-КТ) и спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Анализ изображений включал их описание в PM-формате с последующей вокселизацией. Размеры вокселей были выбраны в диапазоне 100–1000 мкм, в зависимости от толщины кортикальной кости, которая у обследованного мужчины варьировала от 450 до 4300 мкм.

Для моделирования переноса излучения и оценки энергии, поглощённой в ККМ, авторами статьи [7] использовался метод PIRT (Paired-Image Radiation Transport), реализованный на основе программного пакета EGSnrc и впервые описанный в работе [8]. Метод PIRT позволяет отслеживать транспорт электронов с различными начальными энергиями внутри вычислительного фантома, построенного на комбинации данных макро- и микроизображений.

Очевидно, что описанные геометрические модели скелета обладают высокой реалистичностью. Однако мо-

дели, построенные на основе изображений, не являются параметрическими. Это не позволяет оценить неопределенность, связанную с индивидуальной вариабельностью структуры костной ткани, без дополнительных исследований аутопсийного материала. Вопрос о репрезентативности параметров скелета, исследованного в работе [7], остается открытым. Фантомы МКРЗ, описанные в работе [6], жёстко привязаны по микропараметрам к структуре спонгиозы из работы [7], а по массам костей – к Условному человеку МКРЗ [3]. Использование экспертных оценок, принятых МКРЗ для Условного человека, не позволяет оценить неопределенность дозы применительно к конкретному индивидууму.

Предпосылки к разработке дозиметрической модели скелета

Параметрическое описание костных структур

Важной предпосылкой к созданию нового подхода к моделированию скелета стало большое количество появившихся в литературе данных о микроструктуре и размерах отдельных костей, которые можно использовать для параметризации моделей.

Согласно стандартизированной номенклатуре для гистоморфометрии кости [9], основными параметрами для описания костных структур являются:

Tb.Th – средняя толщина трабекул (мм);

Tb.Sp – среднее расстояние между трабекулами (мм);

Ct.Th – средняя толщина кортикального слоя (мм);

BV/TV – доля объёма минерализованной кости от общего объёма спонгиозы (%).

Рисунок 1 иллюстрирует гистоморфометрическую методику оценки параметров *Tb.Th* и *Tb.Sp* по трехмерному микро-КТ-изображению спонгиозы [10].

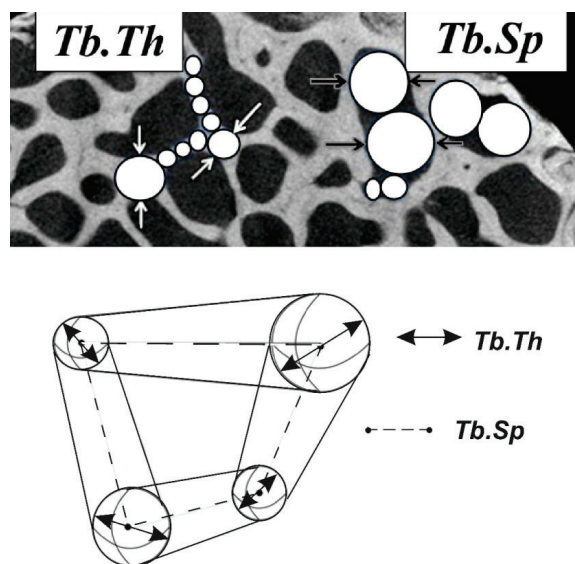


Рис. 1. На верхней панели представлен принцип определения *Tb.Th* и *Tb.Sp* по микро-КТ-изображению. На нижней панели параметры схематически показаны на примере четырёх соединённых между собой трабекул

[Fig. 1.] The top panel presents the principle of determining *Tb.Th* and *Tb.Sp* by micro-CT image. On the bottom panel, the parameters are schematically shown by the example of four interconnected trabeculae]

Как видно из рисунка 1, значение $Tb.Th$ рассчитывается как средний диаметр сфер, вписанных в изображение трабекул [10]. Аналогично для сфер, вписанных в костномозговые полости, рассчитывается значение $Tb.Sp$. В таблице 1 приведены примеры оценок морфометрических параметров для поясничных позвонков взрослого мужчины по данным разных авторов.

Как видно из таблицы 1, параметры микроструктуры кости имеют значительную вариабельность, при этом значения $Tb.Sp$, $Ct.Th$ и BV/TV из работы [7] отличаются от данных всех остальных авторов.

Новые данные о распределении красного костного мозга по отделам скелета

Красный костный мозг взрослого человека распределён по 12 участкам скелета, называемых в настоящей работе костными сайтами (табл. 2).

Референтные оценки распределения активного костного мозга из Публикации 110 МКРЗ [3] были сделаны на основе данных Mechanik (1926) [17], полученных из патолого-анатомических исследований 13 скелетов. Современные методы позволили получить прижизненную картину реального распределения пролиферативной активности костного мозга на больших по численности выборках. В работе [18] представлены результаты обследований 51 пациента в возрасте 31–87 лет, заболевания и методы лечения которых не оказывали влияния на распределение ККМ. Был использован метод позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) в сочетании с КТ. Для определения участков активного костного мозга использовали меченный фтором-18 аналог тимидина (FLT). Метод основан на том, что FLT включается в синтез новой ДНК во время пролиферации клеток. Таким образом, метод FLT-ПЭТ дает возможность прижизненно выявить

Таблица 1

Оценки параметров микроструктуры поясничных позвонков взрослого мужчины по данным разных авторов (средние и стандартные отклонения)

[Table 1]

Estimates of the microstructure parameters of the lumbar vertebrae of an adult male according to different authors (means and standard deviations)

Ссылка [Reference]	Число обследованных [Number of subjects]	$Tb.Th$, мм [mm]	$Tb.Sp$, мм [mm]	$Ct.Th$, мм [mm]	BV/TV , %
[11]	14	0,14±0,01	0,57±0,12	–	21±5
[12]	9	0,12±0,01	0,72±0,08	–	16±2
[13]	30	0,23±0,02	0,54±0,13	–	29±5
[14]	27	0,09±0,03	–	0,52±0,27	–
[15]	26	–	–	0,29±0,02	–
[16]	4	–	–	0,49±0,05	–
[7]	1	0,19	1,71	0,97	9,1

Таблица 2

Распределение ККМ в скелете взрослого человека (% от суммарной массы ККМ) по данным [3] и прижизненным измерениям методом FLT-ПЭТ (средние и стандартные отклонения) [18]

[Table 2]

Distribution of active marrow in the adult human skeleton (% of the total active marrow mass) according to [3] and in vivo measurements using the FLT-PET method (means and standard deviations) [18]

Отдел скелета [Bone site]	% от суммарной массы ККМ [% of the total active marrow mass]	
	[3]	[18]
Череп и нижняя челюсть [Cranium and mandible]	8,4	6,2±2,3
Шейные позвонки [Cervical vertebrae]	3,9	3,5±1,0
Грудные позвонки [Thoracic vertebrae]	16,1	17,5±2,4
Поясничные позвонки [Lumbar vertebrae]	12,3	15,5±2,5
Грудина [Sternum]	3,1	1,8±0,7
Кости таза [Pelvic bones]	17,5	23,2±3,0
Крестец [Sacrum]	9,9	7,4±1,8
Бедренные кости (верхняя часть) [Femora (upper half)]	6,7	5,9±2,5
Плечевые кости (верхняя часть) [Humeri (upper half)]	2,3	3,6±1,9
Лопатки, ключицы и ребра [Scapulae, clavicles and ribs]	19,7	15,3±2,6

участки с выраженной пролиферацией и оценить вариабельность пролиферативной активности в отдельных гемопозитических сайтах. Сравнение старых и новых данных по распределению ККМ по отделам скелета показано в таблице 2. Как видно из таблицы 2, доли ККМ, расположенного в костях таза, поясничных позвонках, лопатках, ключицах и рёбрах, полученные в работе [18], несколько отличаются от значений, принятых МКРЗ [3].

Предлагаемый подход к дозиметрическому моделированию скелета

Для спонгиозы свободные пробеги электронов из спектров излучения $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ и ^{89}Sr могут достигать 1 см. Этот размер соответствует линейным размерам малых костей скелета. Поэтому в вычислительных фантомах необходимо учитывать размеры и форму кости.

Для оценки радиационного воздействия при облучении ККМ необходимо оценить поглощенную дозу в участках скелета с активным гемопозом (см. табл. 2). Расположение этих сайтов у взрослого человека графически показано на рисунке 2. Как видно из рисунка 2, длинные кости конечностей и часть костей черепа содержат только неактивный (жёлтый) костный мозг, поэтому их можно не рассматривать в дозиметрической модели. Таким образом, на моделируемые сайты приходится около 66% общей массы трабекулярной кости и около 30% общей массы кортикальной кости.

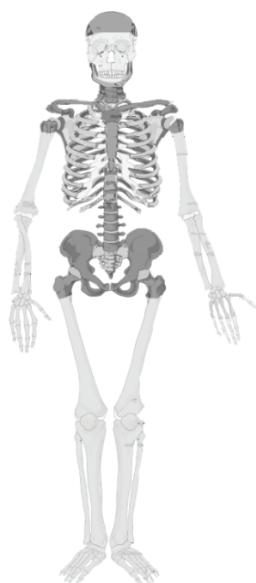


Рис. 2. Расположение участков скелета (сайтов) с активным гемопозом (выделены тёмным цветом) для взрослого человека
[Fig. 2. Location of hematopoietic sites in the skeleton (highlighted in dark color) for an adult]

Предлагаемый нами подход позволяет моделировать костные сайты с активным гемопозом путём их разби-

ения на сегменты, описываемые простыми геометрическими фигурами. Заполняющая сегменты спонгиоза моделируется как изотропная трёхмерная решётка (каркас) из стержнеобразных трабекул, «пронизывающих» костный мозг. В процессе рандомизации¹ имитируются множественные деформации каркаса путём изменения положений узлов решётки, а также меняются толщины стержней. Параметры модельной решётки выбираются в соответствии с общепринятыми параметрами микроструктуры спонгиозы [9].

Сегментирование костных сайтов и оценка параметров сегментов

Разбиение моделируемых костных сайтов на сегменты, форму которых можно описать простыми геометрическими фигурами, позволяет для их математического описания использовать аналитические выражения. Каждый сегмент имеет однородную микроструктуру со специфичными сегменту значениями параметров $Tb.Th$, $Tb.Sp$ и BV/TV . Слой кортикальной кости толщиной $Ct.Th$ покрывает наружные поверхности спонгиозы, не прилегающие к соседним сегментам. В соответствии с параметром $Tb.Th$ для каждого сегмента выбирается воксельное разрешение ($\leq 1/2Tb.Th$).

На рисунке 3 показаны результаты сегментирования на примере поясничных позвонков взрослого мужчины. Как видно из рисунка 3, позвонок имеет сложную анато-

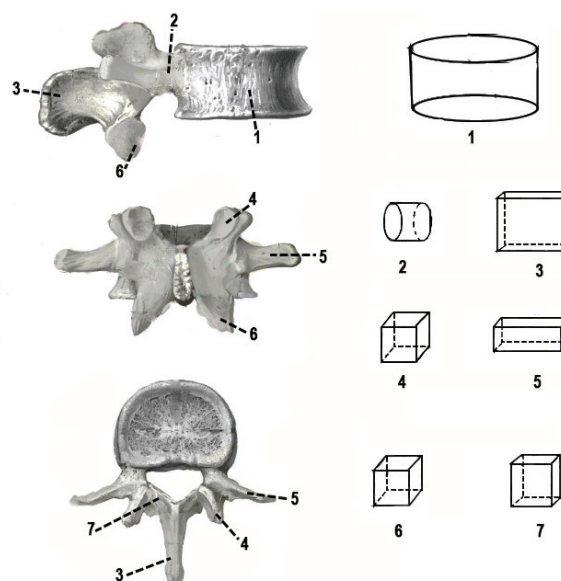


Рис. 3. Анатомическая форма поясничного позвонка (вид сбоку, сзади и сверху) и костные сегменты, принятые для моделирования: тело (1); ножка (2); дуга (3); остистый отросток (4), поперечный отросток (5), верхний (6) и нижний (7) суставной отростки

[Fig. 3. The anatomical shape of the lumbar vertebra (lateral, posterior and superior view) and bone segments taken for modeling: body (1); pedicle (2); lamina (3); spinous process (4), transverse process (5), superior (6) and inferior (7) articular process]

¹ Рандомизация – статистический прием, заключающийся в преобразовании исходных данных для того, чтобы имитировать случайные величины в соответствии с заданным законом распределения.

мическую форму и состоит из тела позвонка (corpus) и позвоночной дуги (arcus), соединённых двумя ножками (pedunculi). На позвоночной дуге имеется один большой и шесть маленьких отростков (processus). Для целей дозиметрии сложная форма позвонка может быть описана набором из трёх цилиндрических сегментов и девяти прямоугольных параллелепипедов [19]. Таблица 3 показывает средние значения размеров сегментов для взрослых мужчин, оцененные по многочисленным литературным данным (например, в каждой из работ по костной морфометрии [20–23] приведены результаты обследований более 100 человек). Индивидуальная вариабельность линейных размеров для разных сегментов поясничного позвонка, оцененная по опубликованным данным, была в диапазоне от 5% до 40%.

Микропараметры спонгиозы внутри позвонка и индивидуальная изменчивость их значений (коэффициенты вариации, CV) были приняты одинаковыми для всех сегментов и составили: $Tb.Th=0,1$ мм (CV=15%); $Tb.Sp=1,0$ мм (CV=20%); $BV/TV=13\%$ (min=9%; max=18%). Толщина кортикального слоя для тела позвонка и отростков составляла $Ct.Th=0,4$ мм (CV=50%), а для дуги и ножек $Ct.Th=1,04$ мм (CV=50%).

Параметрический стохастический генератор моделей сегментов

В работе [24] предложен математический алгоритм для генерации воксельных моделей, имитирующих структуру костных сегментов. Микроструктура спонгиозы моделируется на основе трехмерной решётки (каркаса). Каркас строится на основе параметров модели ($Tb.Th$ и $Tb.Sp$), полученных усреднением литературных данных о микроструктуре соответствующего сегмента кости. Затем каркас деформируется путем рандомизации узлов [24] в соответствии с вероятностным распределением $Tb.Th$ и $Tb.Sp$. На нижней панели рисунка 1 показан фрагмент модели микроструктуры спонгиозы на примере четырех трабекул, соединяющихся в узлах деформированного каркаса. Как видно из рисунка 1, длины рёбер модельной решётки соответствуют параметру $Tb.Sp$, а толщина

стержней – $Tb.Th$. Затем аналитически описанная модель конвертируется в воксельный формат. Кортикальный слой, покрывающий спонгиозу, генерируется в процессе вокселизации. Использование параметрического подхода позволяет генерировать как «средние» модели, так и наборы «случайных» моделей, отражающих индивидуальную изменчивость параметров костей. Индивидуальная вариабельность микропараметров имитируется в предположении о логнормальном распределении, а макропараметры и $Ct.Th$ рандомизируются в соответствии с предположением о нормальном распределении [24].

Математический алгоритм был реализован в компьютерной программе «Trabecula» [25]. Выходные файлы программы имеют формат, совместимый с форматом входных данных программного пакета MCNP, предназначенного для моделирования процесса переноса излучений.

Моделирование переноса излучения и расчёт поглощенной энергии

Стохастическое моделирование транспорта излучений в гетерогенных средах, имитирующих распределение костной ткани и костного мозга внутри каждого из сегментов, производится с использованием программы MCNP6.2. В настоящей работе в качестве примера показаны результаты расчетов для поясничного позвонка. Для моноэнергетических электронов в диапазоне от 50 кэВ до 2 МэВ рассчитывались доли энергии, поглощенные в костном мозге (BM), от источников излучения, равномерно распределённых в объёме трабекулярной (TBV) и кортикальной (CBV) костей: $AF(BM \leftarrow TBV)$ и $AF(BM \leftarrow CBV)$. Расчеты делались в предположении, что клетки активного костного мозга равномерно распределены по объёму костномозговой полости, поэтому рассматривалось среднее поглощение энергии в веществе внутри всей полости. Плотность трабекулярной и кортикальной кости была взята равной $1,9$ г/см³, плотность костного мозга – $0,98$ г/см³. Расчёты были выполнены для средних значений параметров сегментов и для наборов случайных значений, отражающих индивидуальную изменчивость.

Форма и средние значения размеров костных сегментов поясничных позвонков для взрослого мужчины

Таблица 3

[Table 3]

Geometry and average size of bone segments of lumbar vertebrae for an adult male]

Номер сегмента [Segment number]	Название сегмента [Segment name]	Геометрическая форма сегмента [Segment geometry]	Количество сегментов [Number of segments]	Размеры (габариты), мм [Dimensions (size), mm]
1	Тело [Body]	Эллиптический цилиндр	1	35×47×27
2	Ножка [Pedicel]	[Elliptic cylinder]	2	18×12×5
3	Дуга [Lamina]	Прямоугольный	2	12×6×11
4	Отростки: [Processes] – остистый [spinous]	параллелепипед	1	31×6×24
5	– поперечный [transverse]	[Cuboid]	2	23×8×12
6	– верхний суставной [superior articular]		2	15×12×14
7	– нижний суставной [inferior articular]		2	15×5×13

Таким образом, для всех сегментов были оценены средние значения поглощённых фракций и их 90% доверительные интервалы. Результирующее значение для позвонка в целом было получено усреднением поглощённых фракций для отдельных сегментов с весами, соответствующими долям костного мозга, заключённого в каждом из сегментов.

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 показаны энергетические зависимости $AF(BM \leftarrow TBV)$ и $AF(BM \leftarrow CBV)$, рассчитанные для поясничного позвонка взрослого мужчины по предлагаемому нами подходу, в сравнении с результатами из работы [7]. Форма энергетической зависимости в основном определяется двумя эффектами. При низких энергиях часть электронов поглощается внутри кости, не достигая костномозговых полостей. Этот эффект более выражен при больших значениях толщины костных балок и кортикального слоя. Электроны высоких энергий могут вылетать за пределы спонгиозы, что актуально при малых значениях её объёма.

Как видно из левой панели рисунка 4, для источника в трабекулярной кости и энергий, превышающих 0,5 МэВ, значения $AF(BM \leftarrow TBV)$ для фантома из работы [7] попадают в диапазон индивидуальной изменчивости, рассчитанный в настоящей работе. Некоторое различие в кривых в области низких энергий объясняется различием в параметре $Tb.Th$, значение которого в фантоме из работы [7] выше верхней границы диапазона значений из настоящей работы.

На правой панели рисунка 4 показаны энергетические зависимости для источника в кортикальном слое: $AF(BM \leftarrow CBV)$. Как видно из рисунка 4, при низких энергиях кривая из работы [7] лежит ниже доверительной зоны, что объясняется значительной разницей толщины кортикального слоя: 0,42 (0,17–0,81) мм в настоящей работе

против 0,97 мм в работе [7]. При энергиях, превышающих 0,8 МэВ, результаты из работы [7] попадают в диапазон индивидуальной изменчивости, рассчитанный в настоящей работе.

Таким образом, сгенерированная модель позвонка позволила получить дозиметрические характеристики облучения ККМ, значения которых сопоставимы с результатами расчётов по модели из работы [7], основанной на данных микроизображений. Небольшие различия между кривыми логически объясняются разницей значений параметров, которые в работе [7] были оценены на основании исследования только одного скелета, а в настоящей работе – на основании анализа многочисленных литературных данных.

Дозы в ККМ от остеотропных бета-излучателей, таких как ^{89}Sr или $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, должны рассчитываться с учетом спектров излучения (диапазоны энергий 0–1,5 МэВ и 0–2,4 МэВ соответственно). Для практических расчётов доз в работе [25] предлагается использовать так называемые дозовые коэффициенты (DF), которые представляют собой значения мощности дозы в ККМ при единичной концентрации ^{90}Sr или ^{89}Sr в минерализованной кости. Для расчёта DF в программе MCNP задаются не моноэнергетические электроны, а сразу спектры излучения ^{89}Sr или $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. В продолжение настоящего исследования планируется рассчитать значения DF для всех сайтов с активным гемопозом взрослых мужчины и женщины, а затем оценить средние по скелету значения и их неопределённости. Также планируется оценить возрастные зависимости DF . Дозовые коэффициенты имеют прямую связь с половозрастной биокинетической моделью для стронция [26], поскольку выходные данные биокинетической модели представляют собой зависящие от времени концентрации ^{89}Sr и ^{90}Sr в объёмах трабекулярной и кортикальной кости. Сочетание биокинетической и дозиметрической моделей позволит рассчитать коэффициенты,



Рис. 4. Энергетические зависимости поглощённых фракций для поясничного позвонка взрослого мужчины: $AF(BM \leftarrow TBV)$ (слева) и $AF(BM \leftarrow CBV)$ (справа). Заштрихованная область показывает 90% доверительные интервалы, рассчитанные в настоящей работе
[Fig. 4.] Energy dependencies of absorbed fractions for the lumbar vertebra of an adult male: $AF(BM \leftarrow TBV)$ (left) and $AF(BM \leftarrow CBV)$ (right). The shaded area shows the 90% confidence intervals calculated in the current study

отражающие динамику мощности дозы в ККМ после единичного поступления ^{89}Sr и ^{90}Sr .

Полученные таким образом коэффициенты будут использованы для расчёта индивидуальных доз в когорте жителей прибрежных сёл р. Теча, загрязнённой в середине прошлого века в результате сбросов жидких радиоактивных отходов производственным объединением «Маяк» [27]. Для этих людей уровни поступления ^{90}Sr в среднем составляли около 3 млн Бк [28]. Индивидуальные дозы и их неопределённости рассчитываются на основе индивидуальных поступлений ^{90}Sr и других радионуклидов, а также параметров, характеризующих внешнее облучение [29]. Описанный в настоящей статье подход позволит уточнить дозы на ККМ и улучшить оценки их неопределённостей. Многолетние эпидемиологические наблюдения за когортой жителей прибрежных сёл р. Теча выявили избыточные случаи лейкозов, частота которых была связана с дозой на ККМ [30]. В работе [31] был предложен метод уточнения границ доверительных интервалов для коэффициентов риска, оценённых с использованием дозиметрических систем, аналогичных той, которая была разработана для р. Теча [29]. Таким образом, использование метода из работы [31] позволит уточнить достоверность коэффициентов риска развития лейкозов при пролонгированном радиационном воздействии.

Заключение

Была разработана методология моделирования скелета человека, с учетом макро- и микроструктуры костной ткани, предназначенная для расчета поглощенных в костном мозге доз от остеотропных бета-излучающих радионуклидов. Методология не требует дополнительных исследований аутопсийного материала и включает следующие шаги:

1. Определение участков скелета с активным гемопозом и оценка распределения костного мозга по этим участкам (костным сайтам) на основе анализа опубликованных данных.
2. Разбиение каждого из сайтов на отдельные костные сегменты, форму которых можно описать простыми геометрическими фигурами.
3. Оценка макропараметров каждого из сегментов на основе опубликованных данных по морфометрии соответствующих участков костей, а также параметров костной микроструктуры на основе имеющихся в литературе данных микрофотографии и гистоморфометрии.
4. Генерация набора воксельных моделей (фантомов) для каждого сегмента, с параметрами, отражающими индивидуальную вариабельность костных микро- и макроструктур.
5. Стохастическое моделирование переноса электронов в гетерогенных средах, имитирующих распределение костной ткани и костного мозга внутри каждого из сегментов, и оценка дозовых коэффициентов и их неопределённостей для всех сегментов.
6. Расчет на основе разработанных моделей средних по скелету значений дозовых коэффициентов для красного костного мозга от ^{90}Sr и ^{89}Sr , инкорпорированных в объёме минерализованной кости.

Работа была поддержана Федеральным медико-биологическим агентством России и Департаментом

энергетики США в рамках Российско-Американского проекта 1.1. Авторы выражают благодарность д-ру Дереку Джокишу (Derek Jokisch), Университет Фрэнсиса Мэриона, Ок-Ридж, США, за критические замечания и полезные советы.

Литература

1. ICRP, 1995. Basic Anatomical & Physiological Data for Use in Radiological Protection – The Skeleton. ICRP Publication 70. Ann. ICRP 25 (2).
2. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
3. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
4. Kim C.Y., Yeom Y.S., Nguen T.T. [et al.] The reference phantoms: voxel vs polygon. Ann. ICRP. 2016, 45(1S), pp. 188-201.
5. Yeom Y.S., Wang Zh.J., Nguyen T.T. [et al.] Development of skeletal system for mesh-type ICRP reference adult phantoms. Phys. Med. Biol. 2016, 61, pp. 7054-7073.
6. ICRP, 2016. The ICRP computational framework for internal dose assessment for reference adults: specific absorbed fractions. ICRP Publication 133. Ann. ICRP 45(2).
7. Hough M., Johnson P., Rajon D. [et al.] An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male – internal electron sources. Phys. Med. Biol. 2011, 56, pp. 2309-2346.
8. Shah A.P., Bolch W.E., Rajon D.A. [et al.] A paired-image radiation transport model for skeletal dosimetry. J. Nucl. Med. 2005, 46(2), pp. 344-353.
9. Dempster D.W., Compston J.E., Drezner M.K. [et al.] Standardized nomenclature, symbols, and units for bone histomorphometry: a 2012 update of the report of the ASBMR Histomorphometry Nomenclature Committee. J. Bone Miner. Res. 2013, 28(1), pp. 2-17.
10. Hildebrand T., Laib A., Muller R. [et al.] Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: Microstructural data from spine, femur iliac crest and calcaneus. J. Bone Miner. Res. 1999, 14(7), pp. 1167-1174.
11. Beuf O., Newitt D.C., Mosekilde L., Majumdar S. Trabecular structure assessment in lumbar vertebrae specimens using quantitative magnetic resonance imaging and relationship with mechanical competence. J. Bone Miner. Res. 2001, 16(8), pp. 1511-1519.
12. Chen H., Shoumura S., Emura S., Bunai Y. Regional variations of vertebral trabecular bone microstructure with age and gender. Osteoporos. Int. 2008, 19(10), pp. 1473-1483.
13. Hans D., Barthe N., Boutroy S. [et al.] Correlations between trabecular bone score, measured using anteroposterior dual-energy X-ray absorptiometry acquisition, and 3-dimensional parameters of bone microarchitecture: an experimental study on human cadaver vertebrae. J. Clin. Densitom. 2011, 14(3), pp. 302-312.
14. Fazzalari N.L., Parkinson I.H., Fogg Q.A., Sutton-Smith P. Antero-postero differences in cortical thickness and cortical porosity of T12 to L5 vertebral bodies. Joint Bone Spine. 2006, 73(3), pp. 293-297.
15. Ritzel H., Amling M., P. S. M. [et al.] The thickness of human vertebral cortical bone and its changes in aging and osteoporosis: a histomorphometric analysis of the complete spinal column from thirty-seven autopsy specimens. J. Bone Miner. Res. 1997, 12(1), pp. 89-95.
16. Moussa M. Comparative study of the static histomorphometry and marrow content of human vertebral and iliac crest trabecular bone. J. Histo. Egypt. 2008, 31(2), pp. 290-300.
17. Woodard H.Q., Holodny E. A summary of the data of Mechanik on the distribution of human bone marrow. Phys. Med. Biol. 1960, 5, pp. 57-59.

18. Campbell B.A., Callahan J., Bressel M. [et al.] Distribution atlas of proliferating bone marrow in non-small cell lung cancer patients measured by FLT-PET/CT imaging, with potential applicability in radiation therapy planning. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2015, 92(5), pp. 1035–1043.
19. Sharagin P.A., Shishkina E.A., Tolstykh E.I. [et al.] Segmentation of hematopoietic sites of human skeleton for calculations of dose to active marrow exposed to bone-seeking radionuclides. In: *RAD Conference Proceedings*, 2018, vol. 3, pp. 154–158, DOI:10.21175/RadProc.2018.33.
20. Aylott C.E., Puna R., Robertson P.A., Walker C. Spinous process morphology: the effect of ageing through adulthood on spinous process size and relationship to sagittal alignment. *Eur. Spine J.* 2012, 21(5), pp. 1007–1012.
21. Bhaumik M., Bapna N., Bhaumik U., Prabhakaran K. Study of transverse and sagittal diameter of lumbar pedicles in relation to transpedicular screw fixation using MRI in Rajasthan population. *International Journal of Anatomy and Research*. 2013, 5(21), pp. 50–55.
22. Gilad I., Nissan M. Sagittal evaluation of elemental geometrical dimensions of human vertebrae. *Journal of Anatomy*. 1985, 143, pp. 115–120.
23. Kömürçü E., Kaymaz B., Adam G. [et al.] Safety and feasibility of lumbar spine for intralaminar screw fixation: a computed tomography-based morphometric study. *Acta Orthop. Traumatol. Turc.* 2015, 49(5), pp. 522–529.
24. Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S., Shishkina E.A. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2018, 11(2), pp. 44–57.
25. Shishkina E.A., Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S. [et al.] Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton. *Radiation & Applications*. 2018, 3(2), pp. 133–137.
26. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. [et al.] Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *J. Radiol. Prot.* 2015, 35(1), pp. 87–127.
27. Дёгтева, М.О. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 годах / М.О. Дёгтева, Н.Б. Шагина, М.И. Воробьёва [и др.] // *Радиационная биология. Радиоэкология*. – 2016. – Т.56, №5, – С. 523–534.
28. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Phys.* 2011, 101(1), pp. 28–47.
29. Напье, Б.А. Анализ неопределенностей в дозиметрической системе реки Теча / Б.А. Напье, М.О. Дёгтева, Н.Б. Шагина, Л.Р. Анспо // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2013. – Т. 58, № 1, – С. 5–28.
30. Krestinina L.Y., Davis F.G., Schonfeld S. [et al.] Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *Brit. J. Cancer*. 2013, 109, pp. 2886–2893.
31. Zhang Zh., Preston D.L., Sokolnikov M. [et al.] Excess relative risk models using Monte Carlo dosimetry systems with shared errors. *PLoS ONE*. 2017, 12(4): e0174641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174641>.

Поступила: 12.03.2019 г.

Дёгтева Марина Олеговна – кандидат технических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России.
Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского д. 68а. E-mail: marina@urcrm.ru

Шишкина Елена Анатольевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, старший преподаватель Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

Заляпин Владимир Ильич – кандидат физико-математических наук, профессор Южно-Уральского государственного университета, Челябинск, Россия

Шарагин Павел Алексеевич – младший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

Смит Майкл Алан – инженер, Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Ричланд, США

Напье Брюс Алан – ведущий специалист, Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория, Ричланд, США

Для цитирования: Дёгтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Заляпин В.И., Шарагин П.А., Смит М.А., Напье Б.А. Методологический подход к разработке дозиметрических моделей скелета человека для бета-излучающих радионуклидов // *Радиационная гигиена*. – 2019. – Т.12, № 2 – С. 66–75.
DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-66-75

Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides

Marina O. Degteva¹, Elena A. Shishkina^{1,2}, Evgenia I. Tolstykh¹, Vladimir I. Zalyapin³, Pavel A. Sharagin¹, Michael A. Smith⁴, Bruce A. Napier⁴

¹Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

³South Urals State University, Chelyabinsk, Russia

⁴Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA

Objective of the study: to develop a skeleton model for assessing red bone marrow dose from osteotropic beta-emitting radionuclides. This article describes the modeling methodology which takes into account the individual variability of the macro- and microstructure of bone tissue. Materials and methods: it is proposed to model bone sites with active hematopoiesis by dividing them into small segments described by simple geometric shapes. Spongiosa, which fills the segments, is modeled as an isotropic three-dimensional grid (carcass) of rod-like trabeculae that "run through" the bone marrow. In the process of randomization, multiple carcass deformations are simulated by changing the positions of the grid nodes and the thickness of the rods. Model grid parameters are selected in accordance with the parameters of spongiosa microstructures taken from the published papers. Stochastic modeling of radiation transport in heterogeneous environments simulating distribution of bone tissue and marrow in each of the segments is performed by Monte Carlo method. The model output for the lumbar vertebra is given as an example. The generated vertebral model allowed us to obtain the dosimetric characteristics of bone marrow irradiation, which are comparable to the results obtained with ICRP model developed based on the data of micro-images of bone structures. For the first time ever confidence intervals of dosimetric characteristics associated with individual variability of bone structure were evaluated. The developed methodology for the calculation of doses absorbed in the bone marrow from osteotropic radionuclides does not require additional studies of autopsy material. The obtained results will be used to calculate individual doses in a cohort of Techa riverside residents who were exposed due to Techa River contamination as a result of liquid radioactive waste discharges by the Mayak Production Association.

Key words: computational phantoms, internal exposure, osteotropic radionuclides, red bone marrow, strontium-90.

References

1. ICRP, 1995. Basic Anatomical & Physiological Data for Use in Radiological Protection – The Skeleton. ICRP Publication 70. Ann. ICRP 25 (2).
2. ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP 32(3-4).
3. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
4. Kim C.Y., Yeom Y.S., Nguen T.T. [et al.] The reference phantoms: voxel vs polygon. Ann. ICRP. 2016, 45(1S), pp. 188-201.
5. Yeom Y.S., Wang Zh.J., Nguyen T.T. [et al.] Development of skeletal system for mesh-type ICRP reference adult phantoms. Phys. Med. Biol. 2016, 61, pp. 7054-7073.
6. ICRP, 2016. The ICRP computational framework for internal dose assessment for reference adults: specific absorbed fractions. ICRP Publication 133. Ann. ICRP 45(2).
7. Hough M., Johnson P., Rajon D. [et al.] An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference adult male – internal electron sources. Phys. Med. Biol. 2011, 56, pp. 2309-2346.
8. Shah A.P., Bolch W.E., Rajon D.A. [et al.] A paired-image radiation transport model for skeletal dosimetry. J. Nucl. Med. 2005, 46(2), pp. 344-353.
9. Dempster D.W., Compston J.E., Drezner M.K. [et al.] Standardized nomenclature, symbols, and units for bone histomorphometry: a 2012 update of the report of the ASBMR Histomorphometry Nomenclature Committee. J. Bone Miner. Res. 2013, 28(1), pp. 2-17.
10. Hildebrand T., Laib A., Muller R. [et al.] Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: Microstructural data from spine, femur iliac crest and calcaneus. J. Bone Miner. Res. 1999, 14(7), pp. 1167-1174.
11. Beuf O., Newitt D.C., Mosekilde L., Majumdar S. Trabecular structure assessment in lumbar vertebrae specimens using quantitative magnetic resonance imaging and relationship with mechanical competence. J. Bone Miner. Res. 2001, 16(8), pp. 1511-1519.
12. Chen H., Shoumura S., Emura S., Bunai Y. Regional variations of vertebral trabecular bone microstructure with age and gender. Osteoporos. Int. 2008, 19(10), pp. 1473-1483.
13. Hans D., Barthe N., Boutroy S. [et al.] Correlations between trabecular bone score, measured using anteroposterior dual-energy X-ray absorptiometry acquisition, and 3-dimensional parameters of bone microarchitecture: an experimental study on human cadaver vertebrae. J. Clin. Densitom. 2011, 14(3), pp. 302-312.
14. Fazzalari N.L., Parkinson I.H., Fogg Q.A., Sutton-Smith P. Antero-postero differences in cortical thickness and cortical porosity of T12 to L5 vertebral bodies. Joint Bone Spine. 2006, 73(3), pp. 293-297.
15. Ritzel H., Amling M., Pösl M. [et al.] The thickness of human vertebral cortical bone and its changes in aging and osteoporosis: a histomorphometric analysis of the complete spinal column from thirty-seven autopsy specimens. J. Bone Miner. Res. 1997, 12(1), pp. 89-95.
16. Moussa M. Comparative study of the static histomorphometry and marrow content of human vertebral and iliac crest trabecular bone. J. Histol. Egypt. 2008, 31(2), pp. 290-300.

Marina O. Degteva

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky str., 78a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: marina@urcrm.ru

17. Woodard H.Q., Holodny E. A summary of the data of Mechanik on the distribution of human bone marrow. *Phys. Med. Biol.* 1960, 5, pp. 57-59.
18. Campbell B.A., Callahan J., Bressel M. [et al.] Distribution atlas of proliferating bone marrow in non-small cell lung cancer patients measured by FLT-PET/CT imaging, with potential applicability in radiation therapy planning. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2015, 92(5), pp. 1035-1043.
19. Sharagin P.A., Shishkina E.A., Tolstykh E.I. [et al.] Segmentation of hematopoietic sites of human skeleton for calculations of dose to active marrow exposed to bone-seeking radionuclides. In: *RAD Conference Proceedings*, 2018, vol. 3, pp. 154-158, DOI:10.21175/RadProc.2018.33.
20. Aylott C.E., Puna R., Robertson P.A., Walker C. Spinous process morphology: the effect of ageing through adulthood on spinous process size and relationship to sagittal alignment. *Eur. Spine J.* 2012, 21(5), pp. 1007-1012.
21. Bhaumik M., Bapna N., Bhaumik U., Prabhakaran K. Study of transverse and sagittal diameter of lumbar pedicles in relation to trans-pedicular screw fixation using MRI in Rajasthan population. *International Journal of Anatomy and Research*. 2013, 5(21), pp. 50-55.
22. Gilad I., Nissan M. Sagittal evaluation of elemental geometrical dimensions of human vertebrae. *Journal of Anatomy*. 1985, 143, pp. 115-120.
23. Kömürçü E., Kaymaz B., Adam G. [et al.] Safety and feasibility of lumbar spine for intralaminar screw fixation: a computed tomography-based morphometric study. *Acta Orthop. Traumatol. Turc.* 2015, 49(5), pp. 522-529.
24. Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S., Shishkina E.A. A parametric stochastic model of bone geometry. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*. 2018, 11(2), pp. 44-57.
25. Shishkina E.A., Zalyapin V.I., Timofeev Yu.S. [et al.] Parametric stochastic model of bone structures to be used in computational dosimetric phantoms of human skeleton. *Radiation & Applications*. 2018, 3(2), pp. 133-137.
26. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. [et al.] Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *J. Radiol. Prot.* 2015, 35(1), pp. 87-127.
27. Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobieva M.I. [et al.] Modern view on the radioactive contamination of the Tcha river in 1949-1956. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2016, Vol. 56, No. 5, pp. 523-534 (In Russian).
28. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. [et al.] Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Tcha riverside residents: Strontium-90. *Health Phys.* 2011, 101(1), pp. 28-47.
29. Napier B.A., Degteva M.O., Shagina N.B., Anspaugh L.R. Evaluation of the uncertainties in the dosimetric system of the Tcha river. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2013, Vol. 58, No. 1, pp. 5-28.
30. Krestinina L.Y., Davis F.G., Schonfeld S. [et al.] Leukaemia incidence in the Tcha River Cohort: 1953-2007. *Brit. J. Cancer*. 2013, 109, pp. 2886-2893.
31. Zhang Zh., Preston D.L., Sokolnikov M. [et al.] Excess relative risk models using Monte Carlo dosimetry systems with shared errors. *PLoS ONE*. 2017, 12(4): e0174641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174641>.

Received: March 12, 2019

For correspondence: Marina O. Degteva – Candidate of Technical Science, Head of Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia (Vorovsky str., 78a, Chelyabinsk, 454076, Russia. E-mail: marina@urcrm.ru)

Elena A. Shishkina – Candidate of Biological Science, Senior Researcher, Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia; Senior Lecturer of Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Science, Lead Researcher, Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Vladimir I. Zalyapin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, South Urals State University, Chelyabinsk, Russia

Pavel A. Sharagin – Junior Researcher, Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Michael A. Smith – Engineer, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA

Bruce A. Napier – Leading Researcher, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA

For citation: Degteva M.O., Shishkina E.A., Tolstykh E.I., Zalyapin V.I., Sharagin P.A., Smith M.A., Napier B.A. Methodological approach to development of dosimetric models of the human skeleton for beta-emitting radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 66-75. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-66-75

Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера–Мюллера для дозиметрии импульсного излучения

Н.В. Титов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время широкое распространение в Российской Федерации получили медицинские установки для лучевой терапии на основе ускорителей электронов с энергией 18–23 МэВ. Они генерируют импульсное тормозное излучение с максимальной энергией около 20 МэВ. В Государственном реестре средств измерений в настоящее время отсутствуют дозиметрические приборы, предназначенные для дозиметрии импульсного тормозного излучения такой энергии. Наиболее широко используемый для этой цели дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 позволяет проводить измерение импульсного тормозного излучения с энергией только до 10 МэВ, с основной погрешностью измерений в области энергий от 3 до 10 МэВ — 50%. Но альтернативы в настоящее время нет. И хотя вклад в дозу этой части спектра тормозного излучения не слишком велик, данную ситуацию нельзя признать нормальной. В то же время в Государственном реестре средств измерений имеется дозиметр ДКГ-РМ1621, предназначенный для дозиметрии рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 20 МэВ. Но он не предназначен для дозиметрии импульсных излучений. В настоящей работе предпринята попытка обосновать возможность использования данного дозиметра для дозиметрии импульсного тормозного излучения и определить диапазон мощностей доз, в котором результаты измерений данным дозиметром корректны. В качестве источника импульсного тормозного излучения для проведения этого исследования использовался инспекционно-досмотровый комплекс СТ-2630М производства ООО «Скантроник Системс», генерирующий импульсное тормозное излучение с максимальной энергией 3,5 МэВ и 6 МэВ. В этой области энергий дозиметр ДКС-АТ1123 позволяет получать корректные результаты измерения, и он использовался в качестве реперного прибора. Полученные результаты показали, что для данного источника дозиметр ДКГ-РМ1621 позволяет получать результаты с дополнительной погрешностью не более 15% при средней мощности дозы тормозного излучения до 25 мкЗв/ч, что в большинстве случаев вполне достаточно для проведения радиационного контроля помещений, смежных с процедурной медицинского ускорителя электронов. При использовании поправочных коэффициентов, учитывающих влияние мертвого времени дозиметра на результаты измерений, область получения корректных результатов может быть расширена до 100 мкЗв/ч.

Ключевые слова: импульсные источники, дозиметр, инспекционно-досмотровый комплекс.

Введение

Методам дозиметрии импульсного излучения посвящено достаточно много публикаций. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в докладе 34 МКРЕ «Дозиметрия импульсного излучения» [1]. Особенности дозиметрии современных импульсных источников рентгеновского и тормозного излучения посвящена работа [2]. В этих работах делается вывод о том, что детекторы, работающие в счетном режиме, включая счетчики Гейгера–Мюллера, непригодны для измерения импульсного излучения, т.к. из-за наличия большого мертвого времени способны регистрировать только частоту следования импульсов. Это действительно так, но только для достаточно больших мощностей дозы. В области сравнительно небольших

мощностей дозы, которая чаще всего и представляет наибольший интерес при проведении радиационного контроля, использование дозиметров со счетчиками Гейгера–Мюллера для дозиметрии импульсного излучения представляется вполне возможным [3]. Настоящая статья посвящена изучению возможности использования дозиметров со счетчиками Гейгера–Мюллера для дозиметрии импульсного тормозного излучения.

В настоящее время в Российской Федерации широко используются медицинские установки для лучевой терапии, источником ионизирующего излучения в которых служат ускорители электронов с энергией до 23 МэВ. Они генерируют импульсное тормозное излучение с максимальной энергией около 20 МэВ за счет взаимодействия

Титов Николай Владимирович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: pustoshka@inbox.ru

пучка ускоренных электронов с мишенью ускорителя. Длительность импульса у таких ускорителей составляет 1–3 мкс, а частота следования импульсов – 50–400 Гц. Подобные установки создают интенсивные пучки тормозного излучения и размещаются в специальных защитных каньонах, обеспечивающих радиационную защиту людей, находящихся в смежных помещениях и на прилегающей территории. Для обеспечения радиационной безопасности работников медучреждений, в которых функционируют подобные установки, необходимо проведение периодического радиационного контроля. Но в Государственном реестре средств измерений в настоящее время отсутствуют дозиметрические приборы, предназначенные для дозиметрии импульсного тормозного излучения такой энергии. Наиболее широко используемый в Российской Федерации для этой цели дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 производства фирмы АТОМТЕХ (Республика Беларусь) позволяет измерять мощность амбиентного эквивалента дозы импульсного тормозного излучения с энергией до 10 МэВ, с основной погрешностью измерений в области энергий от 3 до 10 МэВ – 50%. Т.е. правомерность его использования для проведения радиационного контроля на ускорителях электронов с энергией, вдвое превышающей верхнюю границу допустимого энергетического диапазона данного прибора, вызывает большие сомнения. Но альтернативы в настоящее время в России нет, и приходится использовать дозиметр ДКС-АТ1123 [4] для проведения радиационного контроля медицинских ускорителей электронов. Т.е. фактически данный вид радиационного контроля в Российской Федерации проводится дозиметрическими приборами, не вполне пригодными для проведения данного вида измерений. Результаты проводимых измерений получаются заниженными, и их нельзя считать вполне корректными. Приходится вводить большие погрешности, приближающиеся к 100%, и учитывать их при сравнении результатов измерений с нормативными величинами.

В то же время в Государственном реестре средств измерений имеется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКГ-РМ1621 [5] производства ООО «Полимастер» (Республика Беларусь), предназначенный для измерения персонального эквивалента дозы и мощности персонального эквивалента дозы рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 20 МэВ. Но этот прибор не предназначен для дозиметрии импульсных излучений. Причиной этого является достаточно большое мертвое время счетчиков Гейгера-Мюллера, составляющее около 100 мкс и значительно превышающее длительность импульсов излучения ускорителя. Поэтому они принципиально не могут регистрировать более одного события за импульс ускорителя, независимо от дозы излучения в импульсе. Но при мощности дозы тормозного излучения ускорителя, при которой счетчик регистрирует не более одного события на 10 и более импульсов ускорителя, результаты измерений, полученные с использованием дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера, могут быть достаточно близки к реальным величинам, и при этом сохраняется энергетическая зависимость показаний такого дозиметра, обеспечивающая необходимый диапазон используемых энергий. Подобные эксперименты проводились и другими авторами [3] и демонстри-

руют реальность и перспективность данного подхода. Дозиметры на основе счетчиков Гейгера-Мюллера более компактны, более дешевы и долговечны и при обеспечении достаточно широкого энергетического диапазона регистрации излучения могли бы с успехом использоваться для проведения радиационного контроля на медицинских терапевтических установках с ускорителями электронов высокой энергии.

В настоящей работе предпринята попытка обосновать возможность использования дозиметра ДКГ-РМ1621 для дозиметрии импульсного тормозного излучения медицинских ускорителей электронов с энергией до 20 МэВ. Автор попытался также определить диапазон мощностей доз, в котором результаты измерений данным дозиметром достаточно корректны. В качестве источника импульсного тормозного излучения для проведения данного исследования использовался инспекционно-досмотровый комплекс СТ-2630М производства ООО «Скантроник Системс», генерирующий импульсное тормозное излучение с максимальной энергией 3,5 МэВ и 6 МэВ. Эта область энергий соответствует техническим характеристикам дозиметра ДКС-АТ1123, и результаты проведенных с его помощью измерений для данного источника принимались в качестве реперных при проведении данного исследования.

Цель исследования – обоснование возможности использования дозиметра ДКГ-РМ1621 для проведения радиационного контроля на медицинских терапевтических установках с ускорителями электронов с максимальной энергией до 20 МэВ, а также определение диапазона мощностей доз, в котором возможно получение корректных результатов измерения данным дозиметром.

Материалы и методы

В качестве детектора в дозиметре ДКГ-РМ1621 используется счетчик Гейгера-Мюллера со специально подобранными фильтрами, обеспечивающими энергетическую зависимость результатов измерения им персонального эквивалента дозы не более 30% по отношению к энергии 0,66 МэВ.

Чувствительность дозиметра можно охарактеризовать количеством срабатываний счетчика на единицу дозы излучения (K , 1/нЗв). Параметры контролируемого поля импульсного тормозного излучения можно охарактеризовать длительностью импульса излучения (τ , мкс), частотой следования импульсов излучения (ω , 1/с) и дозой в импульсе излучения (D_i , нЗв). Средняя мощность дозы импульсного излучения (H), являющаяся измеряемой величиной, равна произведению дозы в импульсе излучения на частоту следования импульсов:

$$H = D_i * \omega \text{ нЗв/с} = 3,6 * D_i * \omega, \text{ мкЗв/ч} \quad (1)$$

Вероятность срабатывания счетчика при воздействии импульса излучения при дозе в импульсе D_i равна:

$$p = D_i * K = H * K / (3,6 * \omega) \quad (2)$$

Вероятность двух срабатываний счетчика за один импульс излучения в предположении нулевого мертвого времени счетчика равна p^2 .

Среднее число срабатываний счетчика за один импульс излучения при дозе в импульсе D_i и нулевом мертвом времени счетчика составило бы:

$$N = p + p^2 = p * (1 + p) \quad (3)$$

Таким образом, занижение результатов измерения за счет наличия мертвого времени счетчика, исключающего возможность двух срабатываний за время одного импульса излучения, характеризуется коэффициентом $1/(1+p)$. С учетом этого, можно ожидать, что при $p \leq 0,17$ занижение результатов измерения мощности дозы импульсного излучения дозиметром со счетчиком Гейгера-Мюллера за счет наличия у него мертвого времени не превысит 15%. Используя выражения (2), получим максимальное значение средней мощности дозы импульсного тормозного излучения, при котором выполняется это условие:

$$H_{\max} = 0,61 * \omega / K, \text{ мкЗв/ч} \quad (4)$$

Т.е. данная величина пропорциональна частоте следования импульсов излучения и обратнопропорциональна чувствительности счетчика. При $p \geq 1$ показания дозиметра не будут изменяться при дальнейшем возрастании мощности дозы и частота срабатывания счетчика будет постоянна и равна частоте следования импульсов излучения. В диапазоне $0,17 \leq p < 1$ можно ожидать получения разумных результатов при умножении результата измерения на поправочный коэффициент $(1+p)$, учитывающий влияние мертвого времени счетчика.

Для проверки реальности вышеприведенных предположений было проведено экспериментальное исследование с целью получения зависимости показаний дозиметра ДКГ-РМ1621 от мощности дозы импульсного тормозного излучения. Основная идея данного исследования заключалась в том, чтобы провести параллельные измерения двумя дозиметрами (ДКГ-РМ1621 и ДКС-АТ1123) мощности дозы импульсного тормозного излучения для широкого спектра мощностей дозы в одних и тех же точках и получить зависимость показаний дозиметра ДКГ-РМ1621 от мощности амбиентного эквивалента дозы тормозного излучения, измеренной при помощи дозиметра ДКС-АТ1123, который в данном исследовании считался образцовым.

Оба дозиметра зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений. Некоторые их характеристики приведены в таблице.

В качестве источника излучения для проведения исследований использовался ускоритель электронов мобильного инспекционно-досмотрового комплекса СТ-2630М производства ООО «Скантроник Системс» (далее – МИДК). Измерения проводились в направлении, противоположном пучку излучения МИДК, для обеспечения пространственной однородности поля излучения. При проведении измерений длительность импульсов излучения составляла 2 мкс, а частота следования импульсов – 100 Гц. Измерения проводились для двух энергий ускоренных электронов 3,5 МэВ и 6 МэВ. Данный источник был выбран потому, что его основные характеристики, кроме энергии ускоренных электронов, близки к соответствующим характеристикам медицинских ускорителей электронов, а энергии электронов соответствуют диапозону энергий тормозного излучения, которые могут корректно измеряться дозиметром ДКС-АТ1123, что позволило использовать его в данном исследовании в качестве образцового.

Изменение мощности дозы в точке измерения достигалось изменением расстояния до источника. Измерения дозиметром ДКС-АТ1123 в каждой точке проводились до получения статистической погрешности измерений не более 5%. Для дозиметра ДКГ-РМ1621 фиксировались 5 результатов измерения, по которым определялось среднее значение и среднеквадратичное отклонение для каждой точки измерения. Статистическая погрешность измерений данным дозиметром также не превышала 5%.

Предварительно выбирались и размечались точки измерения, средняя мощность амбиентного эквивалента дозы в которых изменялась от 1 мкЗв/ч до 200 мкЗв/ч. При средней мощности дозы 200 мкЗв/ч = 56 нЗв/с и частоте следования импульсов тормозного излучения 100 Гц доза в импульсе составит 0,56 нЗв. С учетом длительности импульса излучения 2 мкс, это соответствует мощности дозы в импульсе 0,28 мЗв/с, что значительно меньше допустимой для дозиметра ДКС-АТ1123 величины 1,3 Зв/с.

Дозиметры ДКС-АТ1123 и ДКГ-РМ1621 по очереди размещались в каждой точке измерения так, чтобы центр детектора каждого из них находился в одной и той же точ-

Характеристики использовавшихся в данной работе дозиметров рентгеновского и гамма-излучения

Таблица

[Table]

Characteristics of the dosimeters for the X-ray and gamma exposure]

Параметр [Parameter]	ДКС-АТ1123 [DKS-AT1123]	ДКГ-РМ1621 [DKG-PM1621]
Диапазон измерения мощности дозы [Dose rate measurement range]	0,1 мкЗв/ч – 10 Зв/ч [0,1 μSv/h – 10 Sv/h]	0,1 мкЗв/ч – 100 мЗв/ч [0,1 μSv/h – 100 mSv/h]
Диапазон регистрируемых энергий [Energy range]	15 кэВ – 10 МэВ [15 KeV – 10 MeV]	10 кэВ – 20 МэВ [15 KeV – 20 MeV]
Энергетическая зависимость относительно энергии 0,662 МэВ [Energy dependence relative to the 0,662 MeV energy]	±50%	±30%
Пределы основной относительной погрешности измерений [Boundaries of the main relative uncertainty of the measurements]	Для импульсного излучения 30% [30% for the pulsed exposure]	При мощности дозы более 1 мкЗв/ч < 17% [<17% for the dose rate above 1 μSv/h]
Возможность измерения импульсного излучения [Possibility of measurement of the pulsed exposure]	Да [Yes]	Нет [No]

ке. Проводились измерения мощности амбиентного эквивалента дозы дозиметром ДКС-АТ1123 и мощности персонального эквивалента дозы дозиметром ДКГ-РМ1621 в каждой точке измерения с регистрацией полученных результатов. При этом датчик дозиметра ДКС-АТ1123 направлялся на источник, а дозиметр ДКГ-РМ1621 размещался так, чтобы фильтр из тканеэквивалентного материала находился со стороны источника.

Результаты и обсуждение

Результаты измерений средней мощности амбиентного эквивалента дозы импульсного тормозного излучения с максимальными энергиями 3,5 МэВ и 6 МэВ, проведенных обоими использовавшимися в данной работе дозиметрами, представлены на рисунках 1 и 2.

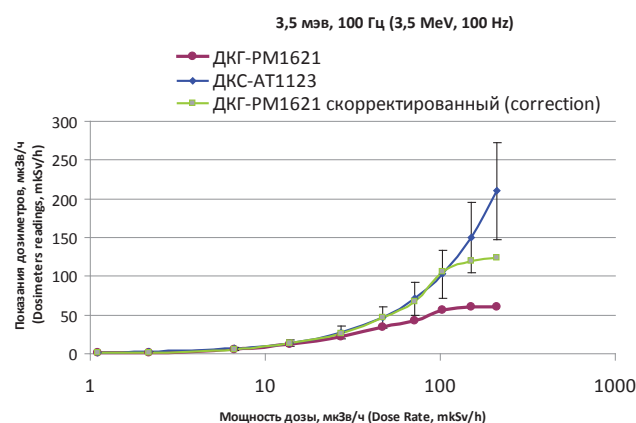


Рис. 1. Результаты измерений импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 3,5 МэВ
[Fig. 1. Results of the measurements of the pulsed bremsstrahlung radiation with maximum energy of 3,5 MeV]

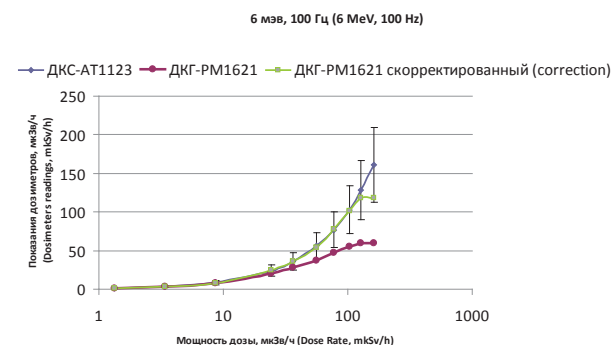


Рис. 2. Результаты измерений импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 6 МэВ
[Fig. 2. Results of the measurements of the pulsed bremsstrahlung radiation with maximum energy of 6 MeV]

Как видно из представленных рисунков, результаты измерений дозиметром ДКГ-РМ1621 для обеих максимальных энергий тормозного излучения отличаются от реперных данных, полученных с использованием дозиметра ДКС-АТ1123, не более 15% в области мощностей дозы от 1 до 20 мкЗв/ч и практически не зависят от энергии излучения. Начиная со 120 мкЗв/ч, показания дозиметра ДКГ-РМ1621 для обоих источников перестают зависеть

от мощности дозы. Начиная с этой мощности дозы, срабатывание счетчика дозиметра происходит для каждого импульса излучения, т.е. вероятность срабатывания равна $p = 1$. Используя выражение (2), мы можем определить параметр K – чувствительность счетчика дозиметра:

$$K = 3,6 * \omega * p / H = 3,6 * 100 * 1 / 120 = 3,0 \text{ нЗв}^{-1}. \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (3), скорректированное значение показаний дозиметра ДКГ-РМ1621 (X), учитывающее невозможность двойных срабатываний счетчика за один импульс источника ($X_{\text{скапп}}^{\text{скапп}}$), имеет вид:

$$X_{\text{скапп}}^{\text{скапп}} = X * (1 + p) = X * (1 + H * K / (3,6 * \omega)) \quad (6)$$

Используя в качестве оценки H величину $X_{\text{скапп}}^{\text{скапп}}$ получим:

$$X_{\text{скапп}}^{\text{скапп}} = X / (1 - X * K / (3,6 * \omega)) \quad (7)$$

При $K = 3,0 \text{ нЗв}^{-1}$ и $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ получаем:

$$X_{\text{скапп}}^{\text{скапп}} = X / (1 - X / 120) \quad (8)$$

На рисунках 1 и 2 представлены скорректированные с учетом данного выражения величины измеренной с помощью дозиметра ДКГ-РМ1621 мощности дозы импульсного тормозного излучения. Как видно, они отличаются не более чем на 10% от реперных значений мощности дозы и не выходят за пределы погрешности результатов измерений дозиметром ДКС-АТ1123 в диапазоне мощностей доз от 1 до 100 мкЗв/ч.

Эта область практически полностью покрывает диапазон мощностей доз, встречающихся при проведении радиационного контроля лучевых диагностических установок и медицинских ускорителей электронов.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает перспективность продолжения работ по разработке методик проведения радиационного контроля различных установок с импульсными источниками рентгеновского и тормозного излучения с использованием дозиметров со счетчиками Гейгера-Мюллера.

Полученные результаты показывают, что использование дозиметра ДКГ-РМ1621 для радиационного контроля импульсных источников тормозного излучения возможно в определенном диапазоне мощностей доз.

Автор планирует продолжить исследования в этом направлении для других используемых на практике импульсных источников тормозного и рентгеновского излучения.

Литература

1. ICRU Report 34, The Dosimetry of pulsed radiation, 1982.
2. Мартынюк, Ю.Н. Дозиметрия импульсного излучения / Ю.Н. Мартынюк, К. Нурлыбаев, А.А. Ревков // АНРИ. – 2018. – № 1 (92). – С. 2-11.
3. Response of Active Electronic Radiation Monitors in Pulsed X-ray Beams from Linacs. (Peter D Harty, Genesan Ramanathan. Australian Radiation Protection & Nuclear Safety Agency 619 Lower Plenty Road, Yallambie, Victoria 3085)
4. Дозиметры рентгеновского и гамма излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. Руководство по эксплуатации.
5. ДКГ-РМ1621. Руководство по эксплуатации.

Поступила: 11.03.2019 г.

Титов Николай Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: pustoshka@inbox.ru

Для цитирования: Титов Н.В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения // Радиационная гигиена. – 2019. – Т.12, № 2. – С. 76-80. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-76-80

Prospects for the use of the dosimeters with Geiger-Muller counters for the dosimetry of the pulse emission

Nikolay V. Titov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

At the current time radiation therapy units based on the linear accelerators with the energy range of 18-23 MeV are common in the Russian Federation. They generate pulsed bremsstrahlung radiation with the maximum energy of approximately 20 MeV. The State Register of measuring devices contains no dosimetry equipment for the measurement of the pulsed bremsstrahlung radiation for such energies. The most common dosimeter of X-ray and gamma radiation, DKS-1123AT, allows measuring the pulsed bremsstrahlung radiation up to 10 MeV, with the main uncertainty of measurement in the range of 3-10 MeV of 50%. No alternative solutions exist at the current time. Although the contribution of this part of the bremsstrahlung radiation spectra is not high, the situation requires actions. However, the State Register of measuring devices includes the DKG-RM1621 dosimeter for the measurement of X-ray and gamma radiation in the energy range of 15 KeV – 20 MeV, but it is now designed for the measurement of the pulse emissions. The current study is focused on the evaluation of the use of the DKG-RM1621 dosimeter for the measurement of the pulsed bremsstrahlung radiation and on the estimation of the dose rate range, where the results of the measurements would be valid. The study was performed using the inspection-security complex ST-2630M (JSC "Scantronix systems") as the source of the pulsed bremsstrahlung radiation with the maximum energy of 3,5 and 6 MeV. This energy range is valid for the DKS-1123AT dosimeter, allowing using it for the comparison. The results indicate that, for the current source, the DKG-RM1621 dosimeter allows performing the measurements with the additional uncertainty up to 15%, with the mean dose rate of pulsed bremsstrahlung radiation up to 25 µSv/h. That is acceptable for the radiation control of the rooms adjacent to the location of a linear accelerator. The use of the additional coefficients to consider the impact of the idle time of the detector on the results of the measurements allows measuring dose rates up to 100 µSv/h.

Key words: pulsed radiation sources, dosimeter, inspection complex.

References

1. ICRU Report 34, The Dosimetry of pulsed radiation, 1982.
2. Martynyuk Yu.N., Nurlibaev K., Revkov A.A. Dosimetry of the pulsed exposure. ANRI = ANRI, 2018, № 1 (92), pp. 2-11. (In Russian).
3. Response of Active Electronic Radiation Monitors in Pulsed X-ray Beams from Linacs. (Peter D Harty, Genesan Ramanathan. Australian Radiation Protection & Nuclear Safety Agency 619 Lower Plenty Road, Yallambie, Victoria 3085)
4. Dosimeters of the X-ray and gamma radiation DKS-AT1121, DKS-AT1123. User manual. (In Russian).
5. DKG-RM1621. User manual. (In Russian).

Received: March 11, 2019

For correspondence: Nikolay V. Titov – Junior Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: pustoshka@inbox.ru)

For citation: Titov N.V. Prospects for the use of the dosimeters with Geiger-Muller counters for the dosimetry of the pulse emission. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 76-80. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-76-80

Nikolay V. Titov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: pustoshka@inbox.ru

Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» до выполнения реабилитационных работ

Е.В. Храмцов

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В статье приводятся данные о радиационной обстановке по результатам исследований 2008 и 2014 гг. на территории, прилегающей к месту проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» перед реабилитационными работами (2014–2015 гг.), выполненными с целью удаления аварийного загрязнения. Рассмотрены результаты анализа динамики изменений радиационной обстановки за период с 2008 по 2014 г. и дана оценка радиационной обстановки по основным показателям: значения мощности дозы, содержание техногенных радионуклидов в почве, воде и других объектах окружающей среды. На основании выполненных исследований показано, что радиационная обстановка на территории объекта «Глобус-1» не претерпела существенных изменений с 2008 г. Доза дополнительного техногенного облучения отдельных лиц из населения формируется в основном за счет внешнего облучения при условии временного пребывания на территории с повышенными уровнями гамма-излучения. В результате выполненных работ по герметизации исследовательской скважины снизился вынос на поверхность воды с высокими концентрациями цезия-137, стронция-90 и трития. Загрязнения радиоактивного грунта на глубину 1 м, исследованные в 2014 г., оцениваются в 2200 м³ и могут быть отнесены к категории очень низкоактивных и низкоактивных радиоактивных отходов, для которых допускается приповерхностное захоронение. Ввиду труднодоступности района для вывоза грунта и отдаленности от населенных пунктов признано целесообразным организовать приповерхностное захоронение загрязненного грунта непосредственно на территории объекта.

Ключевые слова: мирный ядерный взрыв, радионуклиды, радиоактивное загрязнение, окружающая среда, дозы облучения, радиационная безопасность.

Введение

В период с 1965 по 1988 г. на территории Российской Федерации был произведен 81 мирный ядерный взрыв (МЯВ). Из 81 взрыва 2 были аварийными («Картон-3» – Республика Саха – Якутия) и («Глобус-1» – Ивановская область). Два взрыва произведены с запланированным выбросом радиоактивности на поверхность – «Тайга» (Пермский край) и «Кристалл» (Республика Саха – Якутия) и могут быть приравнены к аварийным [1–3].

Статус мирных ядерных взрывов долгое время отсутствовал. Специалисты чаще всего называли взрывы местами неорганизованного захоронения радиоактивных отходов. Наблюдение за радиационной обстановкой на территориях, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов, осуществлялось в рамках радиационно-гигиенической паспортизации или исследований, проводимых по инициативе субъектов РФ. В 2008 г. научные исследования по разработке требований по обеспечению радиационной безо-

пасности населения были включены в Федеральную целевую программу «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 и на период до 2015 года». Итогом серии исследований стали 2 нормативных документа: в 2010 г. вышли СП 2.6.1-2422-09 «Санитарные правила по обеспечению радиационной безопасности на объектах хранения газоконденсата в подземных резервуарах, образованных с применением ядерно-взрывных технологий», а в 2011 г. – СанПиН 2.6.1-2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг. ядерных взрывов в мирных целях)». Основные требования по обеспечению безопасности, сформулированные в данном СанПиН, следующие: «Доза дополнительного техногенного облучения критической группы населения за счет МЯВ не должна превышать 0,3 мЗв/год; на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ, устанавливается охранный зона (далее – ОЗ), а земли в пределах ОЗ переводятся в земли запаса для консервации; перевод земель в ка-

Храмцов Евгений Витальевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: zhenia.khramtsov2013@yandex.ru

тегорию земель запаса для консервации в местах проведения МЯВ и придание им статуса ОЗ осуществляется в соответствии с законодательством Российской Федерации; на территории ОЗ проводится контроль показателей радиационной обстановки (радиационный контроль – РК). на основании результатов РК дается оценка дозы техногенного облучения критической группы населения».

Вскоре после выхода СанПиН 2.6.1-2819-10, в июле 2011 г. вышел Федеральный закон № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», а в октябре 2012 г. – Постановление Правительства № 1069 «Критерии отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критерии отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам». В Законе впервые было введено понятие «особые радиоактивные отходы», а в Постановлении Правительства указано, что к особым радиоактивным отходам отнесены в том числе отходы, образовавшиеся в результате использования ядерных зарядов в мирных целях. С выходом Закона и Постановления парадигма обеспечения радиационной безопасности изменилась. Если до выхода закона для обеспечения радиационной безопасности требовалось проводить периодический контроль состояния радиационной обстановки и обеспечивать непревышение установленного уровня дозы облучения критической группы населения 0,3 мЗв/год, то после выхода Закона стало необходимо обеспечить безопасность на длительную перспективу на всех этапах существования особых РАО – этапе размещения отходов (состояние, в котором взрывы находятся в настоящее время), этапе консервации и этапе окончательного захоронения.

Мирный ядерный взрыв «Глобус-1» представляет особый интерес для исследования в плане обеспечения долговременной безопасности, поскольку центральная зона взрыва является местом содержания особых радиоактивных отходов и является источником потенциальной опасности в будущем, а прилегающая территория, подвергшаяся аварийному загрязнению, – источником формирования доз облучения лиц, посещающих данную территорию, в настоящее время. Взрыв «Глобус-1» был осуществлен 19 сентября 1971 г. в Кинешемском районе Ивановской области в 350 км от г. Москвы. Камуфлетный взрыв ядерного устройства мощностью 2,3 килотонн (кТ) в тротиловом эквиваленте (ТЭ) был произведен с целью глубинного сейсмического зондирования земной коры по профилю г. Воркута – г. Кинешма с целью поиска структур, перспективных для разведки полезных ископаемых [1–4]. Скважина глубиной 610 м для ядерного заряда была заложена на расстоянии 70 м от левого берега реки Шача (бассейн р. Волги) (рис. 1).

Взрыв был осуществлен в водонасыщенных известняках, простирающихся до отметки 500 м. В момент взрыва на объекте были две скважины: технологическая (зарядная) ГБ-1 и приборная 0–1. Спустя 17 мин после взрыва наблюдался выход газовой фонтана с песком, цементом и глинистыми частицами через затрубное пространство зарядной

скважины. Последствием аварийного выброса техногенных радионуклидов явилось загрязнение территории вокруг скважины ГБ-1, в основном на юг и восток на площади 100×150 м. Таким образом, в процессе взрыва возникла нештатная аварийная ситуация, ставшая причиной интенсивного локального загрязнения почвы и растительности в непосредственной близости от устья скважины. Повторное загрязнение ближайшей к устью территории связано с бурением в 1976–1977 гг. двух исследовательских скважин, сопровождавшимся выносом радионуклидов, содержащих в буровом растворе, который собирался в земляные емкости. На территории, прилегающей к месту проведения взрыва в период с 1977 по 2004 г. проводились частичные реабилитационные мероприятия [2, 3, 5–8].

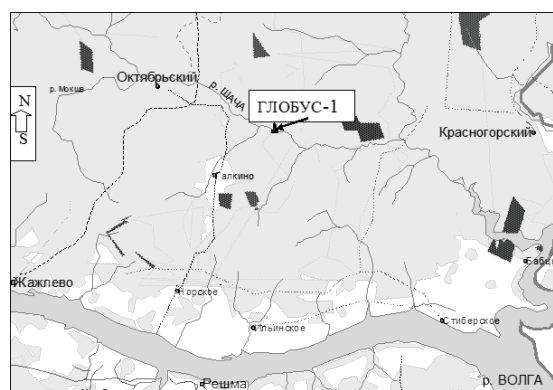


Рис. 1. Карта-схема территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-1»
[Fig. 1. Map of the territory near the PNE «Gloбус-1»]

Исследование состояния радиационной обстановки на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-1», выполнено специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в 2008, 2014 и 2018 гг. в рамках реализации мероприятий Федеральных целевых программ «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

В данной статье приводятся данные о радиационной обстановке по результатам исследований 2008 и 2014 гг. на территории, прилегающей к месту проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» перед реабилитационными работами (2014–2015), выполненными для удаления аварийного загрязнения.

Цель исследования – дать сравнительный анализ показателей радиационной обстановки на территории, прилегающей к месту проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» до проведения запланированных реабилитационных работ.

Материалы и методы

Радиационно-гигиеническое обследование территории, прилегающей к месту проведения МЯВ, проводилось по стандартной схеме [9, 10], которая включала

в себя определение географических координат специфических элементов ландшафта, точек измерений и отбора проб с использованием спутниковых навигаторов: измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, идентификация гамма-излучающих радионуклидов *in situ* методом полевой гамма-спектрометрии [11], отбор проб верхнего (на глубину до 20 см) слоя почвы, воды, природных пищевых продуктов (грибов, ягод), а также других объектов окружающей среды, фото- и видео-съемку. В схему исследований 2014 г. дополнительно было включено также исследование удельной активности почвы на глубинах до 1 м путем погружения коллимированного детектора, отградуированного для оценки удельной активности почвы в месте расположения детектора на соответствующей глубине [12].

Положение точек измерений и отбора проб для наглядности выполнено с использованием картографических средств. За основу картографического отображения взят космический снимок, зафиксированный средствами MapInfo 7.8 в системе координат по долготе и широте. Все последующие слои (изолинии, точки отбора проб) наносились непосредственно на картографический слой с изображением спутниковой карты территории исследований.

Результаты и обсуждение

Информация о результатах собственных исследований территории, прилегающей к месту проведения взрыва «Глобус-1», представлена в научных работах и отчетах [11–14].

В таблице 1 приведены минимальные и максимальные значения основных показателей, характеризующих радиационную обстановку на исследуемой территории в 2008 и 2014 гг.

Значения основных показателей, характеризующих радиационную обстановку территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-1», в 2008 и 2014 гг.

Таблица 1

[Table 1

Values of the main indicators characterizing the radiation environment of the territory adjacent to the PNE “Globus-1” in 2008 and 2014 respectively]

Показатель, единица измерения [Measured value, units]	2008		2014	
	Min	Max	Min	Max
Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, нЗв/ч [Ambient dose equivalent rate of gamma-radiation, nSv/h]	39	2000	83	2530
Удельная активность цезия-137 в почве, Бк/кг [Specific activity of caesium-137 in soil, Bq/kg]	10,4	170000	11,0	133000
Удельная активность стронция-90 в почве, Бк/кг [Specific activity of strontium-90 in soil, Bq/kg]	5,5	276	30,0	1230
Удельная активность цезия-137 в грибах, Бк/кг [Specific activity of caesium-137 in mushrooms, Bq/kg]	13,0	170,0	11,2	121,0
Удельная активность цезия-137 в траве, Бк/кг [Specific activity of caesium-137 in the grass, Bq/kg]	280	550	14,4	384
Удельная активность стронция-90 в траве, Бк/кг [Specific activity of strontium-90 in the grass, Bq/kg]	172	245	10,2	245
Удельная активность цезия-137 в воде, Бк/кг [Specific activity of caesium-137 in the water, Bq/kg]	0,14	9900	0,01	4800
Удельная активность стронция-90 в воде, Бк/кг [Specific activity of strontium-90 in the water, Bq/kg]	0,02	4300	0,01	3300
Удельная активность трития в воде, Бк/кг [Specific activity of tritium in the water, Bq/kg]	<2,0	8900	<2,0	5300

Анализ результатов исследований как 2008 г., так и 2014 г. показал значительный разброс значений мощности дозы (МД) гамма-излучения – от 39 до 2530 нЗв/ч. Так, в 2014 г. разброс значений мощности дозы гамма-излучения в воздухе регистрировался в диапазоне от 83 до 2530 нЗв/ч (средняя $\pm$ стандартное отклонение = 170 ± 218 нЗв/ч, $n=251$). Минимальные уровни гамма-излучения (МД в диапазоне 83–120 нЗв/ч) регистрировались у реки в местах проведения работ по спрямлению русла, а также в лесу, окаймляющем промплощадку (луг) с севера, и по периферии промплощадки (луга). Максимальные значения в 2014 г. были зарегистрированы недалеко от репера, установленного над боевой скважиной, и в южном направлении от репера. Наиболее высокое значение МД (2530 нЗв/ч) было зарегистрировано у амбара к югу от репера (рис. 2).



Рис. 2. Спутниковая карта территории объекта «Глобус-1» с точками измерений мощности дозы внешнего гамма-излучения, выполненных в 2014 г., и изолиниями мощности дозы. Синим цветом выполнена обводка русла реки Шача [Fig. 2. Satellite Map site “Globus-1” with points of measurement of external dose rate of gamma-radiation, made in the year 2014, and contour dose. Blue completed stroke the Shacha river]

Следует отметить, что регистрируемые наименьшие значения мощности дозы в интервале 83–120 нЗв/ч (в среднем 102 нЗв/ч) в целом соответствовали радиационному фону (ЕРФ), характерному для Кинешемского района Ивановской области.

Изучение спектрального состава гамма-излучения показало, что основным дозообразующим радионуклидом по дозе внешнего облучения является цезий-137 (рис. 3).

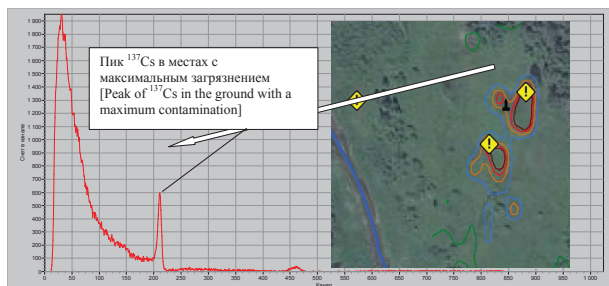


Рис. 3. Характерный спектр в местах с максимальным радиоактивным загрязнением
[Fig. 3. Characteristic spectrum in areas with the highest radioactive contamination]

Распределение цезия-137 по профилю почвы, исследованному в 2008 г., показало, что на глубине 20 см удельная активность цезия-137 может быть гораздо выше, чем в самом верхнем 5-сантиметровом слое, удельная активность многих проб превышает минимально значимую удельную активность (МЗУА), а основная активность может быть сосредоточена на глубинах более 20 см (табл. 2).

Исследование, выполненное в 2014 г., перед началом запланированных государственных работ по реабилитации территории (2014–2015 гг.), включало изучение уровней радиоактивного загрязнения грунта на глубинах до 1 м. В установленном в 2008 г. ареале радиоактивного загрязнения были пробурены 46 скважин глубиной 1 м с целью гамма-спектрометрического определения удельной активности почвы на разных глубинах с шагом 10 см (рис. 4).

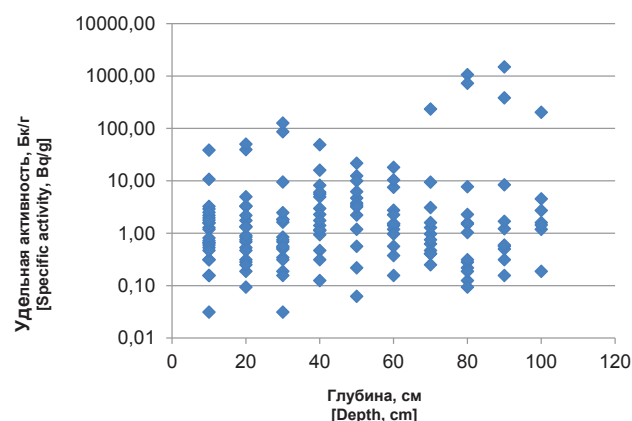


Рис. 4. Уровни загрязнения грунта цезием-137 на площадке объекта «Глобус-1» на различных глубинах
[Fig. 4. Soil contamination levels of caesium-137 at the site «Globus-1» at various depths]

Это позволило, в свою очередь, дать ориентировочную оценку объема радиоактивных отходов. Из рисунка 4 видно, что пробы грунта, удельная активность ^{137}Cs в которых превышает значение МЗУА 10 Бк/г, обнаруживаются не только в приповерхностном 20-сантиметровом слое, но и на глубинах до 1 м. Из 422 измерений удельной активности в 18 случаях превышено значение МЗУА. В 16 пробах уровни загрязнения грунта, в соответствии с Постановлением Правительства 1069 от 19 октября 2012 г., могут квалифицироваться как очень низкоактивные отходы (менее 1000 Бк/г), а в 2 пробах грунта превышено значение удельной активности 1000 Бк/г критерий отнесения к низкоактивным отходам. Максимальное значение удельной активности пробы составило 1490 Бк/г. По результатам исследований 2014 г. установлено, что объем загрязненного грунта цезием-137 в слое 1 м оценивается объемом 2200 м³ [12].

Исследование удельной активности проб воды показало, что наибольшие уровни загрязнения имели место в пробе воды, отобранной рядом с исследовательской скважиной, из которой, несмотря на герметизацию, вода продолжала сочиться (табл. 3).

Значения удельной активности цезия-137 в пробах почвы, отобранных на территории, прилегающей к МЯВ «Глобус-1» в 2008 г., Бк/кг

Таблица 2

Value of specific activity of cesium-137 in soil samples taken from the area adjacent to the PNE «Globus-1» in the year 2008, Bq/kg

[Table 2]

Слой почвы (см) [Soil layer (cm)]	Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг [Specific activity ^{137}Cs , Bq/kg]		
	Фоновая площадка [Background playground]	Галкино (огород) [Galkino (garden)]	МЯВ «Глобус-1» [PNE «Globus-1»]
0–5	77,2±7,2	10,4±1,8	18 800±2000
5–10	29,9±6,1	11,3±1,9	18 700±2000
10–15	2,8±0,9	10,7±2,1	32 300±3500
15–20	0,6±0,3	11,8±2,1	48 100±5100

Таблица 3

Значения удельной активности техногенных радионуклидов в пробах воды, отобранных на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ «Глобус-1» в 2008 и 2014 гг.

[Table 3]

Values of specific activity of man-made radionuclides in water samples taken from the area adjacent to the venue of the PNE «Globus-1» in 2008 and 2014 respectively

Место отбора [seat selection]	Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg]					
	2008			2014		
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	³ H	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	³ H
Р. Шача (напротив площадки взрыва) [River Shacha (opposite the platform explosion)]	0,46±0,14	0,02±0,01	5,1±1,3	0,098±0,025	0,018±0,006	<2.0
Р. Шача (ниже площадки взрыва) [River Shacha (below the platform explosion)]	0,14±0,05	<0,01	4,3±1,3	0,12±0,03	0,011±0,005	<2.0
Исследовательская скважина [Exploratory borehole]	9900±2000	4800±1000	8900±900	4290±860	3420±680	5347±1337

Установлено тысячекратное превышение гигиенических нормативов для питьевой воды (11 Бк/кг для цезия-137 и 5 Бк/кг для стронция-90, Таблица П-2, НРБ-99/2009). Концентрация трития из этой же скважины оказалась несколько меньше соответствующего норматива (7600 Бк/кг). Во всех остальных пробах, отобранных из луж на территории промплощадки «Глобус-1» и из реки Шачи, удельные активности всех трех техногенных радионуклидов были измеримыми, но существенно ниже уровней вмешательства для питьевой воды. По сравнению с 2008 г., в 2014 г. удельная активность трития заметно снизилась. Уровни загрязнения техногенными радионуклидами проб воды из р. Шача, из родника деревни Галкино в 5 км от взрыва

и колодца д. Норское в 12 км от взрыва находились в пределах уровней глобального загрязнения.

По абсолютным значениям загрязнение всех проб грибов цезием-137 оказалось намного ниже предела, регламентируемого СанПиН-2.3.2.1078–01 и Едиными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю) (2500 Бк/кг по сухому весу). Очень низким было и содержание цезия-137 в ягодах малины (0,54 Бк/кг) – существенно меньше регламентируемого предела – 800 Бк/кг (сухой вес). В 2014 г. по сравнению с 2008 г. не выявлено достоверного изменения удельной активности цезия-137 и стронция-90 в траве (табл. 4).

Таблица 4

Удельная активность цезия-137 и стронция-90 в пробах биологических объектов, отобранных на объекте «Глобус-1» и вблизи него в 2008 и 2014 гг.

[Table 4]

Specific activity of cesium-137 and strontium-90 in samples of biological objects collected on the Globus-1 and near him in 2008 and 2014 respectively

Место отбора [Seat selection]	Вид пробы [View sample]	Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg]			
		2008 г.		2014 г.	
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Лес к северу от МЯВ «Глобус-1» [Forest north of the PNE «Globus-1»]	Грибы [Mushrooms]	100±20	Н.а.	21,6±3,7	Н.а.
Площадка взрыва 180 м от репера, вблизи р. Шача [Ground explosion 180 m from the reference point, near R. Shacha]	Ягода (малина) Berry (raspberry)	Н.а.	Н.а.	0,54±0,13	Н.а.
60 м к югу от боевой скважины [60 m south of battle wells]	Трава [Grass]	490±60	245±49	384±49	245±49
25 м к югу от боевой скважины [25 m south of battle wells]	Трава [Grass]	550±70	204±41	203±29	211±42
15 м к востоку от боевой скважины [15 m to the east of battle wells]	Трава [Grass]	280±40	222±44	229±32	214±46

Н.а. – анализ не проводился. Погрешность измерения указана с доверительной вероятностью 95%. Удельная активность радионуклидов для травы, грибов и ягод приведена из расчета на сухой вес пробы

[Н.а. – analysis was not conducted. Error of measurement is specified with confidence probability 95%. Specific activity of radionuclides for herbs, mushrooms and berries is based on dry weight of the sample]

Анализ проб природных пищевых продуктов показал, что содержание техногенных радионуклидов в них значительно ниже действующих гигиенических нормативов, и доза дополнительного техногенного облучения отдельных лиц из населения формируется в основном за счет внешнего облучения при условии временного пребывания на территории с повышенными уровнями гамма-излучения.

Выводы

1. На основе выполненных исследований показано, что радиационная обстановка на территории объекта «Глобус-1» не претерпела существенных изменений с 2008 г. В результате выполненных работ по герметизации исследовательской скважины снизился вынос на поверхность воды с высокими концентрациями цезия-137, стронция-90 и трития.

2. Уровни загрязнения радиоактивного грунта на глубину 1 м, оцененные объемом около 2200 м³, могут быть отнесены к категории очень низкоактивных и низкоактивных радиоактивных отходов, для которых допускается приповерхностное захоронение. Ввиду труднодоступности района для вывоза грунта и отдаленности от населенных пунктов признано целесообразным организовать приповерхностное захоронение загрязненного грунта непосредственно на территории объекта.

3. Доза дополнительного техногенного облучения отдельных лиц из населения формируется в основном за счет внешнего облучения при условии временного пребывания на территории с повышенными уровнями гамма-излучения.

4. Территорию объекта в соответствии с СанПиН 2.6.1.2819-10 предлагается перевести в категорию земель запаса для консервации и организовать охранную зону, поскольку обустройство санитарно-защитной зоны относится только к действующим объектам.

Благодарности

Автор выражает свою благодарность Репину Виктору Степановичу (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за помощь в анализе и обработке данных, а также сотрудникам ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева: Рамзаеву Валерию Павловичу, Кадука Марине Валерьевне, Иванову Сергею Анатольевичу, Варфоломеевой Ксении Владимировне, Библину Артему Михайловичу за предоставленную возможность использовать совместно полученные данные для последующего анализа и обобщения.

Литература

1. Ядерные испытания СССР. Том 4. Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований / Колл. авторов под рук. В.Н. Михайлова. РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, 2000. – 200 с.
2. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под. рук. проф. В.А. Логачева – М.: Изд.АТ, 2001. – 519 с.
3. Современная радиозоологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Колл. авторов; под рук. проф. В.А. Логачева. – М.: Изд.АТ, 2005. – 256 с.
4. Касаткин, В.В. «Глобус-1»: Радиоактивное загрязнение и проект реабилитации участка / В.В. Касаткин, В.И. Клишин, Е.Н. Камнев [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. Охрана труда и окружающей среды. 2009. № 1. С. 82-86.
5. Касаткин, В.В. Георадиозоологические проблемы объектов мирных ядерных взрывов – пунктов размещения особых радиоактивных отходов / В.В. Касаткин [и др.] / Атомная энергия. – 2012. – Т. 113, № 5. – С. 289-293.
6. Касаткин, В.В. Этапы перевода объекта использования ядерного заряда в мирных целях «Глобус-1» в пункт консервации особых радиоактивных отходов / В.В. Касаткин [и др.] // Атомная энергия. – 2014. – Т.116, № 3. – С. 157-161.
7. Особые радиоактивные отходы /Под общ. ред. И.И. Линге – М. 2015. – 240 с.
8. Рамзаев, В.П. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности / В.П. Рамзаев Е.В. Храмцов // Радиационная гигиена. – 2009. – Т.2, №2. – С. 27-33.
9. Рамзаев, В.П. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения / В.П. Рамзаев [и др.] // Радиационная гигиена. – 2010. – Т.3, №1. – С. 33-39.
10. International Commission on Radiation Units and Measurements: Report 53. Gamma-ray spectrometry in the environment / ICRU, 1994.
11. Радиационно-гигиеническое обследование территорий, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов, сопровождавшихся выходом на поверхность радионуклидов, и разработка критериев и условий обеспечения безопасности населения: Отчет о научно-исследовательской работе. № ИКРБС 02.2.00950764. Фонды ФГУН НИИРГ, 2008. – 183 с.
12. Научно-методическое сопровождение работ по обеспечению радиационной безопасности населения на территориях в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях: Отчет о научно-исследовательской работе. № ИКРБС 02201457300. Фонды ФБУН НИИРГ, 2014. – 164 с.
13. Храмцов, Е.В. Радиационная обстановка в районе проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» перед выполнением реабилитационных мероприятий в 2014 г / Е.В. Храмцов [и др.] // В книге: Чернобыль – 30 лет спустя. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на ЧАЭС. Сборник тезисов международной научно-практической конференции. 2016. С. 188-190.
14. Храмцов, Е.В. Радиационно-гигиеническая оценка территорий, прилегающих к местам проведения мирных ядерных взрывов / Е.В. Храмцов [и др.] // Современные проблемы радиационной медицины: от науки к практике (г. Гомель, 26-27 апреля 2018 г.): Материалы международной научно-практической конференции / Под общ. ред. доктора мед. наук, доц. А.В. Рожко. – Гомель, ГУ «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека». – Гомель: ГУ «РНПЦ РМиЭЧ», 2018. – С. 81-82.

Поступила: 19.03.2019 г.

Храмцов Евгений Витальевич – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: zhenia.khramtzov2013@yandex.ru

Для цитирования: Храмцов Е.В. Радиационная обстановка на территории проведения мирного ядерного взрыва «Глобус-1» до выполнения реабилитационных работ // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 2 – С. 81-88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-81-88

Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion «Globus-1» before performing the rehabilitation works

Evgeniy V. Khramtsov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The article provides data on the radiation situation on research results 2008 and 2014 in the area adjacent to the site of the peaceful nuclear explosion “Globus-1” before the rehabilitation works (2014–2015), made with a view to removing accidental contamination. The results of the analysis of the dynamics of changes of the radiation situation during the period from 2008 to 2014 year and assess the radiological situation on basic indicators: the values of the dose of technogenic radionuclides content in soil, water and other objects in the environment. On the basis of the research shows that the radiation situation on the territory of the “Globus-1” has not undergone significant changes from 2008 onwards. An additional dose of man-made exposure of individuals from the population is formed mainly due to external irradiation provided temporary residence on the territory with elevated levels of gamma radiation. As a result of work performed by sealing research wells decreased stem onto the surface of the water with high concentrations of cesium-137, strontium-90 and tritium. Radioactive contamination of the soil to a depth of 1 m, studied in the year 2014, is estimated at 2200 m³ and can be classified as very active and low-level radioactive wastes for which allowed a near-surface burial. Because of the inaccessibility of the area for the removal of soil and remoteness from populated areas considered advisable to arrange the near-surface burial of contaminated soil () directly on the premises of the site.

Key words: peaceful nuclear explosion, radionuclides, radioactive pollution, objects of the environment, radiation dose, radiation safety.

References

1. SOVIET nuclear tests. Volume 4. Using nuclear explosions to solve economic tasks and research / PCs. the authors hand. V.N. Mikhailov. VNIIEF, Sarov, 2000, 200 p. (in Russian).
2. Peaceful nuclear explosions: General and radiation safety when they hold/ PCs. authors; under hands. Prof. V.A. Logachev. Moscow, 2001, 519 p. (in Russian).
3. Modern radioecological situation in the field of peaceful nuclear explosions on the territory of the Russian Federation/ PCs. authors; under hands. Prof. V.A. Logacheva. Moscow, 2005, 256 p. (in Russian).
4. Kasatkin V.V., Klishin V.I., Kamnev E.N. [et. al.]. “Globus-1”: Radioactive contamination and the project of the remediation of the plot. Bezopasnost zhiznedeyatelnosti. Okhrana truda i okruzhayushchey sredy = Life Safety. Labor and environmental protection. 2009, No. 1, pp. 82-86. (In Russian)
5. Kasatkin V.V. [et. al.]. Georadioecological problems of the peaceful nuclear explosions – locations of the special radioactive waste. Atomnaya energiya = Atomic Energy. 2012, Vol. 113, No. 5, pp. 289-293. (In Russian)
6. Kasatkin V.V. [et. al.]. Steps of the transition of the object of the peaceful use of the nuclear explosion “Globus-1” into the location of the storage of the special radioactive wastes. Atomnaya energiya = Atomic Energy. 2014, Vol. 116, No. 3, pp. 157-161. (In Russian)
7. Special radioactive waste. Ed. I.I. Linge. Moscow, 2015, 240 p. (In Russian)
8. Ramzaev V.P., Repin V.S., Khramtsov E.V. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2009;2(2):27-33. (In Russian)
9. Ramzaev V.P., Medvedev A.Y., Repin V.S., Timofeeva M.A., Khramtsov E.V. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to the critical groups of population. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2010;3(1):33-39. (In Russian)
10. International Commission on Radiation Units and Measurements: Report 53. Gamma-ray spectrometry in the environment / ICRU, 1994.
11. Radiation-hygienic survey of the territories, adjacent to the sites of the peaceful nuclear explosions with the surface

Evgeniy V. Khramtsov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: zhenia.khramtzov2013@yandex.ru

- contaminations with radionuclides and the development of the criteria and conditions of the safety of the public. Report on the scientific-research work. №IKRBS 02.2.00950764. Archives of the Institute of Radiation hygiene. 2008, 183 p. (In Russian)
12. Scientific-methodical support of the actions on the provision of the radiation safety of the public on the territories of the peaceful nuclear explosions. Report on the scientific-research work. №IKRBS 02201457300. Archives of the Institute of Radiation hygiene. 2014, 164 p. (In Russian)
13. Khramtsov E.V. [et al.] Radiation situation in the area of peaceful nuclear explosion «Globus-1» before completing rehabilitation in 2014. In the book: Chernobyl-30 years later. Radiation-hygienic aspects of overcoming the consequences of the Chernobyl accident. Abstracts of the international scientific-practical Conference. 2016, pp. 188-190 (in Russian).
14. Khramtsov E.V. [et al.] Radiation-hygienic assessment of the territories adjacent to the places of peaceful nuclear explosions. Contemporary problems of radiation medicine: from science to practice (Gomel, 26-27 April 2018) international scientific-practical Conference/AGG. Ed. Dr. med. Sciences, associate professor. A.V. Rozhko. – Gomel, the Republican Scientific and practical Center for radiation medicine and human ecology. Gomel: Department Republican, 2018, pp. 81-82 (in Russian).

Received: March 19, 2019

For correspondence: Evgeniy V. Khramtsov – Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: zhenia.khramtzov2013@yandex.ru)

For citation: Khramtsov E.V. Radiation situation on the territory of the peaceful nuclear explosion “Globus-1” before performing the rehabilitation works. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 81-88. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2-81-88

Подготовка медицинского персонала МЧС России к реагированию на радиационные аварии с использованием дистанционного обучения

В.Ю. Рыбников, В.А. Тарита, К.К. Рогалев

Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Несмотря на значительные усилия и серьезные достижения в обеспечении радиационной безопасности, сохраняются риски возникновения радиационных инцидентов мирного и военного времени. Особенности воздействия ионизирующего излучения на организм человека и клиника лучевой патологии определяют специфику организации медицинской помощи. Важнейшей составляющей обеспечения готовности медицинских учреждений и формирований различных министерств и ведомств к реагированию на чрезвычайные ситуации радиационного характера является подготовка медицинского персонала (организаторов здравоохранения и врачей лечебно-диагностического профиля) по вопросам радиобиологии, клинической радиологии, радиационной гигиены на этапе дополнительного профессионального образования (повышение квалификации). Необходимость экономии финансовых средств и времени обосновывает актуальность применения технологий дистанционного (электронного) обучения. В институте дополнительного профессионального образования Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова разработана и включена в Систему дистанционного обучения медицинского персонала образовательная программа повышения квалификации «Подготовка медицинского персонала МЧС России к оказанию помощи пострадавшим при радиационных авариях». Программа состоит из учебно-методического комплекса и электронного образовательного ресурса, которые содержат все учебно-методические и информационные материалы для обеспечения эффективной работы слушателей. Основная часть программы реализована дистанционно с обязательным входным и промежуточным контролем, а заключительная очная часть включает семинары, практические занятия и итоговую аттестацию с выдачей удостоверения о повышении квалификации.

Ключевые слова: радиационные аварии, ионизирующее излучение, готовность к реагированию на чрезвычайные ситуации, подготовка медицинского персонала, дистанционное обучение.

В соответствии с новой Военной доктриной Российской Федерации среди прогнозируемых внешних опасностей государства впервые выделена реальность угрозы проведения терактов с применением радиоактивных веществ [1]. При этом сохраняются риски возникновения радиационных инцидентов мирного и военного времени.

По материалам регистра радиационных инцидентов ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна [2], за период с 1949 по 2014 г. на территории бывшего СССР, в том числе в РФ, произошло 349 радиационных аварий, сопровождавшихся облучением людей. Среди пострадавших 748 человек имели клинически значимые лучевые поражения. Диагноз острой лучевой болезни (ОЛБ), в том числе отягощенной местными лучевыми поражениями (МЛП), верифицирован у 352 человек, из них у 100 была диагностирована ОЛБ тяжелой и крайне тяжелой степени. В первые 3–4 месяца после облучения погибло в общей сложности 70 человек. У 396 человек имелись только МЛП.

Особенности воздействия ионизирующего излучения на организм человека и клиника лучевой патологии определяют специфику организации медицинской помощи. Экстренность медицинских мероприятий обусловлена необходимостью устранения дальнейшего воздействия ионизирующего излучения, оценки величины дозы, купирования первичной реакции и организации эвакуации пораженных в специализированный стационар. Указанный комплекс мероприятий может быть выполнен только квалифицированным подготовленным персоналом. Имеющаяся в стране система медицинского обслуживания радиационно-опасных производств в составе Федерального медико-биологического агентства позволяет эффективно решать эти задачи. Однако на уровне медицинских организаций (больниц, центров и госпиталей) врачебный и средний медицинский персонал не только не имеет достаточных знаний и опыта диагностики и лечения лучевых поражений, но и весьма приблизительно

Рыбников Виктор Юрьевич

Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова.

Адрес для переписки: 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 4/2; E-mail: rvikirina@mail.ru

но представляет организацию санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий при радиационных авариях.

Кроме того, как показала проводившаяся в рамках научно-исследовательской работы оценка фактической готовности территориальных органов здравоохранения ряда субъектов Северо-Западного федерального округа к оказанию медицинской помощи пострадавшим при чрезвычайных ситуациях радиационного характера [3], медицинские организации не готовы к приему и оказанию помощи пострадавшим от воздействия радиации – отсутствуют санпропускники, средства дезактивации и индивидуальной защиты, дозиметрическая аппаратура, лекарственные препараты и средства, необходимые для оказания скорой и специализированной медицинской помощи при радиационных поражениях, а главное – нет подготовленных специалистов по радиационной медицине среди врачебного и среднего медицинского персонала.

Важнейшей составляющей обеспечения готовности медицинских учреждений и формирований различных министерств и ведомств к реагированию на радиационные аварии является подготовка медицинского персонала (организаторов здравоохранения и врачей лечебно-диагностического профиля) по вопросам радиобиологии, клинической радиологии, радиационной гигиены на этапе дополнительного профессионального образования (повышение квалификации).

Исходя из изложенного, очевидно, что в настоящее время имеется высокая потребность в повышении квалификации медицинского персонала (врачей, среднего медицинского персонала, специалистов органов здравоохранения, научно-педагогических кадров) по проблемам радиационной медицины и подготовки к реагированию на радиационные аварии.

С этой целью в институте дополнительного профессионального образования (ИДПО) Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова (ФГБУ ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова) на кафедре безопасности жизнедеятельности, экстремальной и радиационной медицины разработана и реализована в системе повышения квалификации медицинского персонала МЧС России образовательная программа «Подготовка медицинского персонала МЧС России к оказанию помощи пострадавшим при радиационных авариях». Программа предназначена для медицинского (врачебного) персонала, имеющего высшее профессиональное образование по специальностям «Лечебное дело», «Лечебно-профилактическое дело», на базе которых совершенствуются профессиональные компетенции, предусмотренные приказом Минобрнауки от 9 февраля 2016 г. № 95 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 31.05.01 «Лечебное дело» (уровень специалитета)», а именно:

- «способность и готовность к проведению противоэпидемических мероприятий, организации защиты населения в очагах особо опасных инфекций, при ухудшении радиационной обстановки, стихийных бедствиях и иных чрезвычайных ситуациях (ПК-3)»;

- «готовность к участию в оказании медицинской помощи при чрезвычайных ситуациях, в том числе участие в медицинской эвакуации (ПК-13)»;

- «способность к организации медицинской помощи при чрезвычайных ситуациях, в том числе медицинской эвакуации (ПК-19)».

Необходимость экономии финансовых средств и времени определяют актуальность применения технологий дистанционного (электронного) обучения с проведением очной итоговой аттестации на завершающем этапе. Поэтому программа включена в Систему дистанционного обучения медицинского персонала МЧС России (www.idpo.ncserm.ru) и состоит из учебно-методического комплекса (УМК) (рис.) и электронного образовательного ресурса (ЭОР). ЭОР включает видеолекции, интерактивные семинары, вебинары, электронные учебные пособия, системы входного, промежуточного и итогового контроля и т.п.).



Рис. Электронный учебно-методический комплекс (главная страница)

[Fig. Digital training complex (main page)]

УМК содержит комплект материалов, включающий учебную, учебно-методическую, нормативную, справочно-библиографическую и иную литературу, информационные ресурсы, иллюстративные и другие материалы, аудиторное и самостоятельное изучение которых дает возможность обеспечения эффективной работы слушателей по всем видам занятий в соответствии с требованиями программы дополнительного профессионального образования и учебного плана, а также фонд оценочных средств.

Слушатели во время работы с УМК имеют возможность внимательно и тщательно изучать теоретический материал и проверить уровень усвоения теоретического материала с помощью контрольных вопросов и тестов по каждой теме и по курсу в целом.

Для участия в дистанционном этапе обучения слушатели должны иметь персональный компьютер с выходом в интернет и предоставить администратору программы свой электронный адрес, на который получают индивидуальный пароль для входа в УМК, где содержатся подробная инструкция по алгоритму действий и практические советы слушателям по самостоятельному изучению материала. Для решения возникающих методических вопросов с администратором программы поддерживается телефонная и электронная связь.

Лекции тематически сгруппированы. К каждой лекции разработаны контрольные вопросы, на которые слуша-

тель имеет возможность ответить неограниченное количество раз. Для изучения группы тем установлены временные пределы и промежуточный тестовый контроль, что дистанционно контролируется администратором программы.

Основными видами тестового контроля в УМК являются тесты входного (предварительного, базисного), текущего и итогового уровня.

Входной (предварительный) контроль необходим для выявления базисных знаний и умений слушателей, т.е. исходного уровня их подготовки.

Текущий или промежуточный контроль направлены на коррекцию обучения, т.к. устанавливает обратную связь, информирующую преподавателя о ходе процесса усвоения материала.

Итоговый контроль осуществляется при завершении цикла обучения и состоит из определения степени усвоения программы и сформированности компетенций.

Основная часть программы повышения квалификации (70%) реализована дистанционно. В программу дистанционного этапа обучения включены 10 лекций и две видеолекции (табл.).

Заключительная очная часть включает семинары, практические занятия (работа с дозиметрическими приборами, организация приема в клинику ВЦЭРМ радиационно пораженных и их санитарную обработку) и итоговую аттестацию, при положительном результате которой осуществляется выдача удостоверения о повышении квалификации.

Внедрение УМК позволяет эффективно управлять образовательным процессом, создает объективные ус-

ловия для полноценного самостоятельного освоения слушателями учебного материала и способствует совершенствованию ранее полученных компетенций.

Для самостоятельной работы слушателей на заключительном (очном) этапе оборудован специализированный учебный класс, в котором, кроме компьютеров с индивидуальным доступом к УМК, размещены стенды с информацией по изучаемой дисциплине, медицинские укладки и манекены с комплектами средств индивидуальной защиты. Также разработан и создан мобильный комплект учебных стендов и информационно-методических средств обучения для проведения выездных занятий.

В качестве основной рекомендованной литературы используются разработанные и изданные во ВЦЭРМ учебное пособие «Радиационная медицина» [4] и методические рекомендации «Реагирование медицинских учреждений МЧС России на радиологические аварийные ситуации» [5], в которых обобщен опыт реагирования ведущих учреждений ФМБА, МЧС и Министерства обороны России.

В 2017–2018 гг. повышение квалификации по образовательной программе прошли 20 сотрудников медицинских служб и учреждений МЧС России и Республики Беларусь. По результатам анонимного анкетирования после обучения с использованием дистанционного обучения большинство из них (~ 90%) отметили удовлетворенность такой формой обучения, а также содержанием и оформлением программы и учебного материала.

Экономическая эффективность данной формы обучения, не включая первоначальные затраты на разработку

Таблица

Лекции дистанционного обучения

[Table

Lessons of the remote education]

Лекция 1 [Lecture 1]	Физические основы радиационной медицины [Physical basic of the radiation medicine]
Лекция 2 [Lecture 2]	Природное, техногенное и медицинское облучение [Natural, man-made and medical exposure]
Лекция 3 [Lecture 3]	Чрезвычайные ситуации радиационного характера [Radiation emergency situations]
Лекция 4 [Lecture 4]	Гигиеническая регламентация облучения человека [Hygienic regulation of the exposure of a human]
Лекция 5 [Lecture 5]	Радиационная безопасность при использовании источников ионизирующих излучений в медицине [Radiation safety in medicine]
Лекция 6 [Lecture 6]	Биологическое действие ионизирующего излучения [Biological effects of medical exposure]
Лекция 7 [Lecture 7]	Радиационные поражения человека [Human radiation injuries]
Лекция 8 [Lecture 8]	Профилактика и лечение радиационных поражений [Prophylactics and treatment of the radiation injuries]
Лекция 9 [Lecture 9]	Организация санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий при радиационных авариях [Management of the sanitary-hygienic and general health actions in radiation accidents]
Лекция 10 [Lecture 10]	Учет и экспертиза лиц, пострадавших от радиационного воздействия [Accounting and expertise of the victims of the radiation exposure]
Видеолекция [Video lecture]	Работа с дозиметрическими приборами [The use of dosimetry equipment]
Видеолекция [Video lecture]	Применение средств индивидуальной защиты (СИЗ) кожных покровов и органов дыхания [Application of the personal protective gear of the skin and respiratory organs]

электронной версии (электронно-информационной системы) УМК, заключается в том, что основная часть повышения квалификации медицинского персонала с использованием УМК в составе системы дистанционного обучения проводится заочно, что позволяет значительно сократить командировочные расходы (на проживание, суточные). Имеется опыт проведения заключительной (очной) части и итоговой аттестации повышения квалификации с выездом преподавателей в медицинскую организацию.

Система дистанционного обучения позволяет существенным образом повысить уровень профессиональных знаний и навыков медицинского персонала МЧС России к действиям по защите личного состава и населения в случае возникновения радиационных аварий.

Литература

1. Военная доктрина Российской Федерации, 2014. rg.ru/2014/12/30/doctrina-dok.html. (дата обращения 14.09.2018 г.)

2. Самойлов, А.С. Ближайшие медицинские последствия радиационных инцидентов на территории бывшего СССР и Российской Федерации (1992-2014гг.) / А.С. Самойлов, А.Ю. Бушманов, В.Ю. Соловьев // Медико-биологические проблемы токсикологии и радиобиологии: Тезисы докладов Российской научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 4-6 июня 2015 г. – СПб: Фолиант, 2015. – С.12.
3. Повышение готовности органов управления и сил территориальных подсистем РСЧС по оказанию медицинской помощи пострадавшим при чрезвычайных ситуациях радиационного характера: отчет о НИР. – СПб., ВЦЭРМ МЧС России, 2006. – 30 с.
4. Радиационная медицина: учебное пособие в 3-х частях / под. ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка; ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России. – СПб.: Политехника-сервис, 2013.
5. Реагирование медицинских учреждений МЧС России на радиологические аварийные ситуации: методические рекомендации. – СПб: ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России, 2016. – 138 с.

Поступила: 09.10.2018 г.

Рыбников Виктор Юрьевич – доктор медицинских наук, доктор психологических наук, профессор, заслуженный деятель науки России, заместитель директора по научной и учебной работе Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России. **Адрес для переписки:** 194044, Россия, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 4/2; E-mail: rvikirina@mail.ru

Тарита Вольдемар Андреевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий – ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории спектрометрии излучений человека Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Рогалев Константин Константинович – доктор медицинских наук, главный врач клиники № 1 Всероссийского центра экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Рыбников В.Ю., Тарита В.А., Рогалев К.К. Подготовка медицинского персонала МЧС России к реагированию на радиационные аварии с использованием дистанционного обучения // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 89-93. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2 -89-93

Training of medical personnel of EMERCOM of Russia to respond to the emergency situations of radiation nature using the distance learning

Viktor Yu. Rybnikov, Voldemar A. Tarita, Konstantin K. Rogalev

The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russia

Despite considerable efforts and significant developments in radiation safety, the risks of radiation incidents in peacetime and wartime remain. Aspects of the ionizing radiation impact on the human body and the clinic of radiation pathology determine the specifics of medical care organization. The most important component of ensuring the readiness of medical institutions and establishments of various ministries and departments to respond to radiation emergencies is the training of medical personnel (health care organizers and doctors of diagnostic and treatment specialty) on radiobiology, clinical radiology, radiation hygiene during

Viktor Yu. Rybnikov

The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia.

Address for correspondence: Academica Lebedeva Str., 4/2, St. Petersburg, 194044, Russia; E-mail: rvikirina@mail.ru

the additional professional education (advanced training). The need for financial and time savings proves the relevance of the use of distance (online) learning technologies. The Institute of Additional Professional Education of the Federal State Budgetary Institution "The Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine" Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters has developed the educational program of professional development "Training of medical personnel of EMERCOM of Russia to assist victims of radiation accidents". The program is included in the System of distance learning of the medical personnel. The program consists of educational and methodical facilities and electronic educational resource, which contain all teaching material and other content to ensure the effective work of students. The main part of the program is implemented remotely with mandatory entrance and intermediate control, and the final on-site part includes seminars, workshops and final certification.

Key words: radiation accident, ionizing radiation, readiness to respond to emergency situations, training of medical personnel, distance learning.

References

1. Military doctrine of the Russian Federation. 2014. – Available from: rg.ru/2014/12/30/doctrina-dok.html (Accessed: 14.09.2018) (In Russian).
2. Samoylov A.S., Bushmanov A.Yu., Soloviev V.Yu. The nearest medical consequences of radiation incidents in the territory of the former USSR and the Russian Federation (1992-2014). Mediko-biologicheskie problemy toksikologii i radiobiologii: Tezisy dokladov Rossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Medical and biological problems of toxicology and radiobiology: Abstracts of the Russian scientific conference with international participation. St. Petersburg, June 4-6, 2015, Foliant Publ., 2015, 12 p. (In Russian).
3. Elevation of the preparedness of the regulatory bodies and forces of the territorial subsystems of the RSCHS for the delivery of the health care for the victims of the radiation emergency situations: report on the scientific-research work. Saint-Petersburg, VCERM MChS of Russia, 2006, 30 p. (In Russian).
4. Radiation medicine: a handbook in three parts. Ed. By S.S. Aleksanin, A.N. Grebenyuk: VCERM after A.M. Nikiforov of MChS of Russia, Saint-Petersburg, Polytechnica-servis, 2013. (In Russian).
5. Response of medical institutions of EMERCOM of Russia to radiological emergencies: guidelines. Edited by S.S. Aleksanin. St. Petersburg, NRCERM EMERCOM of Russia, 2016, 138 p. (In Russian).

Received: October 09, 2018

For correspondence: Viktor Yu. Rybnikov – Doctor of medical science, doctor of psychological science, professor, Deputy Director (Science and Education) of Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia (4/2 Academica Lebedeva Str., St. Petersburg, 194044, Russia; E-mail: rvikirina@mail.ru)

Voldemar A. Tarita – Candidate of medical science, Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Human Radiation Spectrometry, Leading Researcher, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russia

Konstantin K. Rogalev – Doctor of medical science, Head Physician, Clinics N 1, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, St. Petersburg, Russia

For citation: Rybnikov V.Yu., Tarita V.A., Rogalev K.K. Training of medical personnel of EMERCOM of Russia to respond to the emergency situations of radiation nature using the distance learning. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 89-93. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-89-93

Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения

С.М. Киселев¹, А.М. Маренный², В.В. Романов³

¹ Государственный научный центр Российской Федерации - Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

² Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

³ Федеральное медико-биологическое агентство России, Москва, Россия

В настоящее время в Российской Федерации инициирован процесс переработки действующих национальных регулирующих документов (НРБ и ОСПОРБ) в области радиационной безопасности. В связи с этим авторы считают актуальным ознакомить научную общественность с необходимостью внесения в действующие НРБ-99/2009 изменений, касающихся регулирования защиты населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения, в первую очередь — радиоактивного газа естественного происхождения — радона. Суть этих изменений связана с необходимостью внедрения в практику регулирования защиты населения от облучения радоном современных подходов, изложенных в Публикациях 103, 115, 126 МКРЗ и «Международных основных нормах безопасности» (ОНБ), опубликованных МАГАТЭ в 2014 г. В этом аспекте представлены конкретные предложения по совершенствованию нормативно-правовой базы регулирования защиты населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения, учет которых в перерабатываемых НРБ позволит реализовать в России комплекс мероприятий по снижению облучения населения радоном в свете современных рекомендаций МКРЗ, ВОЗ и МАГАТЭ, а также требований утвержденных Президентом Российской Федерации Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. и дальнейшую перспективу.

Ключевые слова: НРБ; нормирование, природные источники излучения, радон, торон, эквивалентная равновесная объемная активность, объемная активность, региональный референтный уровень, ситуация существующего облучения, регулирование, МАГАТЭ, МКРЗ, НКДАР ООН.

Введение

Методология регулирования радиационной безопасности населения при воздействии природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) основана на оценках эффектов облучения человека естественной радиацией, а также принципах радиационной защиты от ионизирующего излучения, установленных международной практикой регулирования. Данные положения используются государствами для формирования нормативно-правовой базы обеспечения радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ, основной вклад в которое вносят радон и дочерние продукты его распада [1]. При этом учитываются национальные особенности каждой страны, среди которых приоритетное значение имеет оценка масштабов облучаемости населения ПИИИ [2].

В Российской Федерации, согласно информации Федерального банка данных (ФБДОПИ), организованного при НИИ радиационной гигиены имени П.В. Рамзаева, за период 2001–2017 гг. повышенному (свыше 5 мЗв/год)

облучению ПИИИ подвергается население численностью более 7 млн чел., проживающее на территории 6 субъектов РФ [3]. Согласно другой оценке, основанной на более консервативном подходе, эта численность составляет около 2 млн чел. [4]. В 19 субъектах РФ выявлены отдельные группы населения (около 44 тыс. чел.), облучающиеся в дозах свыше 10 мЗв/год [5]. Очевидно, что в соответствии с этими оценками существенная часть населения страны попадает в категорию лиц, имеющих потенциальный риск возникновения канцерогенных эффектов, связанный с воздействием естественной радиации, среди которых радон играет ведущую роль.

Действующая в настоящее время в стране достаточно эффективная система нормативно-методического регулирования в сфере обеспечения радиационной безопасности при облучении ПИИИ [1, 2], в основном, опирается на научные оценки НКДАР ООН, представленные в докладе 1993 г. [6], и Международные основные нормы безопасности МАГАТЭ 1996 г. [7]. Эти документы по сути

Киселев Сергей Михайлович

Государственный научный центр Российской Федерации, Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна Федерального Медико-Биологического Агентства России

Адрес для переписки: 123098, Москва, ул. Живописная, 46. Тел.: +7 (985) 761-10-17; E-mail: sergbio@gmail.com

впервые обозначили важность проблемы обеспечения защиты населения от радона и определили базовый подход к ее регулированию. Позиционированный международным сообществом механизм регулирования радоновой проблемы был поддержан регулирующими органами в разных странах мира и инициировал целый ряд национальных проектов, нацеленных на выявление масштабов проблемы и разработку мероприятий по защите наиболее облучаемых групп населения [2,8]. Методология защиты населения от облучения радоном была постулирована в Публикации 65 МКРЗ [9] и основана на установлении границы между опасным и безопасным воздействием радона, а философия радиационной защиты в целом опиралась на подход, постулированный в Публикации 60 МКРЗ [10].

Вместе с тем, новые научные оценки, выполненные НКДАР ООН [11, 12] по результатам современных эпидемиологических исследований [13–22], показали несовершенство данного подхода и отсутствие четко выраженного порога воздействия радона на организм человека. Базируясь на этих научных данных, а также на новой системе радиационной защиты, постулированной в Публикации 103 МКРЗ [23], был сформулирован современный подход к регулированию радоновой проблемы, который предусматривает решение двух взаимосвязанных ключевых задач: уменьшение как доли лиц, подвергающихся неприемлемо высоким индивидуальным рискам, связанным с радоном (первоочередная задача), так и среднего значения индивидуального радонового риска для всего населения страны (долгосрочная перспектива) [24, 25]. Основываясь на рекомендациях МКРЗ, МАГАТЭ в 2014 г. были изданы «Международные основные нормы безопасности» (ОНБ), в соответствии с которыми (часть 3 ОНБ, Требование 50 «Облучение населения радоном в помещении») правительства государств-членов МАГАТЭ должны предоставить информацию о радоне в помещении и связанных с ним рисках для здоровья, оценить выявленную ситуацию существующего облучения и установить соответствующие референтные уровни (п. 52. Основные стандарты безопасности), а также при необходимости подготовить и внедрить план действий по контролю за облучением населения радоном в помещениях [26].

Механизм совершенствования нормативно-правовой базы регулирования радиационной безопасности населения

Следуя принятой в Российской Федерации практике внедрения международных рекомендаций в отечественные регулирующие документы, логическим шагом является внесение в определенной последовательности указанных изменений в документы всех уровней существующей в стране иерархии нормативно-правовой базы обеспечения радиационной безопасности населения. В первую очередь современные рекомендации международных организаций должны найти отражение в утверждаемых Президентом Российской Федерации Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации. Реализация утвержденных Основ потребует внесения изменений в соответствующие федеральные законы и нормы радиационной безопасности и формирования на этой базе в стране адекватных мер в сфере

обеспечения ядерной и радиационной безопасности, одной из которых является рекомендованный МАГАТЭ план действий [27, 28] по контролю за облучением населения радоном в помещениях, изложенный нами ранее в ряде публикаций [1, 2].

Проблема облучения населения радоном в Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 г.

В октябре 2018 г. Президентом Российской Федерации утверждены Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. и дальнейшую перспективу (далее – Основы). В отличие от предыдущей версии, в утвержденном документе подчеркивается, что Основы являются документом стратегического планирования (такой формулировки в прежних Основах не было).

Относительно радиационной безопасности при облучении населения ПИИИ, в том числе радоном, в документе констатируется, что одной из основных проблем в данной области является «наличие в Российской Федерации групп населения с повышенными и высокими уровнями радиоактивного облучения вследствие воздействия природных радионуклидов». Поэтому в целях государственной политики на период до 2025 г. и дальнейшую перспективу предусмотрено «уменьшение опасного воздействия радиационных факторов на население, проживающее на территориях с повышенным уровнем естественного радиационного фона».

Кроме того, в Основах определены основные направления деятельности по обеспечению радиационной безопасности населения при облучении естественной радиацией. Это «совершенствование государственного контроля (надзора) за воздействием на здоровье человека ПИИИ, в том числе радона и продуктов его распада, в жилых домах, детских учреждениях, общественных и производственных зданиях» и «поддержание на возможно низком уровне доз облучения населения, подвергающегося воздействию радиационных факторов за счет природных источников излучения, в том числе радона и продуктов его распада». Указанные в Основах направления определяют стратегию планирования мероприятий по совершенствованию нормативно-правовой базы регулирования радиационной безопасности населения при облучении ПИИИ, в том числе природным радиоактивным газом радоном. Ориентируясь на современные рекомендации МКРЗ и стандарты безопасности МАГАТЭ [23, 24, 26–28], следует констатировать, что впервые обозначенное в Основах направление деятельности по поддержанию на возможно низком уровне доз облучения населения при воздействии радона и продуктов его распада связано с решением двух ранее упомянутых взаимосвязанных ключевых задач. Первая – это уменьшение доли лиц, проживающих на радоноопасных территориях и подвергающихся неприемлемо высоким индивидуальным рискам, связанным с радоном, вторая – уменьшение среднего значения индивидуального радонового риска для всего населения страны. Плановое решение обеих задач позволит достичь конечной цели радоновой

стратегии – снизить заболеваемость и смертность населения от радон-индуцированных раков лёгкого [29–35], доля которых лежит в диапазоне от 3 до 14% от общего числа всех раков лёгкого [13].

Решение этой достаточно амбициозной задачи требует разработки комплекса мероприятий, реализация которых носит, как показывает мировой опыт [36, 37], долгосрочный характер и должна последовательно осуществляться программно-целевым методом на основе современных рекомендаций международных организаций [26–28] с учетом сложившихся в стране социально-экономических условий. Первым шагом в ее решении, определяющим суть и характер мероприятий по снижению облучения населения радоном, должно стать совершенствование отечественной нормативно-правовой базы в данной области. Учитывая, что в настоящее время осуществляется процесс переработки действующего национального регулирующего документа в области радиационной безопасности НРБ-99/2009, представляется актуальным рассмотреть принципиальные изменения, которые, на наш взгляд, необходимо внести в указанный документ.

Предложения по внесению изменений в НРБ. Внедрение ситуационного подхода к радиационной защите

В действующих НРБ-99/2009 положения, касающиеся ограничения облучения населения радоном и его ДПР, предусматривают установление ограничений, выраженных в показателях среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Установление требований не превышения установленной величины по сути определяет необходимость ограничения уровней облучения населения в пределах этих показателей, которые рассматриваются как уровни действия. Представленная в существующих НРБ-99/2009 методология защиты населения от радона опиралась на международные рекомендации МКРЗ (Публикация 65 1993 г.), основой для разработки которых являлись эпидемиологические исследования когорт шахтеров урановых рудников.

Учитывая это, позиционировался подход к регулированию радоновой проблемы, применимый в большей степени к персоналу, нежели к населению. В его основе лежало представление, что воздействие радона ниже установленного «норматива» является безопасным, и меры по снижению содержания радона в помещениях рекомендовались только в случае превышения уровней действия. Вместе с тем, современные результаты эпидемиологических исследований показывают, что не существует известного порога объемной активности (ОА), ниже которого радоновое облучение не представляет никакой опасности, а риск рака легкого возрастает статистически значимо даже при умеренных значениях объемной активности радона в жилых помещениях на уровне 50–100 Бк/м³ [11, 13, 22].

Таким образом, в первую очередь изменения в регулировании радоновой проблемы связаны с внедрением ситуационного подхода к радиационной защите, постулированного МКРЗ в 2007 г. и утвержденного МАГАТЭ в ОНБ 2014 г. [23–26]. В частности, в перерабатываемые НРБ

должно быть внесено понятие о трех ситуациях облучения человека: планового, аварийного и существующего, а также обсуждены механизмы регулирования радиационной безопасности в каждой ситуации облучения.

Облучение населения радоном и дочерними продуктами его распада в эксплуатируемых жилых и общественных учреждениях относится к ситуации существующего облучения. Принципы регулирования данной ситуации облучения базируются на установлении референтных уровней и применении принципа оптимизации при принятии и реализации соответствующих мер защиты. Механизм реализации регулирования ситуации существующего облучения носит итерационный характер. Он заключается в планировании, организации и проведении долгосрочных мероприятий по постепенному уменьшению концентрации радона в жилищах и периодическому пересмотру референтных уровней в сторону их уменьшения [23, 24, 38].

Производственное облучение персонала радоном, не связанное с профессиональной деятельностью, также относится к ситуации существующего облучения. В тех ситуациях, когда работник облучается радоном в результате производственной деятельности, особенности регулирования радиационной безопасности будут определяться отнесением к той или иной ситуации облучения (плановой или существующей). Эти вопросы требуют отдельной научной дискуссии и не являются предметом рассмотрения в настоящей статье.

Референтный уровень вместо уровня действия. Региональные референтные уровни

При рассмотрении облучения населения радоном как ситуации существующего облучения, а также учитывая новые научные данные эпидемиологических исследований в этой области, в перерабатываемом документе необходимо установление иных, нежели уровни действия, радиологических критериев, а именно референтных уровней. В отличие от концепции уровней действия, ориентированной на недопущение превышения нормируемой величины и индивидуальных рисков от радона и дочерних продуктов его распада, референтный уровень представляет собой уровень дозы, риска или концентрации радионуклидов, допущение превышения которого при планировании считается неприемлемым, а ниже которого должна осуществляться оптимизация защиты. Следствием применения подхода к регулированию на основе референтного уровня является то, что оптимизация должна применяться как оправданная мера не только при превышении этого уровня, но и в ситуациях, когда фактические уровни ниже референтного. Таким образом, философия референтного уровня определяет основную стратегию современного регулирования радоновой проблемы, которая заключается не только в снижении индивидуальных рисков от радона для наиболее облучаемых лиц, но и в направленности на последовательное снижение общего коллективного риска для всего населения.

Для таких больших стран, как Россия, характерно наличие многих климатических зон, территорий с существенно различающимися геолого-геофизическими условиями [39], а также существенно отличающийся состав жилого фонда и разнообразие преобладающих строительных материалов и технологий. Всё вместе приводит к весьма неоднородному распределению интервала зна-

чений и средних значений объемной активности радона в помещениях населенных пунктов различных регионов России. Средние по субъектам Российской Федерации уровни облучения за счет радона различаются более чем на порядок [1–3, 5].

Поэтому установление в Российской Федерации единого национального референтного уровня (в качестве единственной нормируемой величины), с точки зрения оптимизации защиты, вряд ли является обоснованным. Очевидно, что защита населения от облучения радоном, основанная на установленном едином референтном уровне ОА радона, более эффективна в регионах с высоким уровнем радона и менее эффективна в регионах, в которых вероятность превышения референтного уровня относительно невелика. Вследствие этого цель оптимизации защиты населения от воздействия радона не будет достигнута, так как не приведет к заметному снижению смертности от рака легкого, индуцированного радоном [13].

Принимая во внимание значительные различия регионов РФ по факторам, определяющим содержание радона в зданиях, и по дозовой нагрузке на население, а также с экономической точки зрения, целесообразным и обоснованным является установление региональных референтных уровней, методология установления которых должна быть представлена в документах, развивающих положения основного документа – Норм радиационной безопасности. В частности, установление количественных значений региональных референтных уровней в качестве опорных критериев оптимизации должно основываться на результатах региональных радоновых обследований. Одним из подходов к оптимизации защиты от радона на региональном уровне является рассмотрение в качестве регионального референтного уровня величины ОА радона, соответствующей 90-му процентилю ОА радона в группе зданий. Такой подход будет обеспечивать снижение доз облучения до реально достижимого уровня. Вместе с тем, в НРБ представляется целесообразным в качестве национального референтного уровня определить верхнюю границу оптимизации, соответствующую значению объемной активности радона при сдаче зданий в эксплуатацию.

Таким образом, внесение предложенных изменений в действующие НРБ-99/2009 является необходимым шагом, определяющим в конечном итоге оптимальный вариант комплекса мероприятий по реализации утвержденных Основ государственной политики в части обеспечения радиационной безопасности населения от воздействия природных источников ионизирующего излучения. Внедрение данной философии регулирования в отношении облучения населения ПИИИ соответствует современным рекомендациям МКРЗ и МАГАТЭ и создает основу для реализации стратегии защиты населения от воздействия естественной радиации, целью которой в долгосрочной перспективе является снижение риска заболеваемости раком легкого.

Выбор нормируемого показателя облучения населения радоном и дочерними продуктами его распада. ЭРОА или ОА?

Одним из основных элементов процесса оптимизации в ситуациях существующего облучения является выбор количественных значений референтных уровней годовой

дозы и/или производных референтных уровней (измеряемых радиационных показателей). Диапазон этих значений, рекомендованных МКРЗ и МАГАТЭ для различных ситуаций существующего облучения, лежит в интервале 1–20 мЗв.

Российская Федерация является одной из немногих стран, в которых нормирование содержания радона в жилищах осуществляется не по объемной активности радона, а по среднегодовой ЭРОА изотопов радона.

С одной стороны, выбор нормируемой величины в показателях ЭРОА является логичным в связи с тем, что непосредственно на человека воздействуют именно короткоживущие дочерние продукты радона, оседающие в респираторном тракте и облучающие ткани легкого. Преимуществом использования ЭРОА радона в нормировании воздействия радона является то, что эта величина напрямую связана с дозой облучения, тогда как при переходе от объемной активности радона к величине эффективной дозы необходимо дополнительно учитывать сдвиг равновесия между радоном и дочерними продуктами.

Однако среднегодовое значение ЭРОА радона практически не может быть напрямую измерено, особенно при широкомасштабных обследованиях существующими техническими средствами измерений. В связи с этим возникает ситуация, когда нормируется величина, которую нельзя измерить непосредственно.

Представляется целесообразным в новой редакции НРБ референтный уровень для жилых и общественных зданий установить, следуя рекомендациям международных организаций, в единицах ОА радона. В пользу этого предложения, помимо известных обоснований такого подхода [13, 24], нужно принять во внимание то обстоятельство, что корректные оценки среднегодовых уровней концентрации радона (а следовательно, и доз облучения радоном) могут быть сделаны только на основании результатов прямых длительных (вплоть до года) измерений средней ОА радона интегральным методом. На это указывается в методических документах и многократно подтверждено в отечественной практике.

Следует подчеркнуть, что идея данного предложения заключается не просто в замене одного показателя на другой. Авторы статьи полагают, что это позволит интенсифицировать практику применения методов интегральной дозиметрии для достоверного определения среднегодовой активности радиоактивного газа в воздухе помещений. По нашему мнению, логика дальнейшего направления совершенствования регулирования защиты населения от радона диктует необходимость развития целевых и более детальных радоновых обследований в «проблемных» регионах, которые удалось выявить, основываясь на многолетнем сборе данных по всей стране в рамках функционирования ЕСКИД. Эти исследования могут быть выполнены с применением методов интегральной дозиметрии, целесообразность применения которой отмечена в Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. и дальнейшую перспективу. Более того, это формирует идейную основу для формирования современной национальной программы по снижению облучения населения от источников природного облучения.

Наряду с вышеизложенным, при рассмотрении вопроса о нормируемом параметре следует принимать во внимание сложившуюся практику надзора и аппаратно-методическое обеспечение в области защиты населения от природных источников облучения.

Поэтому вопрос о внесении изменений в перерабатываемые НРБ в части использования среднегодовой объемной активности радона в качестве нормируемого показателя является дискуссионным и требует обсуждения в среде специалистов в означенной области. Возможно, оптимальным решением этого вопроса будет установление срока полного перехода на уровень в терминах ОА радона. В течение этого срока должна быть подготовлена соответствующая аппаратно-методическая база и проведено обучение персонала измерительных лабораторий.

Предложения по нормированию торона

Рассматривая процесс внесения изменений в перерабатываемые НРБ в аспекте гармонизации его положений с международными рекомендациями, следует отметить, что Россия остается одной из немногих стран, в которых нормирование облучения радоном и торонам основывается на едином нормативе. В настоящее время в нормативных документах, действующих в Российской Федерации, ЭРОА торона входит в качестве слагаемого в нормируемую величину среднегодовой ЭРОА изотопов радона. При этом к величине среднегодовой ЭРОА торона применяется взвешивающий коэффициент 4,6. В значительной степени это дань «традициям» из 1970–1980-х гг., когда торон, наряду с радоном, являлся одним из индикаторов залежей радиоактивных руд.

Вместе с тем, проблема облучения населения торонам в помещениях, как правило, рассматривается как второстепенная по отношению к радону. Торон (радионуклид ^{220}Rn) является изотопом радона в цепочке распада ^{232}Th . Период полураспада торона составляет 55 с. По оценкам НКДАР ООН и МКРЗ среднемировой уровень ЭРОА торона составляет 0,3–0,5 Бк/м³. Эффективная доза облучения населения за счет торона и дочерних продуктов в среднем оценивается равной 0,1 мЗв в год.

В соответствии с заключением МКРЗ дозы облучения, обусловленные торонам, обычно (за исключением районов залежей и переработки ториевых руд), не представляют опасности с радиологической точки зрения. В то же время далеко не все лаборатории оснащены современной дорогостоящей аппаратурой для измерения низких, как правило, значений ЭРОА торона. В системе Госстандарта отсутствуют такие элементы, как Государственный специальный эталон объемной активности дочерних продуктов торона. Фактически все измерения ЭРОА торона производятся по метрологически не аттестованным методикам.

При рассмотрении облучения торонам как части природного радиационного фона в целях оптимизации радиационной безопасности необходимо учитывать, что ЭРОА торона в помещении практически полностью определяется содержанием материнского ^{232}Th в строительных материалах, использованных при возведении и отделке здания. Мероприятия, направленные на снижение содержания ^{232}Th в строительных материалах и выявление случаев использования торий-содержащих материалов в быту, с большой вероятностью обеспечат оптимизацию защиты от облучения торонам и дочерними продуктами.

Учитывая доводы, приведенные выше, в перерабатываемых НРБ целесообразно установить отдельный нормируемый (референтный) уровень объемной активности радона и рассматривать облучение торонам в контексте радиационного контроля строительных материалов. Отметим также, что принятие такого подхода в новой редакции НРБ существенно упростит и удешевит радоновые измерения, особенно при приёмке зданий в эксплуатацию, без потери их достоверности. Соответственно, необходимо будет внести коррективы в методические документы в части измерений содержания торона в помещениях.

Заключение

Реализация Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации, направленная на поддержание на возможно низком уровне доз облучения населения, подвергающегося воздействию радиационных факторов за счет природных источников излучения, требует разработки органами государственной власти комплекса мероприятий, которые носят долгосрочной характер и должны последовательно осуществляться программно-целевым методом на основе современных рекомендаций международных организаций и стандартов безопасности МАГАТЭ. Первым шагом, определяющим суть и характер мероприятий по снижению облучения населения радоном, должно быть совершенствование отечественной нормативно-правовой базы, ориентированной на внедрение новой системы радиационной защиты, постулированной в Публикации 103 МКРЗ и изложенной в Международных основных нормах безопасности МАГАТЭ. Представленные предложения по внесению изменений в перерабатываемые НРБ должны рассматриваться как первый необходимый шаг в реализации комплекса взаимосвязанных мероприятий по защите населения от воздействия ПИИИ (в первую очередь радона). Достижение прогресса в этой области диктует настоятельную необходимость разработки в Российской Федерации долгосрочной федеральной целевой программы, выполнение которой в конечном итоге позволит создать эффективную и действенную систему обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии такого естественного источника ионизирующей радиации, как радон.

Принятие предлагаемых предложений при разработке новой редакции НРБ и ОСПОРБ не потребует существенных изменений действующей системы методических документов.

Представленные в работе предложения требуют всестороннего обсуждения в кругу специалистов в области радиационной гигиены. Консолидированное решение данного вопроса позволит заложить основу последовательной реализации комплекса мероприятий по реализации утвержденных Основ и в конечном итоге достичь основной цели радоновой стратегии – снизить заболеваемость и смертность от радон-индуцированного рака легкого.

Литература

1. Киселев, С.М. Обеспечение защиты населения от облучения радоном. Проблемы и пути решения / С.М. Киселев, И.П.

- Стамат, А.М. Маренный, Л.А. Ильин // Гигиена и санитария. – 2018. – Т. 97, № 2. – С. 101–110.
2. Киселев, С.М. Радон. От фундаментальных исследований к практике регулирования / С.М. Киселев, М.В. Жуковский, И.П. Стамат, И.В. Ярмошенко. – М.: Издательство ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2016. – 400 с.
3. Барковский, А.Н. Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2017 г. / А.Н. Барковский, Р.Р. Ахматдинов, Р.Р. Ахматдинов, Н.К. Барышков, А.М. Библин, А.А. Братилова, В.Е. Журавлева, Т.А. Кормановская, С.И. Кувшинников, И.К. Романович, А.Г. Сивенков, О.Е. Тутельян, А.Г. Цовьянов // Радиационная гигиена. – 2018 – Т. 11, № 4 – С. 98–128.
4. Маренный, А.М. Оценка облучения населения России радоном (метод и результаты) / А.М. Маренный, М.Н. Савкин, С.М. Шинкарев // Медицинская радиология и медицинская безопасность. – 1999. – Т. 44, №6. – С. 37–43.
5. Романович, И.К. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / И.К. Романович, И.П. Стамат, Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко [и др.]; под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. – СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. – 432 с. ISBN 978-5-9906975-7-7.
6. UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 1993 Report to the general Assembly with scientific annexes, United Nations, New York, 1993.
7. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources International Atomic Energy Agency, Vienna, Safety Series no. 115, 1996
8. Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P., et al. From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation. Radiation Protection Dosimetry (2014). Vol. 162, № 1–2, pp. 129–134.
9. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2), 1993.
10. ICRP Publication 60. Radiation protection 1990: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) – New York: Pergamon Press, 1991.
11. UNSCEAR, 2009. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex E. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces.: United Nations, New York, 2009.
12. Effect of exposure to radon gas // UNSCER briefing note, 21.07. 2009/- New York: United States, 2009.
13. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization (WHO). WHO Press, Geneva, 2009.
14. Жуковский, М.В. Современные подходы к нормированию облучения радоном и анализ последствий их применения в России / М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселев // АНРИ. – 2011. – № 4 (67). – С. 18–25.
15. Survey on radon guidelines programmes and activities. Final report. International radon project. WHO: Geneva, 2007.
16. Darby S., Hill D., Auvinen A. et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. Br. Med. J. 330(7485): 223, 2005.
17. Darby S., Hill D., Deo H. et al. Residential radon and lung cancer – detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. Scand. J. Work Environ. Health 32 (Suppl. 1): 1–84, 2006.
18. Krewski D., Lubin J., Zielinski J.M. et al. Risk of lung cancer in North America associated with residential radon. Epidemiology 16(2): 137–145, 2005.
19. Krewski D., Lubin J.H., Zielinski J.M. et al. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. J. Toxicol. Environ. Health Part A 69(7–8): 533–598, 2006.
20. Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice Jr. J.D. et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. Int. J. Cancer 109(1): 132–137, 2004.
21. Baysson H. and Tirmarche M. Indoor radon exposure and lung cancer risk: a review of case-control studies. Rev. Epidemiol. Santé Publique 2004, 52(2): 161–171 (In French).
22. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40 (1), 2010.
23. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите / пер. с англ., под общей ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
24. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, Ann. ICRP 43 (3), 2014.
25. Киселев, С.М. Эволюция подходов МКРЗ к регулированию защиты населения от радона / С.М. Киселев // Медицинская Радиология и радиационная безопасность. – 2016. – Т. 61, №. 2. – С. 70–74.
26. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. № GSR Part 3, IAEA: Vienna, 2014.
27. International Atomic Energy Agency. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, SSG 32, IAEA: Vienna, 2014.
28. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings: Review of Methodology and Measurement Techniques (IAEA/AQ/33). IAEA: Vienna, 2013.
29. Публикация 50 МКРЗ. Риск заболевания раком легких в связи с облучением дочерними продуктами распада радона внутри помещений: докл. группы экспертов МКРЗ / Пер. с англ. Л.В. Коломиец. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 105 с.
30. Глушинский, М.В. Последствия воздействия на организм радона и продуктов его распада / М.В. Глушинский, Э.М. Крисюк // АНРИ. – 1996/97. – № 3(9). – С.16–24.
31. Ползик, Е.В. Радон и рак / Е.В. Ползик, В.Л. Лежнин, В.С. Казанцев, И.В. Ярмошенко. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 135 с.
32. Мерзликин, Л.А. Радон как техногенный фактор риска рака легких у работников горнорудного производства / Л.А. Мерзликин, А.М. Маренный, А.Ю. Бушманов // Экологическая безопасность, техногенные риски и устойчивое развитие. Тез. Докладов 13-ой ежегодной конф. Ядерного общества России. – М., 2002. – С. 214–217.
33. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon. IARC, 1988.
34. BEIR, 1999. Health Effects of Exposure to Radon. Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI). National Academy Press. Washington. 1999.
35. Hunter N., Muirhead C. R., Bochicchio F., Haylock R. G. Calculation of lifetime lung cancer risks associated with radon exposure, based on various models and exposure scenarios. J. Radiol. Prot. 2015, Vol. 35, No 3, pp. 539–555.
36. F. Bochicchio. Protection from radon exposure at home and at work in the forthcoming European Basic Safety Standards. International Conference on Protection against Radon at Home and at Work Praha (Czech Rep.), September 2nd–6th, 2013.
37. Council Directive 2013/59/Euratom, OJ L13, 17.01.2014, P. 1–73.
38. Balonov M, L Chipiga, S Kiselev, M Sneve, T Yankovich and G Proehl Optimisation of environmental remediation: how to select and use the reference levels. J. Radiol. Prot., 2018 38 (2) 819–830.

39. Маренный, А. М. Закономерности формирования радонного поля в геологической среде / А.М. Маренный, А.А.

Цапалов, П.С. Микляев, Т.Б. Петрова. – М.: Издательство «Перо», 2016. – 394 с.

Поступила: 18.02.2019 г.

Киселев Сергей Михайлович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией регулирующего надзора за объектами ядерного наследия Государственного научного центра Российской Федерации – Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России.

Адрес для переписки: 123098, Москва, ул. Живописная, 46. Тел.: +7 (985) 761-10-17; E-mail: sergbio@gmail.com

Маренный Альберт Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Романов Владимир Васильевич – заместитель руководителя Федерального медико-биологического агентства России, главный государственный санитарный врач Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Для цитирования: Киселев С.М., Маренный А.М., Романов В.В. Радон. Современные подходы к регулированию радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 94-102. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-94-102

Radon. Advanced regulatory approaches to public radiation protection

Sergey M. Kiselev¹, Albert M. Marennyy², Vladimir V. Romanov³

¹ State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

² Scientific-technical center of the radiation-chemical safety and hygiene of Federal Medico-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

³ Federal Medico-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Currently in the Russian Federation the procedure for revision of the national regulatory documents (Radiation Safety Standards (NRB-99/2009) and Basic Sanitary Rules for Ensuring Radiation Safety (OS-PORB 99/2010) has been initiated. In this regard, the authors consider to discuss with the scientific community the necessity to provide amendments in the current Radiation Safety Standards concerning public radiation protection against natural radiation sources, in particular, radon. The main objective is to provide consistence existing national regulatory requirements with the modern international approaches set out in the ICRP and IAEA documents. In this regard, specific proposals on improvement of the regulatory and legislative framework in this field are presented. This will be the basis for the implementation of national radon mitigation strategy in view of the ICRP, WHO and IAEA recommendations and the requirements of the State policy of the Russian Federation in the field of Nuclear and Radiation Safety.

Key words: NRB-99/2009, regulation, natural radiation sources, radon, thoron, equilibrium equivalent concentration, regional reference level, existing exposure situation, IAEA, ICRP, UNSCEAR, WHO.

References

1. Kiselev S.M., Stamat I.P., Marennyy A.M., Ilyin L.A. Protection of the public from radon exposure. Problems and ways of solution. *Gigiena i sanitariya* = Hygiene and sanitary, 2018, Vol. 97, No. 2, pp. 101-110. (In Russian).
2. Kiselev S.M., Zhukovsky M.V., Stamat I.P., Yarmoshenko I.V. Radon. From fundamental research to the regulatory practice. Publishing of the GNC FMBC after A.I. Burnazyan, Moscow, 2016, 450 p. (In Russian).

Sergey M. Kiselev

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia

Address for correspondence: Zhivopisnaya str, 46, Moscow, 123098, Russia; E-mail: sergbio@gmail.com

3. Barkovsky A.N., Akhmatdinov R.R., Akhmatdinov R.R., Baryshkov N.K., Biblin A.M., Bratilova A.A., Zhuravleva V.E., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Romanovich I.K., Sivenkov A.G., Tutelyan O.E., Tsovyanov A.G. The results of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2017 data. *Radiatsionnaya ghygiena = Radiation Hygiene*, 2018, Vol. 11, No. 4, pp.98-128. (In Russian).
4. Marennyy A.M., Savkin M.N., Shinkarev S.M. Assessment of the radon exposure of the public of Russia (method and results). *Meditsinskaya radiologiya i meditsinskaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*, 1999, Vol. 44, No. 6, pp. 37-43 (In Russian).
5. Romanovich I.K., Stamat I.P., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V. [et.al.] Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures .Ed. By academic of RAS G.G. Onishenko and prof. A.Yu. Popova. Saint-Petersburg, FBUN NIIRG after P.V. Ramzaev, 2018, 432 p. (In Russian)
6. UNSCEAR, 1993. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation. 1993 Report to the general Assembly with scientific annexes, United Nations, New York, 1993.
7. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources International Atomic Energy Agency, Vienna, Safety Series no. 115, 1996
8. Tollefsen T., Cinelli G., Bossew P. [et al.] From the European indoor radon map towards an Atlas of natural radiation. *Radiation Protection Dosimetry* (2014). Vol. 162, № 1–2, pp. 129–134.
9. Protection Against Radon–222 at Home and at Work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 23 (2), 1993.
10. ICRP Publication 60. Radiation protection 1990: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) – New York: Pergamon Press, 1991.
11. UNSCEAR, 2009. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex E. Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces.: United Nations, New York, 2009.
12. Effect of exposure to radon gas // UNSCER briefing note, 21.07. 2009/- New York: United States, 2009.
13. Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization (WHO). WHO Press, Geneva, 2009.
14. Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Kiselev S.M. Modern approaches to the regulation of the radon exposure and analysis of the consequences of their application in Russia. ANRI = ANRI, 2011, No. 4 (67), pp. 18-25. (In Russian).
15. Survey on radon guidelines programmes and activities. Final report. International radon project. WHO: Geneva, 2007.
16. Darby S., Hill D., Auvinen A. [et al.] Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br. Med. J.* 330(7485): 223, 2005.
17. Darby S., Hill D., Deo H. [et al.] Residential radon and lung cancer — detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14 208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scand. J. Work Environ. Health* 32 (Suppl. 1): 1–84, 2006.
18. Krewski D., Lubin J., Zielinski J.M. et al. Risk of lung cancer in North America associated with residential radon. *Epidemiology* 16(2): 137–145, 2005.
19. Krewski D., Lubin J.H., Zielinski J.M. et al. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* 69(7–8): 533–598, 2006.
20. Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice Jr. J.D. et al. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer* 109(1): 132–137, 2004.
21. Baysson H. and Tirmarche M. Indoor radon exposure and lung cancer risk: a review of case-control studies. *Rev. Epidemiol. Santé Publique* 52(2): 161–171. (In French), 2004.
22. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP, 2010, 40 (1).
23. ICRP. 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), 2007 (in Russian).
24. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, Ann. ICRP, 2014, 43 (3).
25. Kiselev S.M. Evolution of the ICRP approaches to the regulation of the protection of the public from radon. *Meditsinskaya Radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*, 2016, Vol. 61, No. 2, pp. 70-74. (In Russian).
26. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim edition. № GSR Part 3, IAEA: Vienna, 2014.
27. International Atomic Energy Agency. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation, SSG 32, IAEA: Vienna, 2014.
28. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings: Review of Methodology and Measurement Techniques (IAEA/AQ/33). IAEA: Vienna, 2013.
29. Lung Cancer Risk from Exposures to Radon Daughters. ICRP Publication 50. Ann. ICRP 17 (1). Translated by L.V. Kolomiets. Moscow, Energoatomizdat, 1992, 105 p. (In Russian).
30. Glushinsky M.V., Krisyuk E.M. Consequences of the exposure of the body by the radon and its daughter products. ANRI = ANRI, 1996/97, No. 3(9), pp. 16-24. (In Russian).
31. Polzik E.V., Lezhnin V.L., Kazantsev V.S., Yarmoshenko I.V. Radon and cancer. Ekaterinburg. UrO RAN, 2008, 135 p. (In Russian).
32. Merzlikin L.A., Marennyy A.M., Bushmanov A.Yu. Radon as a man-made lung cancer risk factor for the mining workers. Ecological safety, technogenic risks and stable development. Proceedings of the 13th annual conference of the Nuclear Society of Russia. Moscow, 2002, pp. 214-217 (In Russian).
33. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans: Man-made Fibres and Radon. IARC 43. International Agency for Research on Cancer, Lyon. IARC, 1988.
34. BEIR, 1999. Health Effects of Exposure to Radon. Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI). National Academy Press. Washington. 1999.
35. Hunter N., Muirhead C. R., Bochicchio F., Haylock R. G. Calculation of lifetime lung cancer risks associated with radon exposure, based on various models and exposure scenarios. *J. Radiol. Prot.*, 2015, Vol. 35, No 3, P. 539–555.
36. F. Bochicchio. Protection from radon exposure at home and at work in the forthcoming European Basic Safety Standards. International Conference on Protection against Radon at Home and at Work Praha (Czech Rep.), September 2nd–6th, 2013.
37. Council Directive 2013/59/Euratom, OJ L13, 17.01.2014, P. 1 –73.
38. Balonov M., L Chipiga, S Kiselev, M Sneve, T Yankovich and G Proehl Optimisation of environmental remediation: how to select and use the reference levels. *J. Radiol. Prot.*, 2018 38 (2) 819–830,.
39. Marennyy A.M., Tsapalov A.A., Miklyaev P.S., Petrova T.B. Trends of the development of the radon field in a geological environment. Moscow, "Pero" Publishing, 2016, 394 p. (In Russian).

Received: February 18, 2019

For correspondence: Sergey M. Kiselev – Ph.D.in biol., Head of laboratory on regulatory supervision of nuclear legacy sites, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency (Zhivopisnaya ul., 46, Moscow, 123098, Russia; E-mail: sergbio@gmail.com)

Albert M. Marennyy – Ph.D. in phys. and math., Chief of laboratory on natural radiation sources, Scientific-technical center of the radiation-chemical safety and hygiene of Federal Medico-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Vladimir V. Romanov – Deputy Head, Federal Medical Biological Agency, Chief Medical Officer of the Federal Medico-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

For citation: Kiselev S.M., Marennyy A.M., Romanov V.V Radon. Advanced regulatory approaches to public radiation protection. Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene, 2019, Vol. 12, No. 2, pp.94-102. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-94-102

Михаил Исаакович Балонов (75-летний юбилей)

26 марта 2019 г. исполнилось 75 лет Михаилу Исааковичу Балонову – доктору биологических наук, профессору, главному научному сотруднику лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, авторитетному ученому в области радиационной гигиены и защиты. Его работы хорошо известны в нашей стране и за рубежом, его труды положены в основу решения многих проблем обеспечения радиационной безопасности населения, аварийного реагирования, оценки последствий и принятия мер защиты населения в условиях радиационной аварии.

Михаил Исаакович Балонов более 50 лет успешно работает в Санкт-Петербургском (Ленинградском) Научно-исследовательском институте радиационной гигиены (НИИРГ) после окончания Ленинградского политехнического института в 1967 г. Начало работы происходило в окружении людей, увлеченных наукой: вначале в лаборатории аппаратурно-методических разработок под руководством Е.И. Долгирева, затем в лаборатории биофизики, возглавляемой И.А. Лихтаревым. Общее руководство научной работой осуществляли два заместителя директора: П.В. Рамзаев и В.П. Шамо́в.

В лаборатории биофизики занимались исследованиями метаболизма радионуклидов в организме человека и экспериментальных животных. М.И. Балонов занял свою нишу, начав изучение трития – низкоэнергетического бета-излучателя, который образуется как в природных условиях, так и в промышленном производстве, широко используется в научных и медицинских исследованиях.

Обладая высокой работоспособностью, целеустремленностью, способностью планировать и организовывать работу в коллективе, М.И. Балонов уже в 1972 г. защитил диссертацию с присвоением звания кандидата физико-математических наук по результатам исследования кинетики окиси трития в организме человека. Исследования трития были расширены в направлении изучения радиобиологических и генетических эффектов соединений трития в организме человека и животных. Эта работа завершилась защитой М.И. Балоновым докторской диссертации в 1986 г. по двум специальностям – «Гигиена» и «Радиобиология», а также защитой пяти кандидатских диссертаций, подготовленных под его руководством. К моменту исследований по тритию в стране и на международном уровне действовали нормативы для двух простейших соединений трития: окиси и газа. В экспериментальных работах М.И. Балонова с соавторами были



изучены кинетика, генетические и отдаленные канцерогенные эффекты различных соединений трития, показано, что дозы и относительная биологическая эффективность (ОБЭ) тритированных соединений зависят от их химической формы, оценена ОБЭ трития: в среднем в два раза выше по сравнению с гамма-излучением малой мощности. Международная комиссия по радиологической защите в это время рекомендовала значение ОБЭ = 1. Полученные результаты обладали мировой научной новизной, они явились основой для разработки отечественных и международных нормативов радиационной безопасности для пяти типов соединений трития. Эти работы являются золотым фондом Института, одним из кирпичиков его научного авторитета.

После аварии на Чернобыльской АЭС все усилия НИИРГ были направлены на оценку и ликвидацию последствий аварии. М.И. Балонов возглавил работы НИИРГ по мониторингу радиационной обстановки и оценке доз облучения населения на загрязненных территориях России. Результаты этих работ были направлены на организацию защиты населения, разработку модели прогноза развития радиационной обстановки и медицинских последствий аварии, принятию решений о дальнейшей жизнедеятельности пострадавших населенных пунктов. Но кроме этих практических вопросов, все собранные материалы систематизировались в базы данных, которые являются осно-

вой для научного анализа последствий аварии сегодня и в будущем. Публикации на чернобыльскую тему получили международное признание, они открыли институту возможность участвовать в международном научном сотрудничестве, а результаты исследований были использованы в докладах Научного комитета по действию атомной радиации при ООН (НКДАР ООН) 2000 и 2008 гг. Работы М.И. Балонова с соавторами по изучению последствий чернобыльской аварии в области радиоэкологии, радиационной защиты населения, методологии дозиметрических оценок и прогноза медицинских последствий внесли неоценимый научный вклад в развитие этих дисциплин.

В 2007 г. М.И. Балонов возглавил лабораторию радиационной гигиены медицинских организаций (РГМО) в НИИРГ. Основными задачами лаборатории были: оценка уровней и оптимизация медицинского облучения, разработка нормативно-методических документов для медицинского облучения; вопросы обеспечения радиационной безопасности пациентов и персонала в рентгеновской и радионуклидной диагностике; оценка риска отдаленных последствий от применения излучения в медицинских целях. За 10 лет была обновлена нормативно-методическая база в сфере требований радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицинских целях, гармонизированная с международными рекомендациями. В лаборатории РГМО подготовлены молодые квалифицированные кадры, увлеченные научными исследованиями, три сотрудника под руководством М.И. Балонова защитили диссертации по медицинской тематике. По всем направлениям деятельности под руководством М.И. Балонова были защищены 1 докторская и 11 кандидатских диссертаций.

М.И. Балонов является членом Национальной комиссии по радиологической защите СССР, с 1992 г. – членом Российской научной комиссии по радиологической защите (РНКРЗ), с 2001 по 2013 г. работал в Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ), участвуя в разработке новых направлений радиационной защиты и подготовке рекомендаций этой международной организации.

Ещё большее международное признание научные и организаторские способности Михаила Исааковича получили во время его работы с 2000 по 2006 г. в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) в должности руководителя подразделения в отделе радиационной безопасности. В этот период он был организатором и научным редактором материалов Чернобыльского Форума ООН и доклада НКДАР ООН 2008 г., посвященного результатам чернобыльских исследований, руководил разработкой

нескольких международных стандартов безопасности и руководящих документов по разным аспектам радиационной защиты населения.

Чернобыльская авария инициировала создание глобального режима ядерной и радиационной безопасности. За эту работу в составе коллектива МАГАТЭ в 2005 г. М.И. Балонов был удостоен Нобелевской премии мира «За усилия по предотвращению использования атомной энергии в военных целях и по обеспечению ее применения в мирных целях в максимально безопасных условиях». В 2006 г. Национальная комиссия по радиационной защите США пригласила М.И. Балонова прочитать престижную Синклеровскую лекцию «Ретроспективный анализ последствий Чернобыльской аварии» и наградила дипломом и медалью «За вклад в радиологическую науку».

М.И. Балонова часто приглашают международные организации в качестве эксперта для координации работы рабочих групп и подготовки международных документов: в частности, МАГАТЭ и НКДАР ООН регулярно привлекают его в качестве эксперта по оценке дозиметрических, радиоэкологических и медицинских последствий аварии 2011 г. на АЭС «Фукусима Дайичи» (The Fukushima Daiichi Accident. Technical Volume 5. Post-Accident Recovery. IAEA: Vienna, 2015); под его руководством подготовлено научное приложение к докладу 2017 г. НКДАР ООН по тритию (Annex C: Biological Effects of Selected Internal Emitters – Tritium. New York: United Nations; Volume I: 241–359 (2017)); готовится публикация Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) по радиационному мониторингу загрязнения окружающей среды и оценке состояния окружающей среды в случае крупных радиоактивных выбросов.

М.И. Балонов является членом редакционной коллегии журнала «Радиационная гигиена» и международного журнала «Радиационная защита» (Journal of Radiological Protection), редакционного совета журнала «Медицинская радиология и радиационная безопасность». За его 50-летнюю плодотворную научную деятельность было опубликовано около 300 печатных работ, включая монографии, справочники и нормативно-методические документы (индекс цитирования Хирша – 21). Михаил Исаакович помогает молодым сотрудникам совершенствовать свой профессиональный уровень, безотказно делаясь своими знаниями и литературными данными.

От всей души поздравляем Михаила Исааковича с прошедшим юбилеем, желаем крепкого здоровья, семейного благополучия, творческих успехов, плодотворных лет в научно-педагогической и международной деятельности, воспитания новых поколений молодых ученых в области радиационной гигиены!



Институт промышленной экологии УрО РАН приглашает принять участие в IV Международном Восточно-Европейском радоновом симпозиуме (4EERAS), который будет проходить в г. Екатеринбурге со 2 по 6 марта 2020 г. Симпозиум будет посвящен проблемам научного обоснования защиты человека от облучения природными источниками радиоактивности: радона и торона.

Председатели Симпозиума:

Михаил Жуковский, Россия
Зора Жунич, Сербия

Место проведения:

Президентский центр
Б.Н. Ельцина (Ельцин Центр)

Рабочий язык:

Английский

Контакты:

www.4eeras.ru
4eeras@4eeras.ru

Основные темы:

Методы измерения радона
Физические процессы для радона
(миграция, образование аэрозолей и др.)
Радоновые обследования
Законодательство и программы по радону
Радон в строительстве
Геогенный радоновый потенциал
Воздействие радона на здоровье
Дозиметрия радона
Радон в современных
многоэтажных зданиях
Те же темы для торона.

Иванов Сергей Иванович 18.06.1949 – 10.05.2019

10 мая 2019 г. ушел из жизни крупный организатор отечественного здравоохранения, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАЕН Сергей Иванович Иванов.

С.И. Иванов родился 18 июня 1949 г. в селе Дацан Бурято-Монгольского АО.

С 1967 по 1973 г. обучался в Ленинградском санитарно-гигиеническом медицинском институте, после окончания которого окончил аспирантуру на кафедре общей гигиены с курсом военной и радиационной гигиены того же института.

С 1981 по 1989 г. находился на партийной работе в Ленинградском обкоме КПСС и в ЦК КПСС. С 1986 по 1989 г. являлся депутатом Ленинградского городского совета народных депутатов. В 1990 г. назначен начальником Отдела радиационной гигиены Главного санитарно-эпидемиологического Управления Минздрава СССР. С 1996 по 2002 г. – доцент, а с 2002 по 2016 г. – профессор кафедры радиационной гигиены ЦИУ врачей (в настоящее время РМАНПО). С 2005 по 2016 г. – заведующий кафедрой радиационной гигиены. С 2013 по 2015 г. являлся деканом факультета профилактической медицины и организации здравоохранения.

В 1996 г. С.И. Иванов назначен начальником Управления профилактической медицины Минздравмедпрома России, а затем с 1996 по 2004 г. – заместителем руководителя Департамента Госсанэпиднадзора Минздрава России. С 2004 г. был заместителем директора по научной работе ГУ НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина РАМН.

Научная деятельность Сергея Ивановича была посвящена углубленному радиационно-эпидемиологическому анализу медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС. В этот период были организованы циклы подготовки специалистов совместно с профильными кафедрами РМАНПО и проводились работы по оценке радиационной обстановки на радиоактивно загрязненных территориях. Под руководством и при непосредственном участии Сергея Ивановича разрабатывались вопросы гигиенического нормирования химических и физических факторов среды и методологии оценки риска и ущерба здоровью населения для принятия управленческих решений по предотвращению и снижению воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды.

По инициативе С.И. Иванова научные разработки в области природной радиоактивности и медицинского облучения населения получили законодательное оформление и были внедрены в систему работы органов надзора, медицинских учреждений и строительного комплекса страны.

Сергей Иванович Иванов – автор более 200 печатных работ, трех патентов, 2 монографий. При его непосредственном участии разработано 36 нормативно-методических документов, 7 учебных и учебно-методических



пособий, включая разные программы подготовки специалистов по радиационной гигиене, организованы 2 научно-практические конференции с международным участием по вопросам организации надзора за природными источниками (Рязань, 1994 г., Протвино, 2002 г.) и международная конференция по медицинскому облучению населения (Суздаль, 2003 г.). Под руководством и при научном консультировании С.И. Иванова подготовлено и защищено 7 кандидатских и 5 докторских диссертаций.

Большой вклад Сергея Ивановича в развитие образования и науки, высокие гражданские, профессиональные и личностные качества по достоинству оценены государством и медицинской общественностью.

Все знавшие Сергея Ивановича Иванова скорбят по поводу его кончины и выражают соболезнования коллегам и родственникам покойного.

Высокая ответственность, требовательность к себе, доброжелательность, абсолютная безотказность снискали ему признание и уважение коллег не только по месту работы, но и среди специалистов системы Роспотребнадзора всей страны.

Ушел из жизни наш коллега, друг, искренний, добрый человек.

Память о С.И. Иванове навсегда останется в наших сердцах.

*Коллектив кафедры радиационной гигиены
ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России*

Савкин Михаил Николаевич 21.11.1950 – 28.03.2019

28 марта 2019 г. после тяжелой и продолжительной болезни безвременно скончался видный специалист в области радиационной безопасности и радиационной гигиены, кандидат физико-математических наук, член Российской научной комиссии по радиологической защите Михаил Николаевич Савкин.

Трудовая биография Михаил Николаевича была очень органична. В 1973 г. он успешно окончил кафедру № 1 Московского инженерно-физического института (МИФИ), а затем всю жизнь проработал в сфере обеспечения радиационной безопасности. Сначала он трудился в организации Минсредмаша СССР, занимавшейся мирными ядерными взрывами (ныне – АО «ВНИПИпромтехнологии»), затем продолжил свою работу в системе Третьего главного управления Министерства здравоохранения СССР (Институт биофизики, ныне ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России), Роспотребнадзора (АО «НИИ железнодорожного транспорта») и Российской академии наук (ИБРАЭ РАН).

Первый этап научной работы М.Н. Савкина успешно завершился 25 апреля 1986 г. защитой кандидатской диссертации по тематике радиационной безопасности мирных ядерных взрывов.

Затем М.Н. Савкин более 20 лет проработал в Институте биофизики Минздрава СССР, куда он перешел в канун катастрофы на Чернобыльской АЭС. В этом научном центре М.Н. Савкин сформировался как крупный ученый и организатор в области радиационной безопасности, радиационной гигиены и радиоэкологии. Придя в 1986 г. на должность младшего научного сотрудника, в 1987 г. он стал старшим научным сотрудником, в 1989 г. – заведующим лабораторией, в 1995 г. – заместителем директора, и на этой должности он проработал до конца 2007 г. Этот период жизни Михаила Николаевича был тесно связан с ликвидацией последствий аварии на ЧАЭС. Лично участвуя в многочисленных экспедициях, он внес большой вклад в воссоздание объективной картины масштабной катастрофы, затронувшей судьбы миллионов людей. М.Н. Савкин – автор более 200 научных работ, среди которых можно выделить фундаментальную монографию «Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры», переведенную на английский и японский языки. Он также является разработчиком многих санитарно-гигиенических нормативов.

Начиная с 1986 г., М.Н. Савкин принимал активное участие в работе НКРЗ СССР. Затем следует длительная и активная работа в составе РНКРЗ, ряде международных комиссий, проектов, комитетов и рабочих групп, среди которых:

- Международный Чернобыльский проект;
- проекты научного сотрудничества КЕС-CHG;



- проект дозиметрического сопровождения радиационно-эпидемиологических исследований в Беларуси совместно со специалистами ВОЗ, США (National Cancer Institute USA);
- работа в качестве эксперта НКДАР ООН;
- Комитет 4 МКРЗ;
- Комитет по нормам радиационной безопасности – МАГАТЭ (RASSC);
- Научно-технический совет № 10 Госкорпорации Росатом «Экологическая, ядерная и радиационная безопасность».

В последний период М.Н. Савкин много и активно работал по тематике радиационных рисков в применении к задачам ликвидации ядерного наследия. В этот период он принял непосредственное участие в работе над научными изданиями «Особые радиоактивные отходы», «Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту» и др.

М.Н. Савкин являлся членом редколлегий ряда ведущих научных журналов, в том числе журнала «Радиационная гигиена».

Научная деятельность М.Н. Савкина была по достоинству высоко оценена как в России, так и за рубежом. Среди его наград – орден «Знак почета», медаль «За трудовое отличие», медаль «В память 850-летия г. Москвы».

Михаила Николаевича всегда отличала беззаветная преданность науке, делу, удивительная целеустремленность и работоспособность, изумительное сочетание силы воли с необыкновенной добротой и отзывчивостью к близким, друзьям и коллегам.

Интеллигентность, высокая научная компетентность Михаила Николаевича, его общительность и доброжелательность, порядочность и требовательность к себе и окружающим снискали ему глубокое уважение и любовь всех, кто когда-либо соприкасался с ним по работе или в жизни.

Безвременная кончина Михаила Николаевича Савкина – тяжелая утрата для науки, невозполнимая потеря для его родных, друзей, коллег, учеников и последователей, для коллектива ИБРАЭ РАН. Светлый и добрый образ Михаила Николаевича навсегда сохранится в памяти знавших его людей.

*Редакция журнала «Радиационная гигиена», РНКРЗ
сотрудники ИБРАЭ РАН,
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна
ФМБА России ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева*

Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Научно-практический журнал «Радиационная гигиена» был основан в 2008 г. Журнал представляет собой издание научно-теоретической и практической ориентации, направленное на публикацию оригинальных исследований, экспериментальных, теоретических статей, обзоров, кратких сообщений, дискуссионных статей, отчетов о конференциях, рецензий на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, писем в редакцию, хроники событий научной жизни. Тематика журнала включает актуальные вопросы и достижения в области радиационной гигиены и санитарного надзора за радиационной безопасностью.

Полные тексты электронных версий статей представлены на сайтах Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru и официальном сайте журнала «Радиационная гигиена» www.radhyg.ru.

Журнал «Радиационная гигиена» входит в перечень российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями:

1. Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованными в других печатных изданиях. Авторам следует информировать редакцию журнала о том, что какие-то части этих материалов уже опубликованы и могут рассматриваться как дублирующие. В таких случаях в новой статье должны быть ссылки на предыдущие работы. Копии таких материалов прилагаются к рукописи, чтобы редакция имела возможность принять решение, как поступить в данной ситуации. Не допускается направление статей, которые уже напечатаны в других изданиях или представлены для печати в другие издательства.

2. Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.

3. Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать представленные работы. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят рецензирование в соответствии с требованиями ВАК.

4. Статья должна сопровождаться официальным направлением учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы. Должно быть экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи. Статья должна быть подписана всеми авторами.

5. Рукописи авторам не возвращаются.

6. **Рукописи, оформленные не в соответствии с правилами, к публикации не допускаются.**

7. Объем обзорных статей не должен превышать 20 страниц машинописного текста. Оригинальных исследований, исторических статей – 15 страниц, исторических и дискуссионных статей – 10, отчетов о конференциях, кратких сообщений и заметок из практики – 5 страниц.

8. Текст статьи печатается на одной стороне листа формата А4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным интервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

9. Статьи следует присылать в редакцию в электронном виде по адресу: journal@niirg.ru в формате MS Word с приложением сканированных копий направительного письма и

первой страницы статьи с подписью всех авторов статьи в формате pdf. Печатный экземпляр рукописи, подписанный авторами, и оригинал направительного письма отсылается по почте в адрес редакции.

10. **Титульный лист** должен содержать:

- название статьи (оно должно быть кратким и информативным, не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

- фамилию и инициалы автора(ов);

- наименование учреждений, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (префиксы учреждений, указывающие на форму собственности, статус организации (ГУ ВПО, ФГБУ, ФБУН и т.д.) не указываются);

- рядом с фамилией автора(ов) и названием учреждения цифрами в верхнем регистре обозначается, в каком учреждении работает каждый из авторов. Если все авторы работают в одном учреждении, указывать место работы каждого автора отдельно не нужно;

- вся информация предоставляется на русском и английском языках. Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru. **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

11. На отдельном листе указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью) на русском языке и в транслитерации, ученая степень, ученое звание, должность в учреждении/учреждениях, рабочий адрес с почтовым индексом, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов. Сокращения не допускаются.

12. После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме к оригинальной научной статье должно иметь следующую структуру: цель, материалы и методы, результаты, заключение. Все пишется сплошным текстом, без выделения абзацев. Для остальных статей (обзор, лекция, дискуссия) резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, по сути краткое изложение самой статьи. **Резюме не должно содержать аббревиатур и сокращений, кроме общепринятых в мировой научной литературе.** Резюме является независимым от статьи источником информации для размещения в различных научных базах данных. **Обращаем особое внимание на качество английской версии резюме!** Оно будет опубликовано отдельно от основного текста статьи и должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. В конце приводятся **ключевые слова или словосочетания на русском и английском языках** (не более 12) в порядке значимости. **Ключевые слова также не должны содержать аббревиатур и сокращений.**

13. Текст оригинального научного исследования должен состоять из введения и выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы» или «Заключение», «Литература».

В разделе «Материалы и методы» должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

В разделе «Материалы и методы» должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

14. Если в статье имеется описание наблюдений на человеке, не используйте фамилии, инициалы больных или номера историй болезни, особенно на рисунках или фотографиях. При изложении экспериментов на животных укажите, соответствовало ли содержание и использование лабораторных животных правилам, принятым в учреждении, рекомендациям национального совета по исследованиям, национальным законам.

15. Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417 – 81 ГСИ. Единицы физических величин»; В.И. Иванов В.П. Машкович, Э.М. Центер. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

16. При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

17. При первом упоминании терминов, неоднократно используемых в статье (однако не в заголовке статьи и не в резюме), необходимо давать их полное наименование и сокращение в скобках, в последующем применять только сокращение, однако их применение должно быть сведено к минимуму. Сокращение проводится по ключевым буквам слов в русском написании, например: источник ионизирующего излучения (ИИИ) и т. д. Тип приборов, установок следует вводить на языке оригинала, в кавычках; с указанием (в скобках) страны-производителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ-16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

18. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком и вставляется в текст сразу после ссылки на нее.

19. Иллюстрации должны быть четкие, контрастные. Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате Tiff, с разрешением 300 dpi и последовательно пронумерованы. Подрисовочные подписи должны быть размещены в основном тексте. Перед каждым рисунком, диаграммой или таблицей в тексте обязательно должна быть ссылка. В подписях к микрофотографиям, электронным микрофотографиям обязательно следует указывать метод окраски и обозначать масштабный отрезок. Диаграммы должны быть представлены в исходных файлах. Рисунки (диаграммы, графики) должны иметь подпись всех осей с указанием единиц измерения СИ. Легенда выносится за пределы рисунка.

20. Необходимо оформлять подписи к рисункам и таблицам, тексты внутри них на русском и на английском языках.

21. **Библиографические ссылки** в тексте должны даваться цифрами в квадратных скобках в соответствии со списком литературы в конце статьи.

Пример: В тексте: Общий список справочников по терминологии, охватывающий время не позднее середины XX века, даёт работа библиографа И.М. Кауфмана [59].

Если авторы не указаны, в отсылке указывают название документа, при необходимости указывают год издания, страницы.

Сведения в отсылке разделяют точкой и запятой.

Нумеруйте ссылки последовательно, в порядке их первого упоминания в тексте (не по алфавиту)! Для оригинальных научных статей – не менее 15–20 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

22. К статье прилагаются на отдельном листе **два списка литературы.**

23. **В первом списке литературы (Литература)** библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления».

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

24. **В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно-методические документы.** Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

Примеры внутритекстовых ссылок:

.....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Илисогласно ГОСТ Р 517721-2001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК Литература (выравнивание по левому краю)

Книги и брошюры:

Один – три автора:

Сергеев, И.В. Лучевая диагностика в России / И.В. Сергеев, Т.П. Смирнова, М.Н. Исаков. – СПб.: НИИРГ, 2007. – 123 с.

Пять и более авторов:

Сергеев, И.В. Лучевая диагностика в России : учеб. пособие для вузов / И.В. Сергеев [и др.]. – СПб.: Норма, 2007. – 123 с.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский, Ю.Е. Общие вопросы технологии / Ю.Е. Пивинский // Неформальные огнеупоры. – М., 2003. – Т. 1, кн. 1. – С. 430–447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик, А.Ш. Основы общей патофизиологии / А.Ш. Зайчик, Л.П. Чурилов // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. – СПб.: ЭЛБИ, 1999. – Ч. 1., гл. 2. – С. 124–169.

Книги на английском языке:

Jenkins PF. Making sense of the chest x-ray: a hands-on guide. New York: Oxford University Press; c 2005. 194 p.

Iverson C, Flanagan A, Fontanarosa PB, et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; c 1998. 660 p.

Глава или раздел из книги на английском языке:

Riffenburgh RH. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; c 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

Ettinger SJ, Feldman EC. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; c2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553–98.

Статьи из журнала, сборника:

Из журнала:

Стамат, И.П. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах / И.П. Стамат, Д.И. Стамат // Радиационная гигиена. – 2009. – Т. 2, № 1. – С. 46–52.

Из журнала на английском языке:

Axelsson, O. Indoor radon exposure and active and passive smoking relation to the occurrence of lung cancer / O. Axelsson [et al.] // Scand. J. Work, Environ and Health. – 1988. – Vol. 14, N 5. – P. 286–292.

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. Arch Neurol. 2005 Jan; 62(1):112-6.

Rastan S, Hough T, Kierman A, et al. Towards a mutant map of the mouse--new models of neurological, behavioural, deafness, bone, renal and blood disorders. Genetica. 2004 Sep;122(1):47-9.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников, С.И. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений / С.И. Кушинников, А.А. Цапалов // Сборник докладов и тезисов научно-практической конференции «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007 г. – М., 2007. – С. 50-51.

Из сборника конференций (тезисы) на английском языке:

Arendt T. Alzheimer's disease as a disorder of dynamic brain self-organization. In: van Pelt J, Kamermans M, Levelt CN, van Ooyen A, Ramakers GJ, Roelfsema PR, editors. Development, dynamics, and pathology of neuronal networks: from molecules to functional circuits. Proceedings of the 23rd International Summer School of Brain Research; 2003 Aug 25-29; Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Amsterdam, the Netherlands. Amsterdam (Netherlands): Elsevier; 2005. P. 355-78.

Rice AS, Farquhar-Smith WP, Bridges D, Brooks JW. Cannabinoids and pain. In: Dostorovsky JO, Carr DB, Koltzenburg M, editors. Proceedings of the 10th World Congress on Pain; 2002 Aug 17-22; San Diego, CA. Seattle (WA): IASP Press; c 2003. P. 437-68.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН): <http://www.mrrc.obninsk.gi/> (дата обращения: 19.02.2010 г.).

Complementary/Integrative Medicine [Internet]. Houston: University of Texas, M. D. Anderson Cancer Center; c2007 [cited 2007 Feb 21]. Available from: <http://www.mdanderson.org/departments/CIMER/>.

Hooper JF. Psychiatry & the Law: Forensic Psychiatric Resource Page [Internet]. Tuscaloosa (AL): University of Alabama, Department of Psychiatry and Neurology; 1999 Jan 1 [updated 2006 Jul 8; cited 2007 Feb 23]. Available from: <http://bama.ua.edu/~jhooper/>.

Polgreen PM, Diekema DJ, Vandenberg J, Wiblin RT, Chen YY, David S, Rasmus D, Gerdts N, Ross A, Katz L, Herwaldt LA. Risk factors for groin wound infection after femoral artery catheterization: a case-control study. Infect Control Hosp Epidemiol [Internet]. 2006 Jan [cited 2007 Jan 5];27(1):34-7. Available from: <http://www.journals.uchicago.edu/ICHE/journal/issues/v27n1/2004069/2004069.web.pdf>

Richardson ML. Approaches to differential diagnosis in musculoskeletal imaging [Internet]. Version 2.0. Seattle (WA): University of Washington School of Medicine; c2000 [revised 2001 Oct 1; cited 2006 Nov 1]. Available from: <http://www.rad.washington.edu/mskbook/index.html>

Статьи, принятые к печати:

Горский, Г.А. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции / Г.А. Горский, А.В. Еремин, И.П. Стамат // Радиационная гигиена. – 2010. – Т. 3, № 1. – Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах / Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др.; опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Патенты на английском языке:

Cho ST, inventor; Hospira, Inc., assignee. Microneedles for minimally invasive drug delivery. United States patent US 6,980,855. 2005 Dec 27.

Poole I, Bissell AJ, inventors; Voxar Limited, assignee. Classifying voxels in a medical image. United Kingdom patent GB 2 416 944. 2006 Feb 8. 39 p.

Из газеты:

Фомин, Н.Ф. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель / Н.Ф. Фомин, Ф.А. Иванович, Е.И. Веселов // Воен. врач. – 1996. – № 8 (1332). – С. 5.

Фомин, Н.Ф. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель / Н.Ф. Фомин, Ф.А. Иванович, Е.И. Веселов // Воен. врач. – 1996. – 5 сент.

Диссертация и автореферат диссертации:

Фенухин, В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона : дис... канд. полит. наук: защищена 22.01.02 : утв. 15.07.02. / Фенухин В.И. – М., 2002. – 215 с. – 04200201565.

Кадука, М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Кадука М.В. – Обнинск, 2001. – 23 с.

Диссертация и автореферат диссертации на английском языке:

Jones DL. The role of physical activity on the need for revision total knee arthroplasty in individuals with osteoarthritis of the knee [dissertation]. [Pittsburgh (PA)]: University of Pittsburgh; 2001. 436 p.

Roguskie JM. The role of Pseudomonas aeruginosa 1244 pilin glycan in virulence [master's thesis].

23. Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов, а также название журнала и издания должны быть транслитерированы. Название работы (если требуется) переводится на английский язык и/или транслитерируется. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Примеры:

Книги (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название, место издания и название издательства переводится на английский язык)

Lobzin Yu.V., Uskov A.N., Yushchuk N.D. Ixodes tick-borne borreliosis (etiology, epidemiology, clinical manifestations, diagnosis, treatment and prevention): Guidelines for Physicians. Moscow; 2007 (in Russian).

Из журналов (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название статьи не приводится, название журнала транслитерируется)

Kondrashin A.V. Meditsinskaya parazitologiya i parazitarnyye bolezni. 2012; 3: 61-3 (in Russian).

Диссертация (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название диссертации транслитерируется, дается перевод названия на английский язык, выходные данные транслитерируются)

Popov A.F. Tropicheskaya malyariya u neimunnykh lits (diagnostika, patogenez, lecheniye, profilaktika) [Tropical malaria in non-immune individuals (diagnosis, pathogenesis, treatment, prevention)] [dissertation]. Moscow (Russia): Sechenov Moscow Medical Academy; 2000. 236 p (in Russian).

Патенты (фамилия и инициалы авторов, название транслитерируются)

Bazhenov A.N., Ilyushina L.V., Plesovskaya I.V., inventors; Bazhenov AN, Ilyushina LV, Plesovskaya IV, assignee. Metodika lecheniia pri revmatoidnom artrite. Russian Federation patent RU 2268734; 2006 Jan 27 (in Russian).

Из сборника конференций (тезисы) (фамилия и инициалы автора транслитерируются, название тезисов транслитерируется и дается перевод названия на английский язык, выходные данные конференции транслитерируются и дается перевод названия на английский язык)

Kiryushenkova VV, Kiryushenkova SV, Khramov MM, et al. Mikrobiologicheskii monitoring vozbuditeley ostrykh kishhechnykh infektsiy u vzroslykh g. Smolenska [Microbiological monitoring of pathogens of acute intestinal infections in adults in Smolensk]. In: Materialy mezhdunarodnogo Yevro-aziatskogo kongressa po infektsionnym boleznyam [International Euro-Asian Congress on Infectious Diseases]. Vol. 1. Vitebsk; 2008. P. 53. (in Russian).

Boetsch G. Le temps du malheur: les representations artistiques de l'epidemie. [Tragic times: artistic representations of the epidemic]. In: Guerici A, editor. La cura delle malattie:

itinerari storici [Treating illnesses: historical routes]. 3rd Colloquio Europeo di Etnofarmacologia; 1st Conferenza Internazionale di Antropologia e Storia della Salute e delle Malattie [3rd European Colloquium on Ethnopharmacology; 1st International Conference on Anthropology and History of Health and Disease]; 1996 May 29-Jun 2; Genoa, Italy. Genoa (Italy): Erga Edizione; 1998. P. 22-32. (in French).

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Статьи направляются по адресу: 197101, г. Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8, ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В.Рамзаева». Редакция журнала «Радиационная гигиена» и по e-mail: journal@niirg.ru.

Справки по телефону: (812) 233-42-83 и (812) 233-50-16 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812) 233-53-63, 233-42-83.