

ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 14 № 4, 2021



**Научно-практический
журнал**

УЧРЕДИТЕЛЬ:
Федеральное бюджетное
учреждение науки
«Санкт-Петербургский
научно-исследовательский
институт радиационной гигиены
имени профессора П.В. Рамзаева»
Федеральной службы по надзору
в сфере защиты прав потребителей
и благополучия человека

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
«Книга-Сервис» - **Ф57988**

© «Радиационная гигиена», 2021

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 14 № 4, 2021

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, академик 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

Александр Сергей Сергеевич — ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова» МЧС России, д.м.н. профессор, чл.-корр. РАН (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», 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)

Водоватов Александр Валерьевич — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», к.б.н. (Санкт-Петербург, 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)

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)

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)

ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

FOUNDER:
Federal Scientific Organization
«Saint-Petersburg Research Institute
of Radiation Hygiene
after Professor P.V. Ramzaev»
Federal Service for Surveillance
on Consumer Rights Protection
and Human Well-Being

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



Vol. 14 № 4, 2021

RADIATION HYGIENE

Vol. 14 № 4, 2021

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, Academician of the Russian Academy of Sciences, M.D., Professor, (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, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

Sergey A. Gorbanev – 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 Academy of Sciences (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», Academician of the Russian Academy of Sciences, 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, Academician 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. Vakulovskiy – Federal State Budgetary Institution Research and Production Association «Typhoon», Doctor of Engineering, Professor (Kaluga region, Russian Federation)

Aleksandr V. Vodovotov – Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, PhD (Saint Petersburg, 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)

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

Vasilij 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)

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 14 № 4, 2021

ИЗ ИСТОРИИ ГИГИЕНЫ

- Онищенко Г.Г., Романович И.К., Историк О.А., Водоватов А.В.,
Библин А.М., Кормановская Т.А.
К 125-летию открытия радиоактивности: история становления и текущее состояние нормативного обеспечения радиационной безопасности населения6

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

- Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В.,
Никитин А.Н.
²⁴¹Am и ¹³⁷Cs на территории Хойникского района Беларуси: оценка радиозоологической обстановки на современном этапе ситуации существующего облучения17

ОБЗОРЫ

- Аклев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю.
Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы31
- Звонова И.А., Балонов М.И.
Сравнение ранних прогнозов заболеваемости раком щитовидной железы жителей Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС с данными наблюдений45
- Кальницкий С.А., Целиков Н.В.
Анализ медицинского облучения пациентов в рентгеновской диагностике России за полвека наблюдения (1970–2019 гг.)60
- Сарычева С.С.
Особенности применения средств радиационной защиты для персонала рентгенохирургических операционных76

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А.
Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг.85
- Седнев К.А., Некрасов В.А., Репин В.С.
Универсальная градуировка сцинтилляционного спектрометра с детектором NaI(Tl) при измерении активности ¹³⁷Cs в счетных образцах произвольной плотности и объема96

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

- Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р.,
Барышков Н.К., Библин А.М., Братилова А.А., Журавлева В.Е.,
Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., Сивенков А.Г., Тутельян О.Е.,
Цовьянов А.Г.
Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г.103
- Ахматдинов Руслан Р., Библин А.М., Репин Л.В.
Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий114
- Бажин С.Ю., Кайдановский Г.Н.
Учёт вклада природного фона при контроле индивидуальных доз персонала122

- ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»129**

CONTENTS

Vol. 14 № 4, 2021

HISTORY OF HYGIENE

- Onischenko G.G., Romanovich I.K., Istoric O.A., Vodovатов A.V.,
Biblin A.M., Kormanovskaya T.A.
On the 125th anniversary of the discovery of radioactivity: history of development and current state of regulation of the provision of the radiation safety of the public 14

RESEARCH ARTICLES

- Nilova E.K., Bortnovsky V.N., Tagai S.A., Dudareva N.V.,
Nikitin A.N.
²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in the Khoyniki district of Belarus: updated radiological assessment of the local existing exposure situation29

REVIEWS

- Akleyev A.V., Degteva M.O., Krestinina L.Yu.
Radioepidemiological studies in the Urals: outcomes and future directions42
- Zvonova I.A., Balonov M.I.
Comparison of early forecasts of the incidence of thyroid cancer in residents of the Russian Federation after the Chernobyl accident with observational data56
- Kalnitsky S.A., Tselikov N.V.
Analysis of patient medical exposure in X-ray diagnostics in Russia for half a century (1970–2019) 74
- Sarycheva S.S.
Features of radiation protection equipment for the staff of X-ray operating rooms83

RADIATION MEASUREMENT

- Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Bratilova A.A.
Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ¹³⁷Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–202194
- Sednev K.A., Nekrasov V.A., Repin V.S.
Universal calibration of a scintillation spectrometer with a NaI(Tl) detector when measuring ¹³⁷Cs activity in counting samples of arbitrary density and volume 101

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION

- Barkovsky A.N., Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R.,
Baryshkov N.K., Biblin A.M., Bratilova A.A., Zhuravleva V.E.,
Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Sivenkov A.G., Tutelyan O.E.,
Tsovyanov A.G.
Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020 111
- Akhmatdinov Ruslan R., Biblin A.M., Repin L.V.
Development of the automated system for assessing radiation risks to the population of the Russian Federation based on the data of radiation-hygienic certification of territories 120
- Bazhin S.Yu., Kaidanovsky G.N.
Consideration of the contribution of the natural background component during individual control of radiation doses to personnel 127

- JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 129**

К 125-летию открытия радиоактивности: история становления и текущее состояние нормативного обеспечения радиационной безопасности населения

Г.Г. Онищенко^{1,4}, И.К. Романович^{1,2}, О.А. Историк³, А.В. Водоватов^{2,5}, А.М. Библин², Т.А. Кормановская²

¹Российская академия наук, Москва, Россия

²Санкт-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

³Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ленинградской области, Санкт-Петербург, Россия

⁴Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), Москва, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный медицинский педиатрический университет, Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена вопросу становления и текущему состоянию нормативного обеспечения радиационной безопасности населения. Последовательно изложены история открытия рентгеновского излучения, радиоактивности и становления атомной энергетики в мире и СССР. Представлены в историческом аспекте вопросы изучения радиобиологического действия ионизирующего излучения на человека и хронология развития и совершенствования нормирования. Показано, что принципы радиационной защиты, нормативы и подходы к обеспечению радиационной безопасности в № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения», НРБ-99/2009 построены на основе Публикации 60 МКРЗ 1990 г. и Международного базового стандарта безопасности МАГАТЭ 1997 г. и полностью им соответствуют. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» и НРБ-99/2009 на десятилетия гарантированно обеспечили и продолжают обеспечивать радиационную защиту персонала и населения по самым высоким международным стандартам.

Ключевые слова: X-лучи, рентгеновские лучи, радиоактивность, атомная энергетика, радиационная защита, дозы облучения, детерминированные эффекты, тканевые реакции, стохастические эффекты, нормирование.

История открытия X-лучей и радиоактивности

В 2020 г. мировая общественность отметила 125-ю годовщину со дня открытия В.К. Рентгеном X-лучей, а уже в нынешнем, 2021 г., мы отмечаем 125-летие открытия А. Беккерелем естественной радиоактивности урана [1]. Эти два открытия буквально изменили мир. Уже через 3 недели после сообщения В.К. Рентгена «О новом роде лучей» ученые из Военно-медицинской академии (Санкт-Петербург) повторили опыты В.К. Рентгена и стали основоположниками клинического применения рентгеновского излучения. Через год (в начале 1897 г.) при клиническом госпитале академии организуется первый в России рентгеновский кабинет. Профессор М.И. Неменов организует и открывает в 1918 г. в Петрограде Государственный институт рентгенологии и радиологии, а в 1929 г. первую в России кафедру клинической рентгенологии в Военно-

медицинской академии [2]. В настоящее время невозможно себе представить жизнь без повсеместного использования рентгеновских лучей в медицинской практике, промышленности и многих других областях человеческой деятельности.

После обнаружения А. Беккерелем естественной радиоактивности урана уже через 2 года (в 1898 г.) поступили сообщения об открытиях М. Склодовской-Кюри и П. Кюри радиоактивных свойств полония и радия. Вещества, испускающие лучи Беккереля, назвали радиоактивными, а новое свойство вещества, обнаруженное по этому лучеиспусканию, радиоактивностью [1, 3]. Еще через год Э. Резерфорд (1899 г.) открыл α -, β -, γ -излучения, а к 1911 г. создал теорию распада радиоактивных веществ. Проводя эксперименты по бомбардировке ядер бериллия, лития и бора α -частицами, Э. Резерфорд в

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@niir.ru

1930 г. обнаружил неизвестный вид излучения. В дальнейшем было доказано, что это излучение является элементарными частицами, которые были названы нейтронами. Ф. Жолио-Кюри и П. Савич в 1937 г. установили, что при облучении урана нейтронами ядро атома урана делится, образуя осколки. В 1939 г. Э. Ферми, Ф. Жолио-Кюри, Л. Коварски открыли цепную реакцию деления урана. Это означало открытие эпохи атомной энергии. До запуска первого атомного реактора, который осуществил 2 декабря 1942 г. Э. Ферми, прошло всего 3 года, а до атомных бомбардировок американцами японских городов Хиросимы и Нагасаки в августе 1945 г. – всего 6 лет [3].

Первые данные о действии X-лучей и лучей радия на организм человека

Исследования по изучению действия X-лучей и лучей радия на живые организмы начались практически с момента их открытия. В 1896 г. профессор И.Р. Тарханов опубликовал сообщение о действии X-лучей на центральную нервную систему и развитие животных. Им было сделано предположение, что «...X-лучи могут служить не только для фотографирования и для диагноза, как думали до сих пор, но и для воздействия на организм. И мы не удивимся, если в недалеком будущем лучами этими будут пользоваться с лечебной целью» [4]. В дальнейшем С.В. Гольдбергом, Е.С. Лондоном и В.М. Ивановым были детально рассмотрены реакции кожи на лучевые воздействия радия, опубликованные в 1904 г. С.В. Гольдбергом в монографии «К учению о физиологическом действии беккерелевых лучей». Е.С. Лондоном также впервые было установлено, что под влиянием радиации наиболее ранние и выраженные изменения происходят в кроветворных, лимфоидных и половых органах [4]. И. Бергонье и Л. Трибондо в 1906 г. был сформулирован фундаментальный закон клеточной радиочувствительности: ионизирующее излучение тем сильнее действует на клетки, чем интенсивнее они делятся и чем менее они дифференцированы [4].

Не убереглись от радиационных поражений и первооткрыватели радиоактивности. Так, первые лучевые поражения кожи были зафиксированы у А. Беккереля и у П. и М. Кюри, которые работали с радием. Первые исследователи X-лучей и лучей радия и врачи, применявшие их в медицинской практике, не зная природы и свойств открытых явлений, их радиобиологического действия, работали с источниками ионизирующего излучения без каких-либо предосторожностей [1, 3].

С каждым годом сообщений о радиационных поражениях поступало все больше. Наиболее известным стало сообщение о «радиевых девушках» (англ. Radium Girls) – женщинах, работавших в 1917–1926 гг. на предприятии американской корпорации United States Radium Corporation в городе Ориндж и получивших радиационное поражение. При нанесении светосоставов на циферблаты и стрелки часов или других приборов девушки постоянно брали губами кисти, чтобы сделать их тоньше. Через несколько лет работы со светосоставом многие женщины начинали страдать от кровоточащих десен и болей в челюстях. Затем начали выпадать зубы. Среди работниц фабрики участились случаи выкидышей и рождения мертвых детей. Кости становились настолько хрупкими, что женщины не могли ходить, не опасаясь переломов.

Процент заболеваемости раком среди работниц увеличился в десятки раз. Рентгеновские снимки больных женщин показали, что их челюсти были испещрены отверстиями и напоминали пористую губку. Научные исследования «радиевых девушек» стали одним из первых веских доказательств вредного воздействия радиоактивных веществ на человека [5, 6].

В первой половине XX в. радиоактивные вещества получили широкое распространение в косметике, на их основе создавались лекарства, они входили в состав стимулирующих и алкогольных напитков. Эбен Байерс, миллионер и известный спортсмен, за полтора года употребил 1400 бутылок лекарственного препарата «Радитор». В каждой бутылке содержалось до 3,5 мКи радия. Доза облучения на скелет Байерса могла составить около 350 Зв, что привело его к смерти в течение 18 месяцев. Обнаружение данного случая привело к запрещению бесконтрольного распространения радиофармацевтических препаратов в США, а также к запрету на использование радия в тонирующих и спиртных напитках [7].

Одним из массовых способов использования рентгеновских лучей, кроме медицины, стало изобретение флюороскопов, или рентгеновской примерочной для обуви. Одновременно примерку обуви могли наблюдать 3 человека, в том числе покупатель и продавец-консультант. За одну примерку покупатель и продавец подвергались облучению до 20 рентген. В начале 1950-х гг. в мире было установлено порядка 10 000 флюороскопов. Отмечены случаи частых и тяжелых заболеваний продавцов. В 1957 г. первый запрет на использование рентгеновской примерочной для обуви был введен в Пенсильвании, США. К 1960 г. аналогичный запрет был введен уже в 34 штатах [8].

Довоенный период можно назвать этапом накопления данных о биологическом действии ионизирующего излучения на человека и систематизации данных о радиационном воздействии. Созданный в 1928 г. Международный комитет по защите от воздействия рентгеновских лучей и радия (IXRPC) в своей первой рекомендации предостерегал об известных на тот момент эффектах: о повреждениях поверхностных тканей, внутренних органов и изменениях в крови [9, 10].

Первые шаги в нормировании рентгеновских лучей и радия

На раннем этапе работы с рентгеновскими лучами и радием и в период первых попыток разработки и внедрения мер радиационной защиты не существовало методов измерения новых видов лучей и понятия дозы облучения организма. В этой связи основное внимание уделялось разработке методов измерения и количественной оценке ионизирующего излучения. Британское рентгенологическое общество (British Röntgen Society) с 1906 г. начало разрабатывать теоретическое обоснование радиевого стандарта в качестве единицы измерения при проведении лечения рентгеновскими лучами. По результатам работ в 1908 г. в качестве стандарта был предложен 1 мг чистого бромида радия, а в качестве эталонного излучения – гамма-излучение от стандартного образца после прохождения через слой ослабителя в 5 мм свинца [11].

В 1910 г. по итогам работы Международного конгресса по радиологии и электричеству была организована

Международная комиссия по радиевому стандарту под руководством Э. Резерфорда. Первый стандарт был изготовлен в 1911 г. и представлял собой 22 мг чистого хлорида радия, запаянного в стеклянную ампулу. Также на конгрессе была предложена единица для измерения радона – Кюри, определенная как количество радона, находящегося в радиоактивном равновесии с 1 г радия [11].

В эти же годы проводились работы по дозиметрии ионизирующих излучений. Первые концепции дозы облучения, основанные на ионизации воздуха, были предложены во Франции (1908 г.) и США (1914 г.).

Отсутствие подходов к дозиметрии приводило к тому, что, начиная с 1910-х гг., дозы оценивались по клиническим проявлениям, главным образом, по результатам реакции кожи на облучение – так называемым стандартным эритемным дозам (СЭД). 1 СЭД представляла собой дозу облучения, которая приводила к покраснению кожи (эритеме) [11].

Первые подходы к установлению пределов доз были разработаны в США в 1924–1925 гг. Артуром Мутшеллером в виде так называемой «толерантной дозы» – дозы, которую человек переносит без риска прямых радиационных поражений. Тolerантная доза соответствовала 0,01 СЭД в месяц. Параллельно с этим в 1925 г. Рудольф Зиверт предложил установить предел толерантной дозы в 0,1 СЭД в год. В переводе на существующие единицы 0,1 СЭД соответствует диапазону в 600–900 мЗв в год [11].

В 1925 г. был основан Международный комитет по рентгеновским единицам (International X-ray Unit Committee) (с 1950 г. – Международная комиссия по радиационным единицам (МКРЕ) (International Committee for Radiological Units, ICRU)) [12]. В 1928 г. были выпущены рекомендации по использованию новой дозовой величины – экспозиционной дозы, с единицей измерения «рентген». Впервые возникают и используются термин «Доза» (доза облучения) и общее название измерительных приборов – «Дозиметры» [11, 13]. В 1937 г. были внесены изменения в определение экспозиционной дозы, чтобы ее можно было применять и к гамма-излучению.

Первые официальные рекомендации по радиационной защите (Merkblatt über den Gebrauch von Schutzmassregeln gegen Röntgenstrahlen) были выпущены Немецким рентгеновским обществом ((Deutsche Röntgen Gesellschaft) в 1913 г. Рекомендации включали предупреждения об опасности многократного облучения человека и, как следствие, необходимости организации защиты барьерами, временем и расстоянием, а также включали данные по необходимым толщинам свинцовой защиты при работе с различными видами рентгеновских трубок [14].

В период Первой мировой войны произошло стремительное внедрение рентгеновских аппаратов в медицинскую практику, а увеличение числа работников, обладающих крайне низкими знаниями о технике безопасности при работе с рентгеновскими аппаратами, привело к появлению значительного числа острых лучевых поражений [11, 15].

В 1914 г. при Британском рентгенологическом обществе создается Комитет по рентгеновским измерениям и дозам, которому была поручена разработка рекомендаций по радиационной безопасности. Разработанный в 1916 г. документ включал требования по защите рентге-

новских трубок (толщине защитного свинцового стекла) и технике безопасности для персонала [11, 15].

Следующим этапом в становлении системы радиационной защиты стало основание в 1921 г. Британского комитета по защите от рентгеновских лучей и радия и опубликование им отчета о требованиях радиационной безопасности при работе с источниками рентгеновского излучения. Устанавливались требования по ограничению рабочего времени (не более 7 ч работы в день при пятидневной рабочей неделе) и дополнительным отпускам (не менее 1 месяца в год) для персонала. Запрещалось привлекать к проведению рентгенорадиологических исследований неспециализированный персонал медицинских организаций [16].

Требования по радиационной защите пациентов и персонала в этот период устанавливаются также Норвежским радиологическим обществом (1923 г.), Шведским обществом по радиационной защите (1928 г.), в Италии (1925 г.) [11, 17].

С 1928 г. значительную роль в обеспечении радиационной безопасности и разработке рекомендаций, касающихся допустимых уровней профессионального облучения и облучения населения, начинает играть созданный в 1928 г. на II Международном конгрессе радиологов в Стокгольме (Швеция) Международный комитет по защите от рентгеновских лучей и лучей радия (с 1950 г. это Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ)) [3, 18]. Результаты работы конгресса были реализованы в виде приложений к журналу «Acta radiologica», в которых были представлены правила по радиационной безопасности, включающие в себя:

- сведения об известных негативных эффектах ионизирующего излучения;
- требования к продолжительности рабочего дня, дополнительных отпусков для персонала;
- требования к проектированию (организации) отделений лучевой диагностики и терапии;
- требования к проектированию (организации) кабинетов для лучевой диагностики и терапии;
- требования к радиационной защите временем и барьерами для персонала;
- требования по электробезопасности рентгеновских установок;
- требования по работе с радием, защите от ингаляционного поступления радона и бета-облучения персонала;
- требования к защитным контейнерам для транспортирования и хранения радия [19].

В 1931 г. в дополнение к рекомендациям 1928 г. были установлены обязательные требования к проведению регулярных периодических медицинских осмотров персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения (ИИИ) (не реже 2 раз в год). Также было предложено использовать единицу «Кюри» не только для радия, но и для всех дочерних продуктов цепочки распада радия. Было установлено соотношение между активностью в кюри и числом распадов в секунду: 1 кюри был принят равным 37 миллиардам распадов в секунду. В 1934 г. МКРЗ устанавливает первый норматив профессионального облучения в виде толерантной дозы в 0,2 Р в день (1 рентген в неделю, 50 рентген в год), а уже через 2 года (в 1936 г.) уменьшает его в 2 раза [20].

В дореволюционной России также велись интенсивные работы по радиационной защите персонала, рабо-

тающего с рентгеновским излучением. Д.Ф. Решетило (1906) считал неременным условием работы с рентгеновскими лучами защиту глаз очками из свинцового стекла, а всего тела – защитными фартуками и экранами. Кроме того, автор указывал на значимость времени облучения и расстояния от источника для снижения получаемых доз облучения [3].

В 1914 г. на I Всероссийском съезде по борьбе с онкологическими заболеваниями обсуждались не только вопросы лечения злокачественных новообразований рентгеновскими лучами и лучами радия, но и задачи по усилению мероприятий по охране труда медицинского персонала, подвергающегося облучению в профессиональных условиях. В принятой резолюции съезда было указано на необходимость разработки специальных правил по защите лиц, работающих с этими лучами. Это было одно из первых требований в области обеспечения радиационной безопасности человека [21].

После революции 1917 г. основные работы в области радиационной защиты и безопасности в СССР проводились на базе организованного в 1918 г. Рентгенологического и радиологического института. Под эгидой института проводились всесоюзные съезды рентгенологов и радиологов. На третьем съезде (20–25 мая 1925 г.) рассматривались вопросы о защите труда рентгенологов. По результатам съезда и последующей работы Ассоциации рентгенологов и радиологов было утверждено постановление Народного комиссариата труда СССР от 9 сентября 1925 г. № 233/389 «Об охране труда работников в рентгеновских кабинетах», фактически являющееся первым регулирующим документом по радиационной гигиене. В документе представлены требования к устройству рентгеновских кабинетов, свинцовой защите, электробезопасности аппаратов; установлены требования к продолжительности рабочего дня (4 ч) и наличию спецодежды, кратности периодических медицинских осмотров [22]. В 1940 г. законодательно продолжительность рабочего дня была увеличена до 6 ч [23]. Начиная с 1939 г., проводился отдельный учет профессиональных заболеваний, обусловленных воздействием ионизирующего излучения [24].

В 1921 г. академик В.Г. Хлопин получил первые препараты радия и мезотория из руд, добываемых в районе г. Ухты. Этим было положено начало отечественной радиевой промышленности. В 1922 г. открывается Государственный радиевый институт, возглавивший все работы по организации изысканий радиевых руд и получению отечественных препаратов радия. Одновременно возникла необходимость в изучении вопросов гигиены труда в этой новой отрасли, поскольку уже было известно о неблагоприятных и тяжелых поражениях, связанных с воздействием лучей радия [3, 25].

Первые научные исследования условий труда и состояния здоровья работников на заводе по производству радия из тюямунской урановой руды в начале 1930-х гг. внес Центральный институт гигиены труда и промышленной санитарии (ныне Научно-исследовательский институт медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова РАН) под руководством А.А. Летавета. На основе полученных данных в 1935 г. под редакцией В.А. Левицкого и А.А. Летавета была издана первая в СССР монография, посвященная вопросам радиационной гигиены и

радиационной безопасности [26]. В ней исследователи предложили меры по защите работников радиохимических производств от лучевого поражения. В монографии рекомендовалось для работников химзаводов и завода по переработке радиевых концентратов устанавливать 6-часовой рабочий день и бесплатно выдавать молоко, предписывалось иметь особый надзор за состоянием здоровья работников и подвергать их ежемесячному медицинскому осмотру [26, 27].

Становление современной системы радиационной защиты в мире

Новый этап в обеспечении радиационной безопасности персонала, непосредственно занятого на работах с источниками ионизирующего излучения, и населения связан с проектами в области атомной энергии, в частности, с разработкой ядерной бомбы и первых атомных реакторов в Италии, США, Германии, СССР [3, 17, 27, 28].

Национальная комиссия по радиационной защите США в 1940 г. выпускает отчет № 5, в котором впервые, помимо ограничения внешнего облучения, устанавливаются требования к ограничению внутреннего облучения. Предел содержания радия в организме человека устанавливается равным 0,1 мкг. В 1941–1945 гг. в США ведутся работы по обоснованию перехода от толерантной дозы к предельно допустимой дозе, учитывающей наследственные эффекты. Вводится понятие стохастических эффектов. Обосновывается линейная беспороговая концепция воздействия ионизирующего излучения [29]. В эти же годы Паркером обосновываются подходы к оценке поглощенной дозы с использованием рентген-эквивалента (величина фэр, от английского roentgen-equivalent physical). Вводится понятие биологического эквивалента рентгена – бэр (аналог эквивалентной дозы), учитывающего относительную биологическую эффективность излучения (величина рэм, roentgen-equivalent mammal) [11, 17].

На основании новых данных Шестой Международной конгресс по радиологии в 1950 г. (Лондон) рекомендует недельный профессиональный лимит уменьшить в 2 раза, годовой лимит установить на уровне 15 рентген, а в радиационные эффекты включить поверхностные повреждения, воздействия на кровь и кроветворные органы (анемии и лейкемии), индуцирование злокачественных опухолей, катаракты, нарушение плодовитости и сокращение продолжительности жизни, генетические эффекты [30].

К 1956 г. объемы данных, полученных в результате Манхэттенского проекта, атомных бомбардировок городов Хиросимы и Нагасаки, разработки ядерных реакторов, свидетельствовали, что установленные нормативы не защищают в полной мере работников от действия ионизирующей излучений.

Важную роль в изучении эффектов облучения ионизирующими излучениями и радиоактивными веществами человека и населения, связанных с ним рисков, консолидации и анализа всего мирового опыта внес Научный комитет по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций (НКДАР ООН), созданный в 1955 г. в рамках ООН. НКДАР ООН 1 раз в несколько лет публикует итоги работы, содержащие самые подробные и разносторонние оценки воздействия различных доз радиации от всех известных источников ионизирующе-

го излучения, их опасности для населения [31]. В 1957 г. учреждается Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), которое также начинает играть важную роль в обеспечении радиационной безопасности работников, непосредственно занятых с обращением с ИИИ, населения, объектов окружающей среды и нормировании радиационного фактора [32].

На основании вновь полученных данных в Публикации 1 МКРЗ (1958 г.) заменяет недельный профессиональный лимит годовым лимитом в 50 мЗв и допускает превышения до 30 мЗв в квартал. Впервые устанавливается порог облучения для остального населения на уровне 5 мЗв в год [33]. В Публикации 9 МКРЗ эффекты радиационного воздействия разделила на две категории: острые и отдаленные. В последующих публикациях комиссии категории «Острые эффекты» и «Отдаленные эффекты» заменили терминами «Нестохастические эффекты облучения» и «Стохастические эффекты облучения», а нестохастические эффекты разделила на ранние и отдаленные [9, 30, 34–36].

Одним из важных этапов в обеспечении радиационной защиты работников и населения стал выход в 1977 г. Публикации 26 МКРЗ. В данных рекомендациях впервые введены 3 принципа радиационной защиты (обоснование, оптимизация и нормирование) и понятие «Вред» для выявления и количественной оценки всех вредных эффектов излучения. Также в Публикации 26 основу принципа оптимизации сформулировали так: «Держать облучение на разумно низком уровне с учетом экономических и социальных факторов» [35].

Переломным моментом в радиационной защите становится выход в 1990 г. Публикации 60 МКРЗ [37]. Основанием для выхода новой публикации стали результаты переоценки данных по бомбардировкам Хиросимы и Нагасаки, завершившиеся в 1986 г. МКРЗ рекомендует ограничить индивидуальные дозы для населения до 1 мЗв в год, а для рабочих – до 20 мЗв в год (в среднем 100 мЗв в течение 5 лет, но не более 50 мЗв в год). В данной публикации произошел явный отказ от гипотезы порогового значения: «Нет порога, ниже которого не было бы эффекта». Взамен термина «Нестохастический эффект» вводится термин «Детерминированный эффект». МАГАТЭ на основании Публикации 60 МКРЗ выпускает в 1997 г. «Международный базовый стандарт безопасности для защиты от ионизирующего излучения и безопасности источников излучения» и рекомендует странам-членам МАГАТЭ переход на новые стандарты безопасности [38].

Становление системы радиационной защиты в СССР – России

В 2020 г. отмечено 75-летие атомной отрасли России. Однако работы по реализации атомного проекта в СССР начались задолго до 1945 г. Теоретические наработки в области ядерной физики с 1920-х гг. проводились в Радиевом институте, Первом Ленинградском физико-техническом институте, в Институте химической физики в Москве, Харьковском физико-техническом институте. В канун Великой Отечественной войны эти работы были приостановлены. Однако вскоре после начала работ в США по Манхэттенскому проекту постановлением Государственного комитета по обороне (ГКО) СССР № 2352сс от 28 сентября 1942 г. работы по исследова-

нию осуществимости использования атомной энергии путём расщепления ядра урана в СССР возобновились. Началом практических работ по созданию атомной бомбы стало постановление ГКО № 2872сс от 11 февраля 1943 г. Главой атомного проекта был назначен И.В. Курчатов [28, 39, 40]. В апреле 1943 г. в Академии наук СССР создается лаборатория № 2, начальником лаборатории назначается И.В. Курчатов.

Вскоре после атомной бомбардировки Хиросимы постановлением Государственного комитета обороны № 9887сс/оп от 20 августа 1945 г. за подписью И.В. Сталина при ГКО образован Специальный комитет для руководства всеми работами по использованию атомной энергии. Председателем комитета назначен Л.П. Берия. Этим же постановлением для непосредственного руководства научно-исследовательскими и проектными работами создано Первое главное управление при СНК СССР (ПГУ), подчиненное Специальному комитету при ГКО. Начальником ПГУ был назначен нарком вооружений Б.Л. Ванников [28, 39, 40].

Под руководством И.В. Курчатова уже в 1946 г. в реакторе Ф-1 была осуществлена самоподдерживающаяся цепная реакция деления урана, в 1948 г. запущен первый промышленный реактор «А» по производству плутония, а 29 августа 1949 г. на Семипалатинском полигоне был успешно испытан ядерный заряд (РДС-1) [28, 39, 40].

С первых лет разработки и создания ядерного оружия и атомной промышленности вопросы радиационной защиты, разработки нормативных документов и решения практических задач медицинского, в том числе и санитарно-гигиенического обеспечения, в СССР были подняты на государственный уровень [3, 41].

В 1946 г. при Первом главном управлении при СНК СССР создается медико-санитарная служба, начальником отдела назначается А.И. Бурназян. 21 августа 1947 г. Правительство СССР принимает решение о создании при Министерстве здравоохранения СССР Третьего Главного управления для разработки научно-обоснованных норм радиационной безопасности и организации медицинского обслуживания работников атомной отрасли.

Для изучения влияния радиации на человека и разработки средств защиты в 1946 г. по инициативе И.В. Курчатова в системе Академии наук СССР была создана радиационная лаборатория, в 1948 г. переименованная в Институт биофизики, ныне Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России [42].

В 1956 г. для обеспечения радиационной безопасности населения и персонала неядерных объектов создается Институт радиационной гигиены Минздрава РФ, ныне Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Роспотребнадзора [43]. Одновременно с созданием Института радиационной гигиены по всей стране в республиканских и областных санитарно-эпидемиологических станциях создаются лаборатории радиационного контроля.

Государственное нормирование радиационного фактора в СССР берет свое начало с рассмотрения по инициативе И.В. Курчатова на секции НТС ПГУ при СНК СССР в мае 1948 г. проекта временных норм радиационной

безопасности. В августе 1948 г. Главным государственным инспектором 3-го ГУ Минздрава СССР были утверждены «Общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих на объектах комбината № 817» – Нормы и правила Т-1031с. Этими нормами и правилами были утверждены пределы доз облучения персонала радиационных объектов: устанавливалась дневная норма в 0,1 рентгена и 30 рентген в год. Кроме того, были утверждены предельно допустимые концентрации радионуклидов в воздухе рабочих помещений, допустимые уровни загрязнения спецодежды и оборудования [27, 41].

Необходимо отметить, что нормирование в СССР базировалось на данных всего мирового сообщества, которые собирала и анализировала МКРЗ. Свои труды она издавала в виде публикаций. Пределы доз, установленные Нормами и правилами Т-1031с, полностью соответствовали рекомендациям МКРЗ от 1936 г. [3].

Учитывая международный опыт и рекомендации МКРЗ, в СССР уже через 4 года после установления первых государственных нормативов дневной предел дозы снижается в два раза (1952 г.), а еще через год (1953 г.) вводится годовой предел дозы для персонала в 15 рентген (Нормы 129-53¹). Как менялись дозовые нормативы, рекомендованные МКРЗ и устанавливаемые в СССР, наглядно представлено в Комментариях к Нормам радиационной безопасности [41].

С 1953 г. радиационная безопасность в СССР начала обеспечиваться санитарными правилами, которые, кроме пределов доз облучения, устанавливали требования к проектированию, организации технологического процесса, индивидуальной защите и медицинскому обслуживанию работающих с источниками ионизирующего излучения не только в атомной промышленности, но и во всех других отраслях промышленности и народного хозяйства страны [27, 28, 41]. Санитарные правила (СП № 233-57²), введенные в 1957 г., регламентировали дозу облучения персонала – 15 бэр в год. Через 3 года (в 1960 г.³) в СССР

принимают Правила 333-60, устанавливающие предельный годовой норматив облучения профессионалов 5 бэр в год (50 мЗв) [41].

Указанные нормативы сохранялись вплоть до принятия в России в 1996 г. Федерального закона «О радиационной безопасности населения» и Норм радиационной безопасности (НРБ-96). Этими документами устанавливались пределы доз для персонала 100 мЗв за 5 лет, в среднем 20 мЗв/год, но не более 50 мЗв/год, и пределы доз для населения – 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год. Кроме того, устанавливались пределы эквивалентных доз в хрусталике глаз, коже, кистях рук и стопах^{4,5}. П.В. Рамзаеву, который с 1973 г. был членом МКРЗ и участвовал в подготовке двух базовых публикаций МКРЗ – 26 и 60, удалось в Федеральном законе «О радиационной безопасности населения» реализовать самые передовые научные достижения в области обеспечения радиационной безопасности: впервые дал определение понятия «Радиационная безопасность населения»; впервые в Российской Федерации внедрил понятие эффективной дозы облучения. Одним из достижений этого закона стало включение требований о занесении результатов оценки состояния радиационной безопасности в радиационно-гигиенические паспорта организаций и территорий и учета индивидуальных доз облучения, полученных гражданами от всех источников излучения, осуществляющегося в рамках Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения (ЕСКИД). Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД стали объективной информационной основой принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации [44–47].

Установленные в Федеральном законе «О радиационной безопасности населения» и НРБ-96 нормативы сохранились и в НРБ-99, и в НРБ-99/2009, и действуют до настоящего времени⁶. Реализованные в Федеральном законе «О

¹ Санитарные правила и нормы при работе с радиоактивными изотопами. Утверждены Главной Государственной санитарной инспекцией Минздрава СССР 4 апреля 1953 г. за № 129-53, М., Медгиз, 1953. [Sanitary rules and norms for the work with radioactive isotopes. Approved by the Main State sanitary inspection of the Ministry of Healthcare of the USSR 04.04.1953, #129-53, М.:Medgiz, 1953(In Russ.)]

² Санитарные правила перевозки, хранения, учета и работы с радиоактивными веществами. Утверждены Главным Государственным санитарным инспектором СССР В.М. Ждановым 14 января 1957 г. № 233-57 [Sanitary rules on transportation, storage, accounting and work with radioactive substances. Approved by the Chief Main State sanitary inspector of the USSR V.M. Zdanov 14.01.1957, #233-57(In Russ.)]

³ Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. Утверждены Главным Государственным санитарным инспектором СССР М. Никитичным 25 июня 1960 г. № 333-60 и Председателем Государственного комитета Совета министров СССР по использованию атомной энергии В. Емельяновым 21 июля 1960 г., М., Госатомиздат, 1960 [Sanitary rules on the work with radioactive substances and sources of ionizing exposure. Approved by the Chief Main State sanitary inspector of the USSR M. Nikitin 25.06.1960 #333-60. М.: Gosatomizdat, 1960 (In Russ.)]

⁴ Федеральный Закон от 09.01.96 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» с изменениями от 22 августа 2004 г., 23 июля 2008 г. (Собрание законодательства Российской Федерации, 1996, № 3, ст. 141; 2004, № 35, ст. 3607; 2008, № 30 (ч.2), ст. 3616) [Federal State Law #3-FZ, 09.01.1996 "On the radation safety of the public" (In Russ.)]

⁵ Гигиенические нормативы. ГН 2.6.1.054-96. Нормы радиационной безопасности (НРБ-96) [Hygienic norms GN 2.6.1.054-96. Norms of the radiation safety NRB-96(In Russ.)]

⁶ СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» (зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный номер 14534). [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 from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ Last accessed 21.11.2021. (In Russ.)]

радиационной безопасности населения», НРБ-96 и НРБ-99 международные подходы по методологии оценки рисков, включающие в себя как количественную оценку возможных вредных последствий воздействия ИИИ на здоровье человека, так и дифференциацию промышленных объектов по степени их потенциальной опасности, прочно вошли в практику радиационной защиты Российской Федерации. Введение эффективной дозы в качестве меры риска возникновения отдаленных последствий для здоровья в рамках отечественной системы обеспечения радиационной безопасности полностью соответствовало международным рекомендациям и отвечало двум главным требованиям к показателям риска – с помощью единого количественного показателя можно было оценить не только вероятность возникновения негативных для здоровья последствий, но и степень их тяжести.

Требования по обеспечению радиационной безопасности в НРБ-96 уже включали все виды источников облучения – техногенные, природные, медицинские. Регламентирование техногенных источников осуществлялось для условий нормальной эксплуатации и в случае радиационной аварии, природных источников – раздельно в производственных и коммунальных условиях. Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» и НРБ-96, а в дальнейшем НРБ-99 в значительной степени учли опыт ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС, смягчили озабоченность общества по поводу радиационной безопасности, повысили радиационную безопасность населения в Российской Федерации, привели к существенному снижению доз облучения персонала и населения.

Заключение

Исполнилось 25 лет с момента принятия в 1996 г. Федерального закона «О радиационной безопасности населения». По свидетельству многочисленных специалистов в области обеспечения радиационной безопасности, данный закон сыграл огромную роль в гармонизации российского законодательства с международными рекомендациями, значительно повысил радиационную безопасность населения страны, смягчил озабоченность общества по поводу радиационной безопасности после аварии на Чернобыльской АЭС, привел к существенному снижению доз облучения персонала и населения. Принятие Федерального закона от 30 декабря 2020 г. № 492-ФЗ «О биологической безопасности в Российской Федерации» и подготовка проекта Федерального закона «О химической безопасности Российской Федерации» лишь подтвердили значимость и необходимость закона «О радиационной безопасности населения».

Следует особо подчеркнуть, что принципы радиационной защиты, нормативы и подходы к обеспечению радиационной безопасности в Федеральном законе «О радиационной безопасности населения» и НРБ-99/2009 построены на основе Публикации 60 МКРЗ и Международного базового стандарта безопасности МАГАТЭ 1997 г. и полностью им соответствуют. Данные документы на десятилетия гарантированно обеспечили и продолжают обеспечивать радиационную защиту персонала и населения по самым высоким международным стандартам.

Литература

1. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия; под ред. акад. РАН Онищенко Г.Г. и проф. Поповой А.Ю. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
2. Труфанов Г.Е. Черемисин В.М., Асатурян М.А. Давыденко В.А. История кафедры рентгенологии и радиологии Военно-медицинской академии в лицах и фактах. Санкт-Петербург, 2009. 224 с.
3. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена: учебник для вузов. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 384 с.
4. Гребенюк А.Н., Стрелова О.Ю., Легеза В.И., Степанова Е.Н. Основы радиобиологии и радиационной медицины: Учебное пособие. СПб.: ООО «Издательство ФОЛИАНТ», 2012. 232 с.
5. Мур К. Радиевые девушки. Скандальное дело работниц фабрик, получивших дозу радиации от новомодной светящейся краски; перевод с английского И. Чорного. М.: Бомбора, 2019. 464 с.
6. Clark C. Radium girls, women and industrial health reform: 1910-1935. Univ. of North Carolina Press, 1997. 304 с.
7. Macklis R.M. Radithor and the era of mild radium therapy // Journal of the American Medical Association. 1990. T. 264, № 5. С. 614-618.
8. Duffin J., Hayter C.R. Baring the sole: The rise and fall of the shoe-fitting fluoroscope // Isis. 2000. Vol. 91, № 2. P. 260-282.
9. Стюарт Ф.А., Аклеев А.В., Хауэр-Дженсен М. Труды МКРЗ. Публикация 118. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты / под ред.: Аклеева А.В., Киселева М.Ф.; пер. с англ.: Е.М. Жидкова, Н.С. Котова. Челябинск, 2012. 384 с.
10. ICRP. International Recommendations for X-ray and Radium Protection. A Report of the Second International Congress of Radiology. P.A. Nordstedt & Soner, Stockholm, 1989. P. 62–73.
11. Lindell B. The history of radiation, radioactivity, and radiological protection. Part 1. The time before World War II. Pandora's box. URL: http://www.nks.org/download/pandoras_box_2019-05-31.pdf (дата обращения: 08.11.2021).
12. History of ICRU. URL: <https://www.icru.org/about-icru/history> (дата обращения: 08.11.2021).
13. Recommendations of the International X-Ray Unit Committee // Acta Radiologica. 1928. Vol. 9, № 3.1. P. 60-60.
14. Merkblatt über den Gebrauch von Schutzmassregeln gegen Röntgenstrahlen. URL: <https://energisch.ch/wp-content/uploads/2013/12/1913-Merkblatt-1913-der-D.-R.-G.--%C3%BCber-den-Gebrauch-von-Schutzma%C3%9Fregeln-gegen-R%C3%B6ntgenstrahlen-zitiert.pdf> (дата обращения: 08.11.2021).
15. Oliver R. Seventy-five years of radiation protection // The British journal of radiology. 1973. Vol. 46, № 550. P. 854-860.
16. Hendee W.R. History, current status, and trends of radiation protection standards // Medical Physics. 1993. Vol. 20, № 5. P. 1303–1314. DOI:10.1118/1.597153.
17. Lindell B. The history of radiation, radioactivity, and radiological protection. Part 2. The 1940s. The sword of Damocles. URL: <http://www.nks.org/scripts/getdocumecnt.php?file=111010214696393> (дата обращения: 08.11.2021).
18. Грачев А.С., Швец Д.В., Лобковская Н.И. Становление и развитие радиационной безопасности в нормативных документах: история вопроса // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2018. № 5. С. 255-258.

19. International Recommendations for X-Ray and Radium Protection // *Acta Radiologica*. 1928. Vol. 9, № 3.1. P. 62-65.
20. ICRP, 1934. International recommendations for x-ray and radium protection. Revised by the International X-ray and Radium Protection Commission at the Fourth International Congress of Radiology, Zurich, July 1934. *British Journal of Radiology*. 1934. VII, 83.
21. Тюгин Л.А., Трофимова Т.Н., Карлова Н.А., и др. Первый в мире рентгенорадиологический институт и российская ассоциация рентгенологов и радиологов отмечают вековой юбилей // *REJR*. 2019. Т. 9, № 2. С. 8-16. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-8-16.
22. Народный комиссариат труда СССР. Постановление от 9 сентября 1925 г. № 233/389 Об охране труда работников в рентгеновских кабинетах.
23. Совет народных комиссаров СССР. Постановление от 1 июля 1940 г. № 1120 Об утверждении списка профессий с вредными условиями труда, для которых устанавливается шестичасовой рабочий день.
24. Наркомздрав СССР. Положение об извещении и регистрации профессиональных отравлений и профессиональных заболеваний. Утверждено 16 февраля 1939 года.
25. Романовский В.Н., Шашуков Е.А. Радий в Радиовом институте // *Радиохимия*. 2009. Т. 51, № 2. С. 191-192.
26. Гигиена труда в производстве радия: под ред. В.А. Левицкого и А.А. Летавет. М.-Л., 1935. 176 с.
27. Панфилов А.П. Эволюция системы обеспечения радиационной безопасности атомной отрасли страны и её современное состояние // *Радиация и риск*. 2016. Том 25, № 1. С. 47-64.
28. Панфилов А.П. Исторические аспекты создания и развития основных объектов атомной отрасли страны. Радиационное воздействие на персонал в разные периоды времени // *АНПИ*. 2020. № 3 (102). С. 3-25.
29. Cantril S.T., Parker H.M. The Tolerance Dose. *Manhattan District Report MDDC-1100*. Oak Ridge Associated Universities. 1945.
30. International recommendations on radiological protection. Revised by the International Commission on Radiological Protection at the Sixth International Congress of Radiology, London, July 1950 // *British Journal of Radiology*. Vol. 24, № 277. P. 46-53. DOI:10.1259/0007-1285-24-277-46.
31. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН). United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation НКДАР ООН. URL: https://www.unscear.org/unscear/en/about_us.html (дата обращения: 08.11.2021).
32. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). International Atomic Energy Agency (IAEA). URL: <https://www.iaea.org/ru/o-nas/istoriya> (дата обращения: 08.11.2021).
33. ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 1. Pergamon Press. New York. 1959.
34. ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford. 1966.
35. ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. 1977.
36. ICRP. Non-stochastic effects of irradiation. ICRP Publication 41. 1984.
37. ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. 1990. 1991.
38. International Basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Vienna: IAEA (Safety series, 115). 1997.
39. Андрюшин И.А., Чернышёв А.К., Юдин Ю.А. Укрощение ядра. Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР. Саров: Красный Октябрь, 2003. 481 с. ISBN 5-7439-0621-6.
40. Гончаров Г.А., Рябев Л.Д. О создании первой отечественной атомной бомбы // *Успехи физических наук*. 2001. Т. 171. № 1. С. 79-104.
41. Комментарии к Нормам радиационной безопасности (НРБ-99-2009) / Под ред. академика РАН Г.Г. Онищенко. М., 2012. 216 с.
42. Григорьев Ю.Г. К истории становления и развития Института биофизики МЗ СССР на протяжении 70 лет (эссе очевидца) // Сборник статей, посвященных 70летию Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» (1946–2016 гг.). Под общей редакцией Л.А. Ильина, В.В. Уйба, А.С. Самойлова. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. С. 73-80.
43. Романович И.К., Архангельская Г.В., Тихонова А.И. Санкт-Петербургскому научно-исследовательскому институту радиационной гигиены – 50 лет // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2007. № 2. С. 75-78.
44. Онищенко Г.Г., Звонова И.А., Балонов М.И., и др. Научное наследие профессора Павла Васильевича Рамзаева // *Радиационная гигиена*. 2019. Том 12, № 2 (спецвыпуск). С. 9-19.
45. Онищенко Г.Г., Романович И.К. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7, № 4. С. 5-22.
46. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации: Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 3. С. 7-17.
47. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. 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 // *Радиационная гигиена*. 2017. Т. 10, № 3. С. 18-35.

Поступила: 22.11.2021 г.

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

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, академик 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

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

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент, кафедра общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Библин Артем 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

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

Для цитирования: Онищенко Г.Г., Романович И.К., Историк О.А., Водоватов А.В., Библин А.М., Кормановская Т.А. К 125-летию открытия радиоактивности: история становления и текущее состояние нормативного обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 6-16 DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-6-16

On the 125th anniversary of the discovery of radioactivity: history of development and current state of regulation of the provision of the radiation safety of the public

Gennadiy G. Onischenko ^{1,4}, Ivan K. Romanovich ^{1,2}, Olga A. Istorik ³, Aleksandr V. Vodovatov ^{2,5}, Artem M. Biblin ², Tatyana A. Kormanovskaya ²

¹Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Saint-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

³ Federal service of surveillance on consumer rights protection and human Well-Being in Leningrad region, Saint-Petersburg, Russia

⁴I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Moscow, Russia

⁵ Saint-Petersburg State Medical Pediatric University, Saint-Petersburg, Russia

This paper is focused on the history of development and current state of regulation of the provision of radiation safety of the public. It includes data on the history of discovery of the X-rays, radioactivity and development of the atomic industry in the USSR and in the world as well as the issues of evaluation of the radiobiological effects of the ionizing radiation on the human and history of the development of regulations. It is indicated, that the principles of the radiation safety, norms and approaches to the provision of the radiation protection presented in the Federal state Law № 3-FZ “On the radiation safety of the public” and NRB 99/2009 fully comply with the ICRP Publication 60 (1990) and International Basic Safety Standard (IAEA, 1997). For decades, FZ-3 and NRB 99/2009 have allowed provisioning the high level of radiation safety of the personnel and the public.

Key words: X-rays, roentgen rays, radioactivity, nuclear power, radiation safety, doses of ionizing radiation, deterministic effects, tissue reactions, stochastic effects, regulation.

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

References

- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Balabina TA, Bashketova NS, et al. Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures; ed. by academician of RAS Onischenko G.G. and prof Popova A.Yu." FBUN NIIRG after prof. P.V. Ramzaev; 2018. 432 p. (In Russian).
- Trufanov GE, Cheremisin VM, Asaturyan MA, Davydenko VA. History of the department of roentgenology and radiology of the Military-medical Academy in faces and facts. Saint-Petersburg, 2009. 224 p. (In Russian).
- Ilyin LA, Kirillov VF, Korenkov IP. Radiation hygiene: a handbook. Moscow: GEOTAR-Media; 2010. 384 p. (In Russian).
- Grebenyuk AN, Strelova OYu, Legeza VI, Stepanova EN. Basics of radiobiology and radiation medicine: a handbook. Saint-Petersburg: JSC "FOLIANT publishing"; 2012. 232 p. (In Russian).
- Mur K Radium girls. A shocking case of factory workers exposed by the novel luminous paint. Translation from English by I. Chorniy. Moscow: Bombora; 2019. 464 p. (In Russian).
- Clark C. Radium girls, women and industrial health reform: 1910-1935. Univ. of North Carolina Press; 1997. 304 p.
- Macklis RM. Radithor and the era of mild radium therapy. *Journal of the American Medical Association*. 1990;264(5): 614-618.
- Duffin J, Hayter CR. Baring the sole: The rise and fall of the shoe-fitting fluoroscope. *Isis*. 2000;91(2): 260-282.
- Styuart FA, Akleev AV, Khauer-Dzhensen M. Annals of ICRP. Publication 118. ICRP Statement on Tissue Reactions. Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. Ed. by Akleev A.V., Kiselev M.F.; translation from English by E.M. Zhidkov, N.S. Kotov. Chelyabinsk; 2012. 384 p. (In Russian).
- ICRP. International Recommendations for X-ray and Radium Protection. A Report of the Second International Congress of Radiology. P.A. Nordstedt & Soner, Stockholm: 1989. P. 62–73.
- Lindell B. The history of radiation, radioactivity, and radiological protection. Part 1. The time before World War II. Pandora's box. Available on: http://www.nks.org/download/pandoras_box_2019-05-31.pdf (Accessed: 08.11.2021).
- History of ICRU. Available on: <https://www.icru.org/about-icru/history> (Accessed: 08.11.2021).
- Recommendations of the International X-Ray Unit Committee. *Acta Radiologica*. 1928;9(3.1): 60-60.
- Merkblatt ber den Gebrauch von Schutzmassregeln gegen Rntgenstrahlen. Available on: <https://energisch.ch/wp-content/uploads/2013/12/1913-Merkblatt-1913-der-D.-R.-G.-%C3%BCber-den-Gebrauch-von-Schutzma%C3%9Fregelngegen-R%C3%B6ntgenstrahlen-zitiert.pdf> (Accessed: 08.11.2021).
- Oliver R. Seventy-five years of radiation protection. *The British journal of radiology*. 1973;46(550): 854-860.
- Hendee WR. History, current status, and trends of radiation protection standards. *Medical Physics*. 1993;20(5): 1303–1314. DOI:10.1118/1.597153.
- Lindell B. The history of radiation, radioactivity, and radiological protection. Part 2. The 1940s. The sword of Damocles. Available on: <http://www.nks.org/scripts/getdocumecnt.php?file=111010214696393> (Accessed: 08.11.2021).
- Grachev AS, Shvets DV, Lobkovskaya NI. Development of the radiation safety in legislative documents: history. *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava = Bulletin of the Altay academy of economy and law*. 2018;5: 255-258. (In Russian).
- International Recommendations for X-Ray and Radium Protection. *Acta Radiologica*. 1928;9(3.1): 62-65.
- IXRPC, 1934. International recommendations for x-ray and radium protection. Revised by the International X-ray and Radium Protection Commission at the Fourth International Congress of Radiology, Zurich, July 1934. *British Journal of Radiology*. 1934. VII, 83.
- Tyutin LA, Trofimova TN, Karlova NA, Boytsova MG, Zorin YaP. World first radiological institute and Russian association of roentgenology and radiology commemorate a century jubilee. *Russian Electronic Journal of Radiology*. 2019; 9(2): 8-16. DOI:10.21569/2222-7415-2019-9-2-8-16. (In Russian).
- People Commissariat of Labor of the USSR. Decree № 233/389, 09.09.1925 "On the labor guard of the workers in the X-ray rooms". (In Russian).
- Council of People's Commissars of the USSR. Decree № 1120, 01.07.1940 "On the establishment of the list of professions with hazardous working conditions with six-hour working day". (In Russian).
- Narcomzdrav of the USSR. Decree on the notification and registration of the professional poisonings and professional diseases. Established 16.02.1939. (In Russian).
- Romanovsky VN, Shashukov EA. Radium in the Radium Institute. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 2009;51(2): 191-192. (In Russian).
- Hygiene of labor in the radium production: Ed. by VA. Levitsky, AA. Letavet. Moscow-Leningrad; 1935. 176 p. (In Russian).
- Panfilov AP. Evolution of the system of provision of the radiation safety of the nuclear branch of the country and its current condition. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2016;25(1): 47-64. (In Russian).
- Panfilov AP. Historical aspects of the development of the main facilities of the nuclear branch of the country. Radiation impact on the staff in different time periods. *ANRI = ANRI*. 2020;3(102): 3-25. (In Russian).
- Cantril ST, Parker HM. The Tolerance Dose. Manhattan District Report MDDC-1100. Oak Ridge Associated Universities. 1945.
- International Recommendations on Radiological Protection. Revised by the International Commission on Radiological Protection at the Sixth International Congress of Radiology, London, July 1950. *British Journal of Radiology*. 1950;24(277): 46–53. DOI:10.1259/0007-1285-24-277-46.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Available on: https://www.unscc.org/unscc/en/about_us.html (Accessed: 08.11.2021). (In Russian).
- International Atomic Energy Agency (IAEA). Available on: <https://www.iaea.org/ru/o-nas/istoriya> (Accessed: 08.11.2021).
- ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 1. Pergamon Press. New York. 1959.
- ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford. 1966.
- ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. 1977.
- ICRP. Non-stochastic effects of irradiation. ICRP Publication 41. 1984.
- ICRP. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 60. 1990. 1991.
- International Basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Viena: IAEA (Safety series, 115). 1997.
- Andryushin IA, Chernyshev AK, Yudin YuA. Taming of the nucleus. Pages of history of the nuclear weapons and nuclear infrastructure of the USSR. Sarov: Krasnyy Oktyabr; 2003. 481 p. ISBN 5-7439-0621-6. (In Russian).
- Goncharov GA, Ryabev LD. On the development of the first indigenous atomic bomb. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of physical sciences*. 2001;171(1): 79–104. (In Russian).
- Comments to the Norms of the Radiation Safety (NRB-99/2009). Ed. by academician of RAMS G.G. Onischenko. Moscow; 2012. 216 p. (In Russian).
- Grigoriev YuG. To the history of development of the Institute of biophysics MZ USSR during 70 years (essay of the witness) //

- Compendium of manuscripts devoted to the 70th anniversary of the Federal state budgetary facility "State scientific center of the Russian Federation – Federal medical biophysical center after A.I. Burnazyan" (1946-2016). Edited by LA. Ilyin, VV. Uyba, AS. Samoylov. Moscow: FGBU GNC FMBC after A.I. Burnazyan FMBA of Russia; 2016. P. 73-80. (In Russian).
43. Romanovich IK, Arkhangelskaya GV, Tikhonova AI. 50 years of Ramzaev Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2007;2: 75-78. (In Russian).
44. Onischenko GG, Zvonova IA, Balonov MI, Ramzaev VP, Repin VS. Scientific legacy of professor Pavel Vasilyevich Ramzaev. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2)(special issue): 9-19. (In Russian).
45. 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;7(4): 5-22. (In Russian).
46. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7-17. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17>.
47. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. 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;10(3): 18-35. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35>.

Received: November 22, 2021

Gennadiy G. Onischenko – Doctor of Medical Science, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; Head of the Department of Human Ecology and Environmental Hygiene, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

For correspondence: Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Academician 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)

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

Aleksandr V. Vodovatov – 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, 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

Tatyana A. Kormanovskaya – PhD, 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, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Onischenko G.G., Romanovich I.K., Istorik O.A., Vodovatov A.V., Biblin A.M., Kormanovskaya T.A. On the 125th anniversary of the discovery of radioactivity: history of development and current state of regulation of the provision of the radiation safety of the public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 6-16. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-6-16

^{241}Am и ^{137}Cs на территории Хойникского района Беларуси: оценка радиозоологической обстановки на современном этапе ситуации существующего облучения

Е.К. Нилова¹, В.Н. Боргновский², С.А. Тагай³, Н.В. Дударева³, А.Н. Никитин³

¹ Центр по ядерной и радиационной безопасности, Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь

² Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

³ Институт радиобиологии, Национальная академия наук Беларуси, Гомель, Беларусь

В статье представлены результаты исследований Хойникского сегмента из цикла работ по оценке современных уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания местного производства, а также доз внутреннего облучения населения территории Гомельской области Беларуси, прилегающей к зоне отселения Чернобыльской АЭС. Целью исследований данной работы являлась консервативная оценка ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs , поступающих в организм с вдыхаемым воздухом и продуктами питания, для жителей 96 подворий в 30 населенных пунктах частного сектора Хойникского района Гомельской области. Приведены результаты измерений современных уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания, произведенных на частных подворьях данного региона. Определение ^{241}Am в продуктах выполнялось радиохимическим методом с использованием селективных экстракционно-хроматографических смол и альфа-спектрометрического измерения. Определение ^{241}Am в почве и ^{137}Cs в почве и продуктах выполнялось гамма-спектрометрическим методом. Значение плотности современного загрязнения почвы ^{241}Am на территории обследованных пунктов Хойникского района не превышает 4 кБк/м², при этом плотность загрязнения ^{137}Cs на 1–2 числовых порядка величины выше и варьирует в диапазоне от 30 до 500 кБк/м². Удельная активность почвы ^{241}Am не превышает 10 Бк/кг в большинстве населенных пунктов, за исключением 3 пунктов, где содержание ^{241}Am в почве составляет от 14,1 до 16,1 Бк/кг. Диапазон МАЭД на территории подворий находится в пределах от 0,05 до 0,38 мЗв/ч, среднее значение 0,15 мЗв/ч. Превышений установленных нормативных требований по содержанию ^{137}Cs в картофеле, овощах (включая корнеплоды) и зерне – 80, 100 и 90 Бк/кг соответственно – не установлено. Содержание ^{241}Am в основных компонентах рациона, производимых в частном секторе Хойникского района, варьирует от единиц до десятков мБк/кг, что на 3 порядка величины ниже удельной активности ^{137}Cs . В структуре ожидаемой дозы внутреннего облучения населения от ^{241}Am преобладает ингаляционная составляющая (0,006–0,038 мЗв/год), которая более чем на порядок величины превышает дозу облучения от поступления данного радиоизотопа пероральным путем. При выполнении полевых работ на приусадебных участках наблюдаемые уровни содержания ^{241}Am в почве могут обусловить 85–98% дозы внутреннего облучения жителей за счет ингаляционного поступления суммы ^{241}Am и ^{137}Cs . В 6 из 30 обследованных пунктов максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs для жителей превышает 1 мЗв/год. В то же время ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{241}Am не превышает 0,04 мЗв/год. Формирование дозы внутреннего облучения населения Хойникского района преимущественно обусловлено поступлением ^{137}Cs пероральным путем.

Ключевые слова: ^{241}Am , ^{137}Cs , плотность загрязнения почвы, удельная активность, население, продукты питания, ингаляционное поступление, доза внутреннего облучения.

Введение

Состав и динамика аварийного выброса радиоактивных веществ, выброшенных в окружающую среду в результате взрыва на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС, а также особенности метеорологических условий в период 26 апреля – 10 мая 1986 г. обусловили сложный

характер загрязнения. Долговременному радиоактивному загрязнению подверглись территории двух десятков европейских государств площадью более 200 тысяч км², из них около 140 тысяч км² пришлось на территории Беларуси, России и Украины [1]. Законодательством ряда стран в качестве критерия для отнесения террито-

Тагай Светлана Алексеевна

Институт радиобиологии

Адрес для переписки: 246000, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16; E-mail: lanabuz@tut.by

рии к зоне радиоактивного загрязнения установлено значение величины плотности загрязнения ^{137}Cs – 1 Ки/км² (37 кБк/м²), что приблизительно в десять раз выше значений таковой величины, обусловленных глобальными радиоактивными выпадениями от испытаний ядерного оружия. Загрязнение территории Беларуси ^{137}Cs «чернобыльского» происхождения составило 23% общей площади страны, Украины – 7%, России – 1,5% территории ее европейской части. Около 35% выпадений радиоцезия на европейском континенте приходится на территорию Беларуси, поэтому последствия Чернобыля для Республики Беларусь были определены как национальное экологическое бедствие [2, 3].

В эколого-медицинском плане чернобыльская катастрофа с полным основанием признана исключительно тяжелой для жителей села и агропромышленного комплекса. На загрязненных радионуклидами территориях агропромышленное производство являлось важнейшим сегментом экономики, а основным контингентом населения в зоне аварии являлись сельские жители («сельский» тип питания) [4]. В этой связи в ситуации аварийного облучения сельскохозяйственная продукция, загрязненная техногенными радионуклидами, была одним из ведущих, а в некоторых случаях доминирующим источником облучения населения.

На территории Республики Беларусь радиоактивному загрязнению ^{137}Cs в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС подверглось более 1,8 млн га (или 21%) сельскохозяйственных земель. Из них 265 тыс. га (около 15%) были выведены из хозяйственного оборота в 1986 г. Перечень населенных пунктов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения, пересматривается и корректируется, согласно законодательству, один раз в 5 лет в зависимости от значений параметров, характеризующих радиационную обстановку. Так, на 01.01.2020 г. площадь территории радиоактивного загрязнения Беларуси ^{137}Cs вследствие его радиоактивного распада уменьшилась в 1,7 раза и составила 13,4% общей площади республики. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 08.02.2021 г. № 75 утверждена новая редакция Перечня населенных пунктов и объектов, находящихся в зонах радиоактивного загрязнения. По состоянию на начало 2021 г. в зонах загрязнения располагается 2022 населенных пункта (н.п.), в которых проживает около 1 млн человек. С учетом удельного веса загрязненных территорий, коллективной дозы облучения и потерь сельскохозяйственных земель в результате радиоактивного загрязнения к наиболее пострадавшим отнесен 21 район республики, из них 13

районов в Гомельской области [https://chernobyl.mchs.gov.by/novosti/339812/].

Наибольшими уровнями радиоактивного загрязнения, в том числе изотопами трансурановых элементов (ТУЭ) – ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu и ^{241}Am , характеризуется территория южных районов Гомельской области Республики Беларусь – Брагинского, Хойникского и Наровлянского, непосредственно прилегающих к зоне отселения ЧАЭС [5].

Согласно оценкам доклада Генассамблеи Научного комитета ООН по действию атомной радиации, максимальная общая активность ^{241}Am в окружающей среде ожидается к 2058 г. и будет составлять 0,077 ПБк, что в 2 раза превысит количество ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu , вместе взятых, в это же время [6].

Учитывая вышеизложенное, на данный период в ситуации существующего облучения, принимая во внимание увеличение ^{241}Am посредством естественного распада ^{241}Pu ($T_{1/2} = 14,3$ лет), важным является уточнение содержания данного радиоизотопа при сопоставлении с ^{137}Cs в почве и продуктах питания, а также последующая оценка вклада каждого из радионуклидов в дозы облучения населения, проживающего на территории радиоактивного загрязнения. В первой части выполненного цикла работ [7, 8] приведены результаты исследований указанных характеристик в населенных пунктах Брагинского района Гомельской области Беларуси, прилегающих к землям отселения ЧАЭС. Оценке данных параметров в н.п. Хойникского района посвящена настоящая статья.

Цель исследования – выполнить оценку доз внутреннего облучения ^{241}Am и ^{137}Cs жителей населенных пунктов на территории Хойникского района Гомельской области Беларуси.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ уровней содержания ^{241}Am и ^{137}Cs в почве и продуктах питания местного производства на территории Хойникского района.
2. Оценить вклад ^{241}Am и ^{137}Cs в дозы внутреннего облучения населения, проживающего на территории частного сектора Хойникского района.

Материалы и методы

На территории 96 частных подворий в 30 населенных пунктах Хойникского района Гомельской области Беларуси в 2018 г. был проведен отбор проб почвы и продуктов питания местного производства (табл. 1–3). Отбор почвенных образцов выполнялся с применением методов и средств [9], описанных в работах [7, 8], и сопровождал-

Таблица 1

Содержание ^{241}Am в почве подворий населенных пунктов Хойникского района Гомельской области, обследованных в 2018 г.

[Table 1

^{241}Am content in the soil of the farmsteads of the Khoyniki district villages surveyed in the Gomel region in 2018]

№	Населенный пункт [Village]	Количество проб (n) [Number of samples]	^{241}Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			$A_{\text{сред}} [A_{\text{aver}}]$		$A_{\text{мин}} [A_{\text{min}}]$		$A_{\text{макс}} [A_{\text{max}}]$		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	
1	Гречихино [Grechikhino]	3	4,7	0,9	3,1	0,7	6,3	1,2	65

№	Населенный пункт [Village]	Количество проб (n) [Number of samples]	²⁴¹ Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			A _{сред} [A _{aver}]		A _{мин} [A _{min}]		A _{макс} [A _{max}]		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	
4	Моклище [Moklishche]	1	3,1	0,7					73
5	Рабец [Rabets]	3	5,0	1,1	2,4	0,5	6,4	1,5	64
6	Слобожанка [Slobozhanka]	5	6,0	1,4	4,7	1,0	7,3	1,7	64
7	Храпково [Khrapkovo]	5	3,7	0,9	2,3	0,6	7,3	1,4	56
8	Дубровица [Dubrovitsa]	3	2,0	0,5	1,8	0,4	2,6	0,7	74
9	Велетин [Veletin]	3	1,6	0,4	1,0	0,2	2,3	0,7	54
10	Звеныцкое [Zvenyatskoe]	3	4,4	1,0	3,0	0,6	7,2	1,9	49
11	Корчевое [Korchevovoe]	3	1,8	0,5	1,4	0,4	2,7	0,7	59
12	Листвин [Listvin Listvin]	4	3,3	0,6	1,6	0,3	5,0	0,8	52
13	Мархлевск [Markhlevsk]	3	3,8	0,7	<1,8	<0,4	3,9	0,8	53
14	Петраш [Petrash]	1	4,6	0,9					50
15	Поселичи [Poselichi]	4	2,9	0,5	<1,4	<0,3	4,8	0,9	53
16	Пудаков [Pudakov]	3	3,3	0,9	1,3	0,3	6,8	1,8	53
17	Высокое [Vysokoye]	2	3,7	0,8	3,6	0,7	3,8	0,9	49
18	Губаревичи [Gubarevichi]	2	4,7	1,1	4,5	1,0	4,9	1,1	49
19	Ивановка [Ivanovka]	2	14,7	3,6	14,2	3,3	15,2	4,0	48
20	Рудаков [Rudakov]	2	3,0	0,7	1,9	0,4	4,0	0,9	47
21	Стреличево [Strelichevo]	7	3,7	0,9	1,3	0,3	6,3	1,5	50
22	Дворище [Dvoryshche]	5	5,2	1,2	2,3	0,7	7,0	1,5	53
23	Новоселки [Novoselki]	5	7,6	2,1	1,7	0,5	14,1	4,0	50
24	Пикулиха [Piculiha]	1	7,7	2,0					50
25	Судково [Sudkovo]	4	5,7	1,3	3,8	0,9	9,0	1,7	56
26	Тульговичи [Tulgovich]	2	4,2	1,0	2,8	0,6	5,5	1,2	53
27	Вить [Vit]	5	8,0	1,7	2,7	0,7	16,1	2,9	60
28	Езапов [Ezarov]	3	4,9	1,2	3,2	0,8	6,9	1,4	55

Окончание таблицы 1

№	Населенный пункт [Village]	Количество проб (n) [Number of samples]	²⁴¹ Am						Расстояние до ЧАЭС, км [Distance to the Chernobyl NPP, km]
			A _{сред} [A _{aver}]		A _{мин} [A _{min}]		A _{макс} [A _{max}]		
			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	
29	Борисовщина [Borisovshchina]	5	5,2	1,4	3,0	0,8	8,3	1,9	58
30	Поташня [Potashnya]	2	4,0	1,0	3,5	0,9	4,5	1,1	60

Таблица 2

Содержание ¹³⁷Cs в почве и мощность AMBIENTного эквивалента дозы (МАЭД) на подворьях населенных пунктов Хойникского района Гомельской области, обследованных в 2018 г.

[Table 2

¹³⁷Cs content in the soil and ambient dose equivalent rate (ADER) in farmsteads of the Khoiniki district villages surveyed in the Gomel region in 2018]

№	Населенный пункт [Village]	Количество проб (n) [Number of samples]	МАЭД [ADER]			¹³⁷ Cs					
			сред [aver]	мин [min]	макс [max]	A _{сред} [A _{aver}]		A _{мин} [A _{min}]		A _{макс} [A _{max}]	
			мкЗв/ч [μSv/h]			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]
1	Гречирино [Grechikhino]	3	0,09	0,08	0,10	273	53	142	31	316	59
2	Дуброва [Dubrova]	3	0,11	0,10	0,12	390	88	307	70	483	102
3	Корневка [Korenevka]	2	0,09	0,08	0,09	281	60	271	61	290	59
4	Моклище [Moklishche]	1	0,07			243	56				
5	Рабец [Rabets]	3	0,11	0,10	0,13	434	95	249	48	570	131
6	Слобожанка [Slobozhanka]	5	0,09	0,08	0,10	332	76	286	60	376	88
7	Храпково [Khrapkovo]	5	0,11	0,08	0,13	434	104	272	71	665	128
8	Дубровица [Dubrovitsa]	3	0,11	0,10	0,12	400	90	148	34	578	111
9	Велетин [Veletin]	3	0,10	0,08	0,13	368	95	198	56	590	140
10	Звеньяцкое [Zvenyatskoye]	3	0,18	0,17	0,18	851	188	820	170	899	179
11	Корчевое [Korchevovoye]	3	0,06	0,05	0,06	187	48	156	43	211	52
12	Листвин [Listvin Listvin]	4	0,34	0,29	0,38	2044	392	1696	350	2565	434
13	Мархлевск [Markhlevsk]	3	0,26	0,25	0,36	1945	394	1521	344	2316	464
14	Петраш [Petrash]	1	0,34			2077	390				
15	Поселичи [Poselichi]	4	0,17	0,15	0,21	997	209	825	193	1212	239
16	Пудаков [Pudakov]	3	0,22	0,17	0,28	1344	352	905	215	1858	498
17	Высокое [Vysokoye]	2	0,16	0,15	0,16	778	170	758	176	798	164

№	Населенный пункт [Village]	Количество проб (n) [Number of samples]	МАЭД [ADER]			¹³⁷ Cs					
			сред [aver]	мин [min]	макс [max]	A _{сред} [A _{aver}]		A _{мин} [A _{min}]		A _{макс} [A _{max}]	
			мкЗв/ч [μSv/h]			Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]	Бк/кг [Bq/kg]	кБк/м ² [kBq/m ²]
18	Губаревичи [Gubarevichi]	2	0,16	0,14	0,15	821	187	804	186	837	187
19	Ивановка [Ivanovka]	2	0,24	0,23	0,24	1537	378	1405	322	1669	434
20	Рудаков [Rudakov]	2	0,17	0,16	0,18	748	169	727	171	768	166
21	Стреличево [Strelischevo]	7	0,16	0,10	0,17	695	169	415	94	1051	270
22	Дворище [Dvoryshche]	5	0,16	0,13	0,2	794	199	696	160	1065	268
23	Новоселки [Novoselki]	5	0,18	0,13	0,25	978	260	489	134	1316	374
24	Пикулиха [Piculiha]	1	0,17			669	171				
25	Судково [Sudkovo]	4	0,11	0,10	0,13	475	106	369	86	742	142
26	Тульговичи [Tulgovichi]	2	0,29	0,28	0,29	1901	403	2006	426	1796	381
27	Вить [Vit]	5	0,10	0,10	0,11	484	103	284	73	894	158
28	Езапов [Ezarov]	3	0,12	0,11	0,12	513	128	405	102	598	123
29	Борисовщина [Borisovshchina]	5	0,12	0,10	0,12	497	135	343	93	620	143
30	Поташня [Potashnya]	2	0,10	0,10	0,11	310	78	226	54	394	101

Таблица 3

Содержание ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в продуктах питания с частных подворий Хойникского района Гомельской области

[Table 3

²⁴¹Am and ¹³⁷Cs contents in food products from private farmsteads of the Khoyniki district of the Gomel region]

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	¹³⁷ Cs*	²⁴¹ Am*	¹³⁷ Cs KH**	²⁴¹ Am KH**
		Бк/кг [Bq/kg]	мБк/кг [mBq/kg]	[¹³⁷ Cs F _v]	[²⁴¹ Am F _v]
Вить [Vit]	Картофель [Potatoes]	<1,0	1,3±0,3	<0,0103	0,0007
	Морковь [Carrot]	2,4±0,3	5,6±1,1	0,0329	0,0041
	Свекла [Beet]	1,4±0,6	7,3±1,3	0,0192	0,0054
	Листовой салат [Leaf salad]	2,2±0,8	8,1±2,0	0,0694	0,0147
	Перо лука [Onion feather]	1,5±1,0	7,6±1,7	0,0473	0,0138

Населенный пункт [Village]	Продукт [foodstuffs]	¹³⁷ Cs* Бк/кг [Bq/kg]	²⁴¹ Am* мБк/кг [mBq/kg]	¹³⁷ Cs КН** [¹³⁷ Cs F _v]	²⁴¹ Am КН** [²⁴¹ Am F _v]
Стреличево [Strelichevo]	Картофель [Potatoes]	2,8±0,8	1,5±0,3	0,0192	0,0012
	Морковь [Carrot]	2,8±0,9	2,1±0,6	0,0256	0,0022
	Свекла [Beet]	2,0±0,6	56,8±7,8	0,0183	0,0601
	Листовой салат [Leaf salad]	1,3±0,7	1,8±0,4	0,0285	0,0069
	Перо лука [Onion feather]	1,2±1,1	1,7±0,4	0,0263	0,0065
Тульговичи [Tulgovichki]	Картофель [Potatoes]	11,2±1,8	2,2±0,5	0,0279	0,0020
	Морковь [Carrot]	14,9±2,2	5,1±1,0	0,0495	0,0062
	Свекла [Beet]	2,7±0,8	5,8±1,1	0,0090	0,0070
	Листовой салат [Leaf salad]	1,9±1,0	3,5±0,7	0,0106	0,0125
	Перо лука [Onion feather]	1,7±1,0	2,8±0,8	0,0095	0,0100
Звенияцкое [Zvenyatskoe]	Картофель [Potatoes]	1,5±0,5	1,6±0,4	0,0090	0,0011
Ивановка [Ivanovka]	Перо лука [Onion feather]	2,2±0,6	5,9±1,2	0,0157	0,0042
Новоселки [Novoselki]	Зерно пшеницы [Wheat grain]	10,2±1,3	7,9±1,6	0,0094	0,0009

*Удельная активность радионуклидов в продуктах определена на натуральную массу (сырой вес). [The activity concentration of radionuclides in the products is determined on the wet weight].

** Коэффициент накопления или концентрационное отношение (КН). Отношение активности радионуклида в единице сухого веса растений Бк·кг⁻¹ к активности в сухой почве Бк·кг⁻¹. Безразмерный параметр [Transfer factor or Concentration ratio (F_v). The ratio of the activity concentration of radionuclide in the plant (Bq kg⁻¹ dry weight) to that in the soil (Bq kg⁻¹ dry weight). Dimensionless].

ся измерением мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) на высоте 1 м от поверхности почвы. На каждом участке выполняли 5 измерений по методу конверта до статистической неопределенности не выше 20%.

Содержание ²⁴¹Am (E_γ=59,6 кэВ) и ¹³⁷Cs (E_γ=661,6 кэВ) в почве определяли методом гамма-спектрометрии с использованием полупроводникового детектора расширенного энергетического диапазона [7, 8]. Для определения удельной активности ²⁴¹Am по пику полного поглощения 59,6 кэВ считалась приемлемой погрешность не выше 30% (95% вероятность).

Пробы продуктов питания местного производства отбирались на 6 частных подворьях, характеризующихся наибольшими значениями удельных активностей радионуклидов в почве. Продукты отбирались в количестве 1 кг каждого компонента основного рациона питания жителей населенных пунктов [10]: картофель, листовая зелень (салат, петрушка, лук), корнеплоды (свекла, морковь). Описание процедуры подготовки образцов продуктов питания для по-

следующих аналитических измерений приведено в предыдущих работах данного цикла исследований [7, 8].

Определение удельной активности ¹³⁷Cs в пробах продуктов питания выполнялось гамма-спектрометрическим методом; неопределенность измерений по пику полного поглощения 661 кэВ не превышала 30% (95% вероятность). Определение удельной активности ²⁴¹Am в пробах продуктов выполнялось методом комплексной радиохимической очистки с последующим альфа-спектрометрическим анализом. Алгоритм радиохимической процедуры включал очистку ²⁴¹Am с использованием индикатора выхода ²⁴³Am и селективных смол TRU-TEVA-Spec Resin, минимально детектируемая активность (МДА) ²⁴¹Am зависела от зольного остатка пробы и не превышала 0,001 Бк /пробу [7].

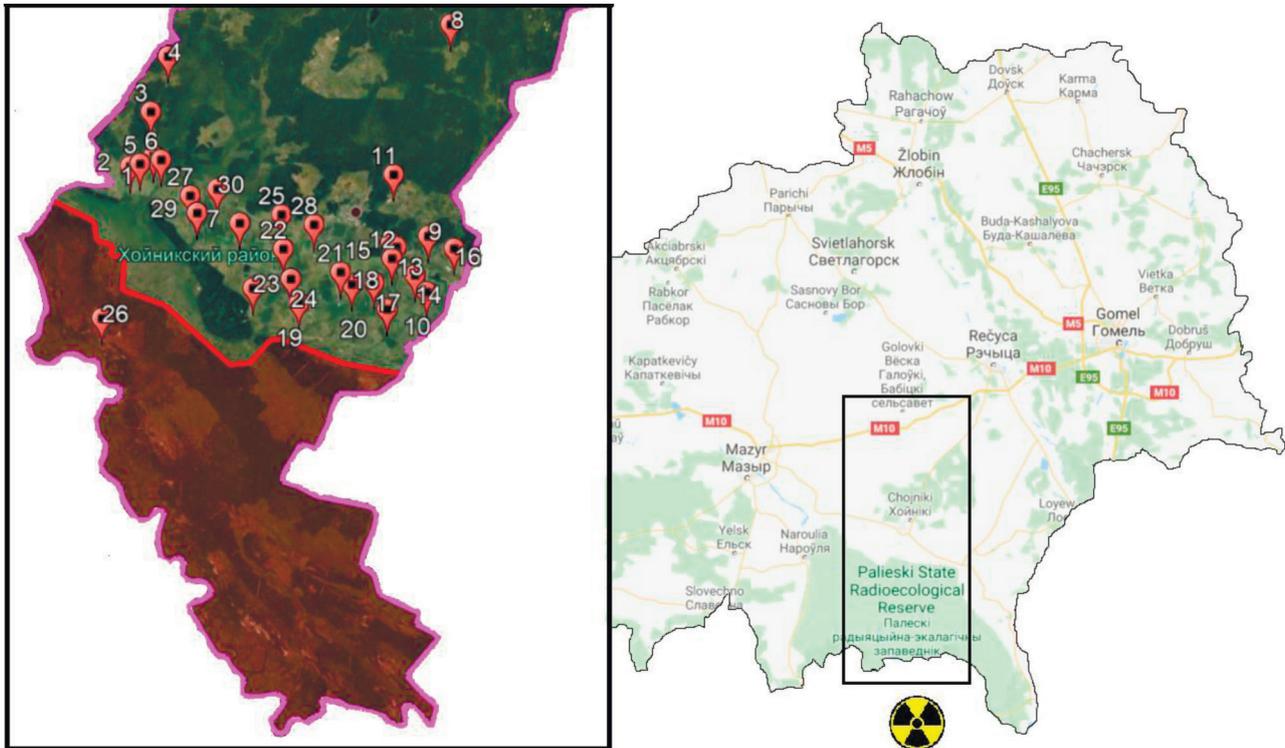
Порядок проведения оценки вклада ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs в дозы внутреннего облучения населения представлен в работе [8] с использованием фактических данных об уровнях современного загрязнения данными радиоизотопами почвы и продуктов питания.

Результаты и обсуждение

Удельная активность (на воздушно-сухую массу) и плотность загрязнения ^{241}Am и ^{137}Cs в почве представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. Дополнительно в таблице 1 указано расстояние до ЧАЭС, а в таблице 2 приведен диапазон МАЭД. Расположение обследованных н.п. относительно ЧАЭС и границ зоны отчуждения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) представлено на рисунке. В таблицах 1 и 2 и на рисунке сохранены порядковые номера населенных пунктов.

В результате исследований установлено, что плотность современного загрязнения почвы ^{241}Am на территории обследованных н.п. Хойникского района Гомельской области Беларуси не превышает 4 кБк/м², при этом плотность загрязнения ^{137}Cs на 1–2 числовых порядка величины выше и варьирует в диапазоне от 30 кБк/м² до 500 кБк/м². Удельная активность почвы ^{241}Am (см. табл. 1) не превышала 10 Бк/кг в большинстве из 30 обследованных пунктов, за исключением 3 н.п. – Ивановка (15,2 Бк/кг), Новоселки (14,1 Бк/кг) и Вить (16,1 Бк/кг).

Значения МАЭД на частных подворьях Хойникского района (см. табл. 2) находились в пределах от 0,05 до 0,38 мкЗв/ч при среднем значении 0,15 мкЗв/ч. Как и в Брагинском районе, между МАЭД и плотностью загрязнения ^{137}Cs (см. табл. 2) наблюдается достаточно сильная линейная взаимосвязь, коэффициент корреляции составляет 0,87 [8]. Данный факт свидетельствует об определяющей роли радиоактивного ^{137}Cs в формировании мощности дозы внешнего гамма-излучения на частных подворьях Хойникского района. ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева также проводились обследования н.п. Брянской области на приграничных территориях радиоактивного загрязнения России и Беларуси [11]. Исследования в России были выполнены на территории 57 частных подворий в 19 н.п., расположенных в Гордеевском, Злынковском, Клинцовском, Красногорском и Новозыбковском районах Брянской области. Полученные значения МАЭД находились в диапазоне от 90 до 357 нЗв/ч при средней величине 169 нЗв/ч, что сопоставимо с вышеприведенным диапазоном МАЭД для Хойникского района. Дополнительно в работе российских исследователей было выполнено



- Граница Полесского государственного радиационно-экологического заповедника [Border of Polesky State Radiation-Ecological Reserve]
- Граница Хойникского района [The border of the Khoyniki district]
- Чернобыльская АЭС [Chernobyl NPP]

Рис. Расположение населенных пунктов Хойникского района Гомельской области относительно зоны отселения (Полесский государственный радиационно-экологический заповедник) и ЧАЭС
[Fig.] Position of the Khoyniki area settlements (the Gomel region) relative to the resettlement zone (Polesky State Radiation and Ecology Reserve) and the Chernobyl NPP]

раздельное определение значений МАЭД от природных радионуклидов (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) и от техногенного ^{137}Cs в соответствии с методом, изложенным в [13]. В результате было установлено, что значения МАЭД от естественных радионуклидов на приграничной с Беларусью территории Брянской области варьировали от 18 до 53 нЗв/ч (средняя = 38 нЗв/ч). Принимая во внимание, что тип почвы приграничных районов Беларуси и России имеет схожие характеристики – преобладают дерново-подзолистые песчаные и супесчаные почвы, можно предположить аналогичный вклад от естественных радионуклидов в МАЭД на подворьях и Хойникского района Гомельской области Беларуси. В целом, уровни МАЭД, установленные в Хойникском районе в современный период, подтверждают доминирование чернобыльской компоненты в суммарной мощности дозы гамма-излучения на частных подворьях. При этом внешнее облучение ^{241}Am , обусловленное низкоэнергетическими γ -квантами ($E_{\gamma}=59,6$ кэВ), нивелируется на фоне значительно более высокой (на 2–4 порядка величины) активности ^{137}Cs ($E_{\gamma}=661$ кэВ). В работе [13] была определена также динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в типичных локациях сельской местности Брянской области России для отдаленного периода после Чернобыльской аварии. Выполненная оценка скорости снижения мощности дозы гамма-излучения от ^{137}Cs показала, что доза внешнего облучения сельского населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться примерно на 4% в год, учитывая радиоактивный распад ^{137}Cs (2,3% в год).

На приусадебных участках в 6 н.п. Хойникского района были отобраны продукты питания для установления содержания в них ^{241}Am , а также ^{137}Cs (см. табл. 3). В н.п. Тульговичи до аварии на ЧАЭС было 300 дворов, где проживало около 2000 человек. Сейчас в деревне расположилось местное Тульговичское лесничество, на территории деревни постоянно проживает только 1 человек – Шаменок А.М., трудовая деятельность которого связана с лесничеством, он имеет свое подворье и выращивает продукты для собственного потребления. Деревня Тульговичи (см. рис.) находится в границах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ). Пункты Вить и Стреличево (агротерритория) характеризуются наибольшей численностью населения в Хойникском районе, в каждом из них проживает несколько сотен жителей, при этом в районе отсутствуют н.п. (за исключением города Хойники) с населением более 1000. Всего в первые годы после катастрофы вынужденно покинули свои дома более 20 000 жителей района.

Содержание ^{241}Am в сельскохозяйственных культурах не регламентируется нормативными документами в Республике Беларусь, однако анализ возможного поступления данного радионуклида в организм человека с продуктами питания характеризуется высокой степенью значимости с точки зрения радиационной защиты населения на современном этапе ситуации существующего облучения.

Данные таблицы 3 свидетельствуют, что, как и в Брагинском районе [8], уровни содержания ^{241}Am во всех пробах продуктов питания, отобранных на территории Хойникского района, на 3 порядка величины ниже по сравнению со значением удельной активности ^{137}Cs . Из литературных источников известно, что листовая поверхность

зеленых культур является носителем как поверхностного, так и корневого загрязнения [14–17], а в корне- и клубнеплодах основное содержание ^{241}Am может концентрироваться в кожуре этих культур [18, 19]. Отмечалось также, что культурные растения могут накапливать в 10–100 раз больше радионуклидов, чем дикорастущие, поскольку выполнение сельскохозяйственных операций по возделыванию культур сопровождается более интенсивным пылеобразованием и дополнительным поступлением радионуклидов на листовую поверхность растений [5].

Принимая во внимание требования нормативных правовых актов Республики Беларусь, устанавливающих нормативы по содержанию ^{137}Cs в пищевых продуктах и сельскохозяйственном сырье (РДУ-99) (предельное содержание ^{137}Cs в картофеле, овощах (включая корнеплоды) и зерне принято равным 80, 100 и 90 Бк/кг соответственно), во всех пробах продуктов питания, произведенных на территории частного сектора Хойникского района (см. табл. 3), не зафиксированы значения удельной активности данного радионуклида, превышающие нормативные уровни.

Для количественной оценки биологической доступности радионуклидов принято использовать различные параметры, из которых наиболее распространены: коэффициент накопления (КН) – концентрационные отношения удельной активности радионуклидов в растительном продукте к удельной активности в почве (в международных публикациях принят безразмерный аналог F_v – concentration ratio) [20, 21] либо коэффициент перехода (КП) – отношение удельной активности радионуклидов в растениях к плотности загрязнения почвы на единицу площади. В таблице 3 представлены КН ^{137}Cs и ^{241}Am для каждой группы растительных продуктов местного производства Хойникского района. Значения КН находятся в пределах одного порядка величины:

- по ^{137}Cs клубнеплоды (картофель) – 0,009–0,028, корнеплоды (свекла, морковь) – 0,009–0,050, зеленые листовые культуры (салат, перо лука) – 0,010–0,069;
- по ^{241}Am картофель – 0,0007–0,0020, корнеплоды – 0,0024–0,0601, зеленые листовые культуры – 0,0042–0,0147.

КН ^{137}Cs в большинстве продуктов на порядок величины превышают КН ^{241}Am для соответствующей группы. Сравнение полученных параметров перехода с данными международного справочника МАГАТЭ IAEA-TRS-472 [20] показывает, что значения указанных характеристик попадают в диапазон справочных данных, который варьирует в пределах нескольких порядков величины. Применение уточненных параметров перехода радионуклидов для продуктов местного производства на территории загрязненных районов Гомельской области позволит снизить неопределенность для последующих расчетов доз внутреннего облучения, формируемых данным радионуклидом.

Результаты оценки вклада ^{241}Am и ^{137}Cs в дозы внутреннего облучения населения, выполненной в соответствии с рекомендациями [22–24], представлены в таблице 4. Для оценки ингаляционного пути поступления контролируемых радионуклидов были использованы установленные ранее коэффициенты ресуспензии [25, 26], характеризующие влияние сельскохозяйственных операций при выполнении населением полевых работ на загрязнение приземного слоя атмосферного воздуха радионуклидами.

Таблица 4
Оценка максимальной ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения от ^{241}Am и ^{137}Cs для подворий, Хойникского района Гомельской области, мЗв/год

[Table 4
Assessment of the maximum expected effective internal dose from ^{241}Am and ^{137}Cs at farmsteads of the Khoiniki district of the Gomel region, mSv/ year]

№	Населенный пункт [Village]	^{137}Cs			^{241}Am		
		пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]	пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]
1	Гречихино [Grechikhino]	0,22	0,0003	0,220	0,0004	0,011	0,011
2	Дуброва [Dubrova]	0,29	0,0004	0,290	0,0004	0,014	0,014
3	Кореневка [Korenevka]	0,18	0,0002	0,180	0,0003	0,008	0,008
4	Моклище [Moklishche]	0,15	0,0002	0,150	0,0002	0,007	0,007
5	Рабец [Rabets]	0,35	0,0005	0,351	0,0004	0,014	0,014
6	Слобожанка [Slobozhanka]	0,23	0,0003	0,230	0,0005	0,017	0,018
7	Храпково [Khrapkovo]	0,39	0,0005	0,391	0,0005	0,013	0,014
8	Дубровица [Dubrovitsa]	0,35	0,0004	0,350	0,0002	0,007	0,007
9	Велетин [Veletin]	0,34	0,0005	0,341	0,0002	0,008	0,008
10	Звеняцкое [Zvenyatskoe]	0,52	0,0008	0,521	0,0005	0,019	0,020
11	Корчевое [Korchevoe]	0,13	0,0002	0,130	0,0002	0,006	0,006
12	Листвин [Listvin Listvin]	1,50	0,0016	1,502	0,0003	0,009	0,009
13	Мархлевск [Markhlevsk]	1,40	0,0016	1,402	0,0003	0,009	0,009
14	Петраш [Petrash]	1,20	0,0014	1,201	0,0003	0,009	0,009
15	Поселичи [Poselichi]	0,65	0,0009	0,651	0,0003	0,010	0,010
16	Пудаков [Pudakov]	1,10	0,0018	1,102	0,0004	0,017	0,017
17	Высокое [Vysokoye]	0,48	0,0006	0,481	0,0003	0,009	0,009
18	Губаревичи [Gubarevichi]	0,50	0,0007	0,501	0,0003	0,011	0,011
19	Ивановка [Ivanovka]	1,00	0,0011	1,001	0,0009	0,030	0,031

№	Населенный пункт [Village]	¹³⁷ Cs			²⁴¹ Am		
		пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]	пищевая цепочка [food chain]	ингаляция [inhalation]	сумма [total]
20	Рудаков [Rudakov]	0,46	0,0006	0,461	0,0003	0,009	0,009
21	Стреличево [Strelischevo]	0,62	0,0010	0,621	0,0004	0,014	0,014
22	Дворище [Dvoryshche]	0,65	0,0010	0,651	0,0005	0,015	0,016
23	Новоселки [Novoselki]	0,81	0,0013	0,811	0,0009	0,038	0,039
24	Пикулиха [Piculiha]	0,40	0,0006	0,401	0,0005	0,020	0,021
25	Судково [Sudkovo]	0,44	0,0005	0,441	0,0006	0,016	0,017
26	Тульговичи [Tulgovichii]	1,20	0,0015	1,202	0,0004	0,012	0,012
27	Вить [Vit]	0,52	0,0006	0,521	0,0010	0,026	0,027
28	Езапов [Ezarov]	0,35	0,0006	0,351	0,0004	0,013	0,013
29	Борисовщина [Borisovshchina]	0,36	0,0006	0,361	0,0005	0,018	0,019
30	Поташня [Potashnya]	0,23	0,0004	0,230	0,0003	0,010	0,010

Оценка доз внутреннего облучения жителей н.п. Хойникского района Гомельской области Беларуси (см. табл. 4) при производстве и потреблении продуктов питания на личном подворье свидетельствует, что максимальные эффективные дозы от ингаляционного поступления ²⁴¹Am варьируют в пределах 0,006–0,038 мЗв/год и на 1–2 порядка величины превышают дозы от ингаляционного поступления ¹³⁷Cs (0,0002–0,0018 мЗв/год).

Для всех обследованных н.п. Хойникского района в структуре ожидаемой дозы внутреннего облучения населения от ²⁴¹Am преобладает ингаляционная составляющая, которая более чем на порядок величины превышает дозу облучения от поступления этого радионуклида пероральным путем. Ожидаемая доза внутреннего облучения населения Хойникского, как и Брагинского [8], района от ¹³⁷Cs, в основном, образуется пероральным путем, а ингаляционная составляющая в годовой дозе внутреннего облучения жителей от данного радионуклида не превышает 0,2%. В 6 из 30 обследованных н.п. – Листвин, Петраш, Мархлевск, Пудаков, Ивановка, Тульговичи ожидаемая доза внутреннего облучения от ¹³⁷Cs для жителей превы-

шает 1 мЗв/год. В то же время максимальная доза внутреннего облучения от ²⁴¹Am не превышает 0,04 мЗв/год (см. табл. 4).

Полученные результаты показали, что структура дозы внутреннего облучения за счет поступления ²⁴¹Am существенно отличается от структуры дозы за счет поступления ¹³⁷Cs. Наблюдаемые уровни содержания ²⁴¹Am в почве обследованных н.п. Хойникского района могут обусловить 85–98% ожидаемой дозы внутреннего облучения жителей за счет ингаляционного поступления суммы радионуклидов ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs при выполнении полевых работ на приусадебных участках. Ограничение полевых работ на пересохшей почве в сухой период, которые сопровождаются большим пылеобразованием и попаданием радионуклидов в зону дыхания работающих, является дополнительным резервом для сокращения поступления радиоизотопов в организм жителей ингаляционным путем. Как и в соседнем Брагинском районе, в Хойникском районе на современном этапе ситуации существующего облучения доминирует пероральный путь поступления ¹³⁷Cs, который может обусловить 93–99% ожидаемой

суммарной дозы внутреннего облучения жителей района. Наблюдаемые же уровни присутствия ^{241}Am в продуктах питания местного производства, которые население района получает на своих приусадебных участках, могут привести не более 0,3% в дозу внутреннего облучения от поступления суммы радионуклидов ^{241}Am и ^{137}Cs пероральным путем. Надлежащее соблюдение гигиенических требований (промыв зеленных культур и очистка от кожуры корне- и клубнеплодов) может также сократить нежелательное поступление альфа-излучающего ^{241}Am в рацион жителей по пищевой цепочке.

Заключение

В работе приведены результаты исследований по оценке радиоэкологической обстановки на современном этапе ситуации существующего облучения на приусадебных участках 30 населенных пунктов Хойникского района Гомельской области Беларуси. Установлено, что значение плотности современного загрязнения почвы ^{241}Am на территории обследованных пунктов Хойникского района не превышает 4 кБк/м², при этом плотность загрязнения ^{137}Cs на 1–2 числовых порядка величины выше и варьирует в диапазоне от 30 до 500 кБк/м². Диапазон МАЭД на территории подворий находится в пределах от 0,05 до 0,38 мкЗв/ч, среднее значение 0,15 мкЗв/ч.

Содержание ^{241}Am в основных компонентах рациона, производимых в частном секторе Хойникского района, варьирует от единиц до десятков мБк/кг, что на 3 порядка величины ниже удельной активности ^{137}Cs . При этом удельная активность ^{137}Cs во всех продуктах питания соответствует требованиям нормативных правовых актов по содержанию радионуклидов в пищевых продуктах и сельскохозяйственном сырье (РДУ-99).

В структуре ожидаемой дозы внутреннего облучения населения от ^{241}Am преобладает ингаляционная составляющая (0,006–0,038 мЗв/год), которая более чем на порядок величины превышает дозу облучения от поступления данного радионуклида пероральным путем. При выполнении полевых работ на приусадебных участках наблюдаемые уровни содержания ^{241}Am в почве могут обусловить 85–98% дозы внутреннего облучения жителей за счет ингаляционного поступления суммы ^{241}Am и ^{137}Cs .

Формирование дозы внутреннего облучения населения Хойникского района преимущественно обусловлено поступлением ^{137}Cs пероральным путем – в 6 из 30 обследованных пунктов максимальная ожидаемая доза внутреннего облучения от ^{137}Cs для жителей превышает 1 мЗв/год; в то же время доза внутреннего облучения от ^{241}Am не превышает 0,04 мЗв/год.

Благодарность

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси» Л.В. Жуковой, Т.В. Ласько, М.В. Фирсаковой, В.А. Касьянчику за участие в выполнении работ на этапах проведения измерений содержания радионуклидов в образцах, их отбора и подготовки к анализу.

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить качество статьи.

Литература

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. Радиологические последствия и уроки радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 6-16. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-6-16
2. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия-Беларусь). Под ред. Ю.А. Израэля и И.М. Богдевича. Москва-Минск: Фонд «Инфосфера»; НИА-Природа, 2009. 140 с.
3. 35 лет после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: национальный доклад Республики Беларусь. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 152 с. ISBN 978-985-880-104-5.
4. Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. Радиоэкология и авария на Чернобыльской АЭС // Атомная энергия. 2006. Т.100, № 4. С. 267-276.
5. Конопля Е.Ф., Кудряшов В.П., Миронов В.П. Радиация и Чернобыль: Трансурановые элементы на территории Беларуси. Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2007. 128 с.
6. UNSCEAR 2008. Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Report to the General Assembly, Scientific Annexes C, D and E. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations, 2011. 219 p.
7. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., и др. ^{241}Am на территориях, прилегающих к белорусскому сектору зоны отселения Чернобыльской АЭС: загрязнение почв, продуктов питания и оценка доз внутреннего облучения населения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (специальный выпуск). С. 75-82. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12s-75-82.
8. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., и др. Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 25–37. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-25-37.
9. Булавик И.М., Переволоцкий А.Н., Дударева Н.В., Тагай С.А. Патент № 3793 Респ. Беларусь, МПК G01N1/04. Пробоотборник для послойного извлечения образцов грунта: пат. на полезную модель; опубл. 30.08.07 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 4(57). С. 231-232.
10. Потребление основных продуктов питания в домашних хозяйствах. Национальный статистический комитет Республики Беларусь. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/dokhody-i-potreblenie-domashnikh-khozyaystv/operativnye-dannye/> / potreblenie-osnovnykh-produktov-pitaniya-v-domashnikh-khozyaystvakh / (Дата обращения: 30.06.2021).
11. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Оценка вклада природной и техногенной компоненты в мощность Ambientного эквивалента дозы на огородах в населенных пунктах Брянской области // Радиационно-гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: Сб. мат. межд. науч.- практ. конф. СПб, 2021. С. 174-175.
12. Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson S., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29.

13. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 38–46. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-38-46
14. Павлоцкая Ф.И., Поспелов Ю.И., Мясоєдов Б.Ф., и др. Поведение трансплутониевых элементов в окружающей среде // Радиохимия. 1991. № 5. С. 112–119.
15. Аверин В.С., Подоляк А.Г., Тагай С.А., и др. Америций и плутоний в агроэcosystemах. Чернобыльская катастрофа 1986 года. РНИУП «Институт радиологии», 2014. 176 с.
16. Romney E.M., Wallace A., Schulz R.K., et al. Plant uptake of ²³⁷Np, ^{239,240}Pu, ²⁴¹Am, and ²⁴⁴Cm from soils representing major food production areas of the United States // Soil Science. 1981. Vol. 132, No. 1. P. 40-59. DOI: 10.1097/00010694-198107000-00007
17. Bunzl K., Kracke W. Soil to plant transfer of ²³⁹+²⁴⁰Pu, ²³⁸Pu, ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr from global fallout in flour and bran from wheat, rye, barley and oats, as obtained by field measurements // Science of the Total Environment. 1987. Vol. 63, No. C. P. 111-124. DOI: doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4.
18. Апплби Л.Дж., и др. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиозология после Чернобыля; пер. с англ., под ред. Уорнера Ф. и Харрисона Р. М.: Мир, 1999. 512 с.
19. Popplewell D.S., Ham G.J., Johnson T.E., et al. The uptake of plutonium-238, 239, 240, americium-241, strontium-90 and caesium-137 into potatoes // Science of the Total Environment. 1984. Vol. 38. P. 173-181.
20. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments/Technical Reports Series. TRS-472.Vienna: IAEA; 2010. 208 p.
21. International Atomic Energy Agency (IAEA) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments / IAEA-TECDOC-1616.Vienna: IAEA; 2009. 307 p.
22. International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna: IAEA; 2011. 303 p.
23. International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-1162. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency: updating IAEA-TECDOC-1162. Vienna: IAEA; 2000. 194 p.
24. International Atomic Energy Agency (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: IAEA; 2014. 436 p.
25. Подоляк А.Г., Тагай С.А., Аверин В.С., и др. Дозы облучения работников при проведении сельскохозяйственных операций на загрязнённой радионуклидами (¹³⁷Cs, ²⁴¹Am и ^{238,239-240}Pu) территории // Радиация и риск. 2014. Т. 23, № 2. С.85-93.
26. Podolyak A., Tagai S., Nilova E., Averin V. Assessment of committed doses received by agricultural workers in grain harvesting operations in the areas of radioactive contamination // Radioprotection. 2017. Vol. 52, No. 1. P. 37-43.

Поступила: 11.08.2021 г.

Нилова Екатерина Константиновна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Центра по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Беларусь
Бортновский Владимир Николаевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой общей гигиены, экологии и радиационной медицины Гомельского государственного медицинского университета, Гомель, Беларусь
Тагай Светлана Алексеевна – научный сотрудник Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси. Адрес для переписки: 246000, Беларусь, Гомель, ул. Федюнинского, д. 16; E-mail: lanabuz@tut.by
Дударева Наталья Владимировна – научный сотрудник Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
Никитин Александр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научной работе Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

Для цитирования: Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., Дударева Н.В., Никитин А.Н. ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs на территории Хойникского района Беларуси: оценка радиозэкологической обстановки на современном этапе ситуации существующего облучения // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 17-30. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-17-30

²⁴¹Am and ¹³⁷Cs in the Khoyniki district of Belarus: updated radiological assessment of the local existing exposure situation

Ekaterina K. Nilova ¹, Vladimir N. Bortnovsky ², Svetlana A. Tagai ³, Natalia V. Dudareva ³, Alexander N. Nikitin ³

¹ Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

² Gomel State Medical University, Gomel, Belarus

³ Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

The results covered in this paper relate to the “Khoyniki” research sub-unit of a larger-scale sequence of studies focused on the local assessments of the present-day ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs concentrations in the soils and locally produced foods, with the estimation of the public internal radiation doses in the residential areas of the Gomel region of the Republic of Belarus most closely adjacent to the ChNPP resettlement zone. The objective was to make a conservative estimate of a committed annual dose of internal exposure from ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs received by the villagers of 96 farmsteads in 30 settlements of the private sector of Khoyniki countryside through both, inhalation and consumption of local foodstuffs. The results obtained in this study include an update of the existing contamination levels of ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs present in the local soils and foods grown or produced in private backyards and households. ²⁴¹Am in food samples was determined by alpha-spectroscopy radiochemical analysis with the use of selective extraction-chromatographic resins. Gamma-spectrometry techniques were used to measure ²⁴¹Am in soil samples and ¹³⁷Cs in soil and food samples. Based on our findings, the present-day deposition density of ²⁴¹Am in the soils does not exceed 4 kBq/m², while the values of ¹³⁷Cs contamination are by one to two orders of magnitude higher than that of ²⁴¹Am and vary between 30 and 500 kBq/m². Generally, the values of activity concentration of ²⁴¹Am detected in local soils are well within 10 Bq/kg in the majority of inspected villages, with the exception of three sites where higher levels of ²⁴¹Am contamination in soils were detected ranging from 14 to 16 Bq/kg. The ambient dose rates in the countryside range from 0.05 to 0.38 μSv/hour, with the average of 0.15 μSv/hour. No cases of ¹³⁷Cs contamination above the established reference levels of 80, 100 and 90 Bq/kg have been found in the local food samples of, respectively, potatoes, vegetables (incl. roots and tubers) and grains. The content of ²⁴¹Am in the staple foods produced in the area varies from single digits to tenths of mBq/kg, which is less by three orders of magnitude than ¹³⁷Cs activities concentration found in the same staples. Of the two pathways contributing to the local committed internal exposure from ²⁴¹Am, the dominant one is through inhalation (0.006–0.038 mSv/year) prevailing over the consumption pathway of this same radioisotope by at least one order of magnitude. At the time of gardening and other household field works, the existing levels of ²⁴¹Am contamination in soils are estimated to produce from 85 to 98% of the internal radiation dose received by individuals from inhaling the total of ²⁴¹Am and ¹³⁷Cs. The maximum committed annual doses of internal exposure from ¹³⁷Cs are estimated to be above 1 mSv/year in 6 out of 30 villages engaged in our study. At the same time, the estimated internal radiation dose due to ²⁴¹Am does not surpass 0.04 mSv/year. The ¹³⁷Cs major contribution to the internal exposure of villages in the Khoyniki countryside is through food consumption.

Key words: ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, deposition density, specific activity, population, foodstuffs, inhalation, internal exposure.

References

1. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK. Radiological consequences and lessons of the Chernobyl NPP and “Fukushima-1” NPP radiation accidents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 6-16. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-6-16.
2. Atlas of current and future effects of the Chernobyl accident on affected parts of the Russian Federation and Belarus (ACFE Russia-Belarus). Eds.: Israel YuA, Bogdevich IM. Moscow-Minsk: Foundation «Infosfera», NIA Priroda; 2009. 140 p. (In Russian).
3. 35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of overcoming its consequences: national report of the Republic of Belarus. Department for elimination of consequences of the Chernobyl disaster of the Ministry of emergency situations of the Republic of Belarus. Minsk: IVC Minfina; 2020. 152 p. (In Russian).
4. Aleksakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV. Radioecology and the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2006;100(4): 267-276. (In Russian).
5. Konoplya EF, Kudryashov VP, Mironov VP. Radiation and Chernobyl: Transuranic elements on the Belarus territory, Gomel: RNIUP «Institute Radiologii»; 2007. 128 p. (In Russian).
6. UNSCEAR 2008. Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Report to the General Assembly, Scientific Annexes C, D and E. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations; 2011. 219 p.
7. Nilova EK, Bortnovsky EV, Tagai SA, Dudareva NV, Zhukova LV. ²⁴¹Am on the territories adjacent to the Belarusian sector of the Chernobyl NPP resettlement zone: soil contamination, foodstuffs and population internal dose assessment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*.

Svetlana A. Tagai

Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus

Address for correspondence: Fedyuninsky Str., 4, 246007, Gomel, Republic of Belarus; E-mail: lanabuz@tut.by

- 2019;12 (2 (special issue)): 75-82. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426x-2019-12-2s-75-82.
8. Nilova EK, Bortnovsky VN, Tagai SA, Dudareva NV, Nikitin AN. Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 25-37. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-25-37.
 9. Bulavik IM, Perevolotskiy AN, Dudareva NV, Tagai SA. Inventors; Institute of Radiology, assignee. Republic of Belarus patent BY 3793; 2007. P. 231-232. (In Russian).
 10. Food consumption in households. National statistical Committee of the Republic of Belarus. Available from: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/dokhody-i-potreblenie-domashnikh-khozyaystv/operativnye-dannye/potreblenie-osnovnykh-produktov-pitaniya-v-domashnikh-khozyaystvakh>. [Accessed 30 June 2021] (In Russian).
 11. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Evaluation of the contribution of natural and technogenic components to the capacity of the ambient dose equivalent in vegetable gardens in the settlements of the Bryansk region. Radiation-hygienic consequences and lessons of the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and the Fukushima-1 nuclear power Plant: Proceedings of the international scientific-practical conference. St-Petersburg; 2021. P. 174-175 (In Russian).
 12. Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18-29.
 13. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 38-46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-38-46.
 14. Pavlotskaya FI, Pospelov Yul, Myasoyedov BF, Kuznetsov YuV, Legin VK. The behavior of transplutonium elements in the environment. *Radiokhimiya = Radiochemistry*. 1991;5: 112-119. (In Russian).
 15. Averin VS, Podolyak AG, Tagai SA, Kukhtevich AB, Buzdalkin KN, Tsarenok AA, et al. Americium and plutonium in agroecosystems. 1986 Chernobyl disaster. Gomel: RNIUP «Institute Radiologii»; 2014. 176 p. (In Russian).
 16. Romney EM, Wallace A, Schulz RK, et al. Plant uptake of ^{237}Np , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am , and ^{244}Cm from soils representing major food production areas of the United States. *Soil Science*. 1981; 132(1): 40-59. DOI: 10.1097/00010694-198107000-00007
 17. Bunzl K, Kracke W. Soil to plant transfer of $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{137}Cs and ^{90}Sr from global fallout in flour and bran from wheat, rye, barley and oats, as obtained by field measurements. *Science of the Total Environment*. 1987;63(C): 111-124. DOI: doi.org/10.1016/0048-9697(87)90040-4.
 18. Applbi LDzh, et al. Ways of migration of artificial radionuclides in the environment. Radioecology after Chernobyl. Ed. by Warner F, Harrison RM. Moscow: «Mir»; 1999. 512 p. (In Russian).
 19. Popplewell DS, Ham GJ, Johnson TE, Stather JW, Sumner SA. The uptake of plutonium-238, 239, 240, americium-241, strontium-90 and caesium-137 into potatoes. *Science of the Total Environment*. 1984;38: 173-181.
 20. International Atomic Energy Agency (IAEA) Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments/Technical Reports Series. TRS-472. Vienna: IAEA; 2010. 208 p.
 21. International Atomic Energy Agency (IAEA) Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments / IAEA-TECDOC-1616. Vienna: IAEA; 2009. 307 p.
 22. International Atomic Energy Agency (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards: general safety requirements. Interim edition. Vienna: IAEA; 2011. 303 p.
 23. International Atomic Energy Agency (IAEA) IAEA-TECDOC-1162. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency: updating IAEA-TECDOC-1162. Vienna: IAEA; 2000. 194 p.
 24. International Atomic Energy Agency (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: IAEA; 2014. 436 p.
 25. Podolyak AG, Tagai SA, Averin VS, Buzdalkin KN, Nilova EK. Radiation doses received by the workers involved in agricultural operations on the territories contaminated by radionuclides (^{137}Cs , ^{241}Am and $^{238,239+240}\text{Pu}$). *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2014;23(2): 85-93. (In Russian).
 26. Podolyak A, Tagai S, Nilova E, Averin V. Assessment of committed doses received by agricultural workers in grain harvesting operations in the areas of radioactive contamination. *Radioprotection*. 2017; 52(1): 37-43.

Received: August 11, 2021

Ekaterina K. Nilova – Ph. D. (Biology), Senior Researcher. Center for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Vladimir N. Bortnovsky – Ph. D. (Medicine), Associate Professor, Head of the Department of General Hygiene, Ecology and Radiation Medicine. Gomel State Medical University, Gomel, Republic of Belarus

For correspondence: Svetlana A. Tagai – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (Fedyuninsky Str., 4, 246007, Gomel, Republic of Belarus; E-mail: lanabuz@tut.by)

Natalia V. Dudareva – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

Alexander N. Nikitin – Ph. D. (Agriculture), Deputy Director for Science. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

For citation: Nilova E.K., Bortnovsky V.N., Tagai S.A., Dudareva N.V., Nikitin A.N. ^{241}Am and ^{137}Cs in the Khoyniki district of Belarus: updated radiological assessment of the local existing exposure situation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 17-30. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-17-30

Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы

А.В. Аклеев^{1,2}, М.О. Дегтева¹, Л.Ю. Крестинина¹

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

В статье представлены основные этапы и итоги 65-летних исследований канцерогенных последствий аварийного радиационного облучения населения Уральского региона. Радиоактивное загрязнение реки Течи и авария 1957 г. на производственном объединении «Маяк» явились причинами многолетнего облучения населения в широком диапазоне доз. Наиболее важными задачами исследования являлись реконструкция индивидуальных доз, прослеживание состояния здоровья и жизненного статуса членов когорт. Результаты исследований показали, что хроническое облучение человека по сравнению с острым не снижает риск развития злокачественных опухолей и лейкозов, а значение фактора мощности дозы не превышает единицу. Таким образом, по нашим данным, современные рекомендации Международной комиссии по радиологической защите занижают радиационный риск злокачественных опухолей и лейкозов при хроническом облучении населения в 2 раза. Перспективы дальнейших радио-эпидемиологических исследований на Урале связаны с анализом Уральской когорты аварийно-облученного населения, которая включает около 63 000 облученных людей и позволяет оценить радиационный риск солидных раков отдельных локализаций, лейкозов отдельных видов и нераковых эффектов.

Ключевые слова: радио-эпидемиологические исследования, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, злокачественные опухоли, лейкозы, фактор мощности дозы.

Введение

Радиоактивное загрязнение территорий Уральского региона и облучение населения связано с деятельностью и авариями на ПО «Маяк» – предприятии по переработке плутония для атомного оружия, которое начало работу в 1948 г. [1–3]. Наибольшее значение имели сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в реку Течу и авария 1957 г. Регламентные и аварийные сбросы ЖРО с различных стадий технологического цикла радиохимического производства ПО «Маяк» в 1949–1956 гг. стали причиной значительного загрязнения реки Течи. 29 сентября 1957 г. в результате термохимического взрыва емкости хранилища ЖРО, расположенного на промышленной площадке ПО «Маяк», образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Причины обеих аварий достаточно подробно проанализированы и описаны [1–3].

Предпринятые защитные мероприятия по ряду причин оказались недостаточно эффективными, и, как следствие, население подверглось хроническому радиационному воздействию в широком диапазоне доз, включая высокие. Критическим органом по дозе облучения у населения Течи и ВУРСа являлся красный костный мозг (ККМ) вследствие значительного поступления остеотропного ⁹⁰Sr с продуктами питания местного про-

изводства [4]. С 1955 г. в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России проводится анализ медицинских последствий аварийного облучения жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа. По мнению Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН), эти исследования являются чрезвычайно важными, так как позволяют проанализировать реально имевшие место эффекты хронического облучения человека [5]. Более того, сопоставление отдаленных последствий у жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа, а также у людей, переживших атомные бомбардировки в Японии (когорты «Life Span Study» – LSS), позволяет оценить значение фактора мощности дозы для радиационной индукции злокачественных новообразований (ЗНО).

Медицинское обследование населения прибрежных сел реки Течи было начато в 1951 г. специалистами мобильных бригад Московского института биофизики АМН СССР. В состав бригад также входили врачи медико-санитарной части ПО «Маяк», которые уже имели опыт диагностики лучевой патологии у персонала предприятия. Медицинские осмотры населения ВУРСа были начаты уже в первые дни после аварии. С 1955 г. и до настоящего времени наблюдение за состоянием здоровья населения

Аклеев Александр Васильевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: akleyev@urcrm.ru

сел реки Течи и ВУРСа осуществляет клиническое отделение УНПЦ РМ ФМБА России [6].

Для организации долгосрочного медицинского наблюдения и анализа радиационного риска канцерогенных эффектов у населения была создана когорта реки Течи (КРТ), которая включает 29 730 лиц, постоянно проживавших в 1950–1960 гг. в прибрежных селах реки Течи и родившихся до начала сбросов ЖРО [1, 3]. Когорту ВУРСа (КВУРС) составляют 21 427 жителей из 22 переселенных и 15 непереселенных сел, которые родились до аварии и проживали на ВУРСе до отселения или до 31 декабря 1959 г. [2].

Для организации долгосрочного медицинского наблюдения было необходимо сформировать регистр облученных людей, определить территорию медицинского наблюдения, сформировать адекватные группы сравнения, организовать прослеживание мест проживания облученных лиц и их жизненного статуса, а также оценить дозы облучения. Первоочередной задачей являлось создание регистра облученных людей. Основным источником информации для формирования регистра являлись похозяйственные книги, которые ежегодно обновляются и содержат точные сведения об индивидах, состоящих в каждом хозяйстве села. Для отслеживания миграции членов когорт, которая была связана в том числе с радиоактивным загрязнением территорий Уральского региона и переселением части жителей, в течение всего периода наблюдения проводится мониторинг мест проживания облученных лиц. В настоящее время состояние здоровья членов КРТ прослеживается на территории наблюдения, которая включает всю территорию Челябинской и Курганской областей [3].

Дозы облучения населения в период радиоактивных сбросов и в ранние сроки после взрыва не измерялись, а их ретроспективная оценка длительное время представляла значительные сложности. Многолетний комбинированный характер радиационного воздействия (внешнее и внутреннее облучение) предполагал решение ряда сложных проблем, таких как восстановление гамма-полей в ареале жизнедеятельности населения, режима их поведения, оценки рациона и поступления радионуклидов с продуктами питания и речной водой и др. [1, 2].

Первые оценки доз внешнего излучения членов КРТ были сделаны для обоснования контрмер лишь в 1959 г., а для членов КВУРС – в ближайшие несколько дней после аварии. Основными исходными данными для расчета доз являлись результаты измерений гамма-полей в воздухе на территории населенных пунктов с учетом средней продолжительности пребывания жителей на улице и в помещениях. Эти дозовые оценки были получены только для критических групп населения [1]. Индивидуализированные оценки органических доз у членов КРТ и КВУРС стали возможны только в 1990-е гг., когда в рамках Межправительственного соглашения между Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки началась разработка дозиметрической системы реки Течи (TRDS) [7].

Необходимость динамического анализа состояния здоровья облученных людей предопределила создание медико-дозиметрической базы данных (БД). Первоначально БД была представлена на бумажных носителях, а в 1970-е гг. начала создаваться компьютерная

БД. В настоящее время она содержит всю персональную медицинскую и дозиметрическую информацию как о самих облученных лицах, так и об их потомках за период с 1951 г. и до настоящего времени. БД включает регистры идентификации, семейного анамнеза, содержания радионуклидов в организме, органических доз, факторов риска, диагнозов, причин смерти и др. БД является динамической системой и функционирует в режиме постоянного и регулярного пополнения и обновления информации [1].

Достижения в реконструкции доз у аварийно-облученного населения сел реки Течи и ВУРСа

История радиоактивного загрязнения территорий Урала

Основными источниками радиоактивного загрязнения территорий и облучения населения являлись события на ПО «Маяк»: 1) сбросы ЖРО радиохимического завода в реку Течу в 1949–1956 гг.; 2) взрыв в хранилище высокоактивных отходов и образование ВУРСа в 1957 г.; 3) выбросы радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу в 1949–1967 гг.; 4) ветровой перенос загрязненного ила с берегов озера Карачай (открытого хранилища ЖРО) в 1967 г. Наиболее серьезные последствия имели первые две из перечисленных радиационных ситуаций. Карта-схема загрязнения территорий Урала долгоживущим ^{90}Sr через 50 лет после начала работы предприятия показана на рисунке 1.

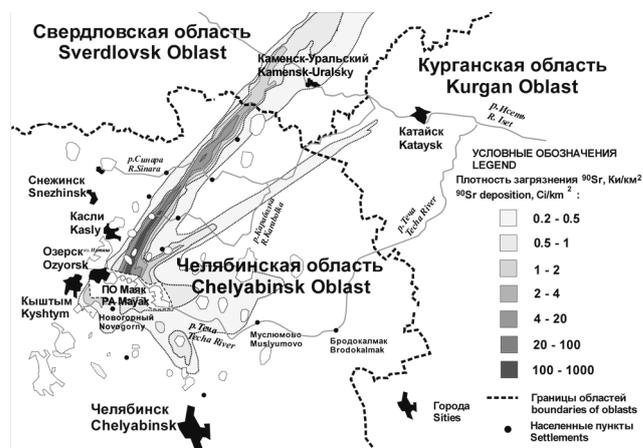


Рис. 1. Карта-схема загрязнения территорий Урала стронцием-90 по состоянию на 1997 г. (1 Ки/км² = 37 КБк/м²)
[Fig. 1. Schematic map of ^{90}Sr contamination of territories of the Urals region as of 1997 (1 Ci/km² = 37 kBq/m²)]

Анализ архивных материалов о технологии хранения и переработки ЖРО на ПО «Маяк» в 1949–1956 гг., которые стали доступны после 2000 г., позволил детально восстановить динамику сбросов радионуклидов в реку Течу, которая была основным источником питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения для жителей прибрежных населенных пунктов (НП) [8, 9]. Сбросы нетехнологических низкоактивных отходов ПО «Маяк» в реку Течу начались в январе 1949 г. (рис. 2). Летом 1950 г. в верховьях реки было проведено обследование воды и донных отложений, которое не выявило заметного радиоактивного загрязнения. Осенью 1950 г. начались регуляр-

ные сбросы технологических отходов низкой и средней активности. В дополнение к этому в 1951 г. случались аварийные утечки высокоактивных отходов из резервуаров-хранилищ. Максимальные уровни аварийных сбросов наблюдались в сентябре – октябре 1951 г. (см. рис. 2). С 28 октября 1951 г. все технологические сбросы были переключены на бессточное озеро Карачай, что привело к значительному уменьшению поступления радионуклидов в реку. В 1956 г. верховья Течи были перекрыты глухой плотиной, а для снабжения нижележащих участков реки чистой водой были построены обводные каналы. Таким образом, было остановлено дальнейшее загрязнение воды и поймы реки в местах проживания людей.

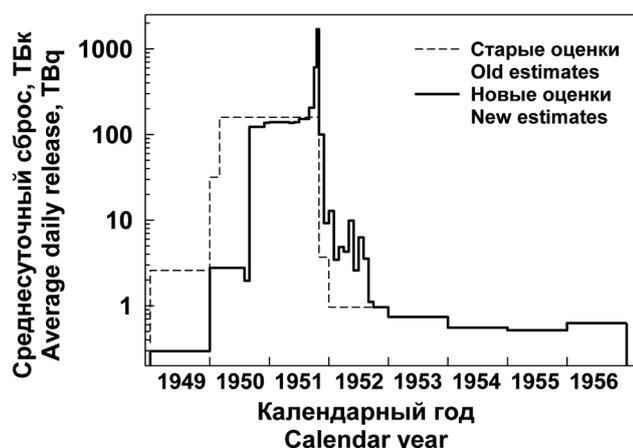


Рис. 2. Сбросы радиоактивных отходов ПО «Маяк» в реку Течу в 1949–1956 гг. Современные оценки из работ [8, 9] показаны в сравнении с оценками из более ранних исследований [10]
Fig. 2. Discharges of radioactive waste from the Mayak PA into the Techa River in 1949–1956. Current-day estimates from [8, 9] are shown in comparison with estimates from previous studies [10]

Регулярные измерения мощности дозы в воздухе в пойме и в населенных пунктах, а также радиоактивного загрязнения воды, донных отложений и пойменных почв на всём протяжении реки Течи (240 км) проводились с лета 1951 г. [3, 11]. Концентрации радионуклидов снижались с расстоянием от места сбросов. Основными путями облучения населения прибрежных НП были: поступление радионуклидов (главным образом, ^{89}Sr , ^{90}Sr и ^{137}Cs) в организм с речной водой и молоком, а также внешнее облучение от поймы реки, загрязнённой в 1951 г. в результате мощного весеннего паводка.

Как отмечалось выше, ВУРС образовался 29 сентября 1957 г. в результате выпадений из радиоактивного облака, которое сформировалось в результате взрыва ёмкости с жидкими высокоактивными отходами [12]. Радиоактивный след имел четкую ось и монотонный спад загрязнённости с расстояния от эпицентра взрыва (см. рис. 1). Были загрязнены обширные территории, населённые в основном сельскими жителями. Радиационно-гигиенический мониторинг на территории ВУРСа, который включал измерения мощности дозы в воздухе в населенных пунктах и вокруг них, а также многочисленные анализы радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных продуктов, проводился с первых дней после аварии. Основными путями облучения населения были:

поступление радионуклидов (главным образом, ^{144}Ce и ^{90}Sr) с продуктами питания (в основном, хлебом и молоком), а также внешнее облучение от загрязнённой почвы.

Реконструкция индивидуальных доз облучения населения загрязнённых территорий

Для дозиметрической поддержки эпидемиологических исследований была разработана специальная система реконструкции индивидуальных доз TRDS (Techa River Dosimetry System) [7, 13, 14]. В системные модули TRDS включена информация о мощностях доз в воздухе и динамике поступления радионуклидов для НП, расположенных на берегах реки Течи и территориях ВУРСа с начальной плотностью загрязнения $^{90}\text{Sr} \geq 0,1 \text{ Ки/км}^2$ ($3,7 \text{ кБк/м}^2$). Системные модули были получены на основе анализа большого объема первичных данных по радиоактивному загрязнению окружающей среды, продуктов питания и организма человека.

Измерения радиоактивного загрязнения воды, донных отложений и пойменных почв реки Течи были использованы для разработки специальной модели переноса радионуклидов в речной системе, которая позволила рассчитать концентрации радионуклидов в воде и пойменных почвах с начала сбросов в 1949 г. [9, 11]. Для расчёта мощности дозы в воздухе над загрязнённой радионуклидами почвой в пойме реки Течи использовался метод имитационного моделирования воздушной кермы [15]. Результаты расчётов мощности дозы в воздухе над береговой полосой хорошо согласуются с данными прямых измерений 1952–1956 гг. [16]. Расчетные оценки интегральной кермы были подтверждены результатами люминесцентных измерений накопленных доз в кирпичах старых зданий, расположенных на берегах реки Течи [17].

Дозовые коэффициенты, рассчитанные с использованием вычислительных фантомов, имитирующих тело человека разного пола и возраста, позволяют конвертировать воздушную керму в значения дозы на органы [18]. Также в расчётах доз внешнего облучения используются режимы поведения людей в загрязнённой пойме реки, которые зависят от возраста. Расчётные значения индивидуальных доз внешнего облучения на реке Тече были подтверждены результатами измерений поглощенной дозы в эмали зубов методом электронного парамагнитного резонанса и оценками частоты транслокаций в лимфоцитах периферической крови методом флуоресцентной *in situ* гибридизации [16, 19].

Для расчёта мощности дозы внешнего облучения на территории ВУРСа использовали те же методы, что и на реке Тече. Плотности радиоактивного загрязнения территории были взяты в соответствии с данными Атласа ВУРС [20].

Основой реконструкции доз внутреннего облучения являлся регистр измерений ^{90}Sr в организме, который включает около 10 000 посмертных измерений образцов костной ткани; данные прижизненных измерений ^{90}Sr в зубах, а также содержание ^{90}Sr во всем теле, измеренное на уникальном спектрометре излучений человека СИЧ-9.1 у 20 000 человек [21–23]. По измерениям ^{90}Sr в зубах жителей сел реки Течи была восстановлена динамика поступления радионуклида в организм в 1949–1956 гг. [24, 25]. Результаты измерений ^{90}Sr в костях и во всем теле у жителей ВУРСа позволили уточнить уровни поступления этого

радионуклида в организм [26]. Уникальные данные СИЧ-9.1 были использованы для разработки биокинетической модели, связывающей поступление стронция и его содержание в организме, с учётом изменений минерального обмена у мужчин и женщин в возрасте от рождения до 80 лет [27]. Поступление ^{137}Cs и других радионуклидов на реке Тече и на ВУРСе было оценено по данным о радиоактивном загрязнении воды, молока и других продуктов питания [26, 28]. Для расчёта доз внутреннего облучения использовались дозовые коэффициенты на единицу поступления из Публикации 67 МКРЗ [29].

Входными данными для расчёта индивидуальной дозы для каждого человека являются: год рождения, пол, история проживания на загрязнённых территориях и конечная точка накопления дозы (дата заболевания, смерти, миграции с наблюдаемой территории и т.п.). Комбинируя средние по НП данные для каждого календарного периода с историей проживания и возрастом конкретного

человека, TRDS продуцирует индивидуальный сценарий внешнего облучения и индивидуальные поступления радионуклидов, а затем рассчитывает соответствующие им дозы внешнего и внутреннего облучения. Необходимо отметить, что интенсивная миграция населения привела к тому, что многие люди облучались как на реке Тече, так и на ВУРСе.

В таблице 1 показаны основные этапы развития TRDS. В первой версии системы, TRDS-2000 [13, 14], рассчитывались дозы только от загрязнения реки Течи и были использованы имеющиеся на то время приблизительные оценки сбросов [9]. В 2006 г. стали доступны для анализа более детальные данные о сбросах [8, 9, 30], которые стали основой последующих версий системы: TRDS-2009 и TRDS-2016. Помимо этого, были включены дополнительные источники облучения: ВУРС и газо-аэрозольные выбросы ПО «Маяк» (см. табл. 1). Необходимо отметить, что дозы от ^{131}I на щитовидную железу рассчитываются с

Сравнительные характеристики дозиметрических систем TRDS, разработанных в разные годы

Таблица 1

[Table 1

Comparative characteristics of the dosimetry systems TRDS developed in different years]

Основные характеристики системы расчёта доз [Major characteristics of the dose calculation system]	TRDS-2000	TRDS-2009	TRDS-2016
Информация о сбросах ЖРО в реку Течу [Information about LRW releases into the Techa River]	Приблизительные оценки сбросов, усреднённые по годам [Averaged annual approximate assessment of the releases]	Детальные оценки динамики сбросов [Detailed assessment of the release dynamics]	Уточнённые детальные оценки динамики сбросов [Improved detailed assessments of the release dynamics]
Дополнительные источники облучения населения Урала (кроме реки Течи) [Additional sources of population exposure in the Urals (besides the Techa River)]	Нет [No]	ВУРС [EURT]	ВУРС Рутинные газо-аэрозольные выбросы [EURT Operational gas-aerosol emissions]
Список радионуклидов, учтённых в расчётах доз [List of radionuclides considered in dose calculations]	^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru	^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru	^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I
Количество органов/тканей, на которые рассчитываются дозы [Number of organs/tissues the doses were calculated to]	9	23	23
Период поступления радионуклидов/ внешнего облучения [Time interval of radionuclide intake/external exposure]	1950–1960	1950–1980	1950–2009
Параметры индивидуализации доз внешнего и внутреннего облучения [Parameters of external and internal dose individualization]	История проживания на реке Тече, возраст, конечная точка накопления дозы [Residence history in the Techa River basin, end point of dose accumulation]	История проживания на реке Тече и ВУРСе, возраст, пол, конечная точка накопления дозы, измерения содержания ^{90}Sr в организме [Residence history in the Techa River basin and in the EURT territory, age, gender, end point of dose accumulation, measurements of ^{90}Sr body-burden]	История проживания на реке Тече и ВУРСе, возраст, пол, конечная точка накопления дозы, измерения содержания ^{90}Sr в организме, локализация индивидуального хозяйства [Residence history in the Techa River basin and in the EURT territory, age, gender, end point of dose accumulation, measurements of ^{90}Sr body-burden, location of the individual household]

Основные характеристики системы расчета доз [Major characteristics of the dose calculation system]	TRDS-2000	TRDS-2009	TRDS-2016
Результаты расчётов: Медиана / среднее / максимум индивидуальных доз в КРТ, мГр ККМ Желудок [Calculation results: Median/mean/ maximum individual dose in TRC, mGy RBM Stomach]	210 / 296 / 2000 6 / 28 / 450	240/420/ 9000 10 / 35 / 960	203 / 346 / 7920 20 / 59 / 1130
Оценка неопределённостей индивидуальных доз: Средний коэффициент вариации (минимум – максимум), % ККМ Желудок [Estimation of individual dose uncertainties: Mean variation coefficient (minimum – maximum), % Bone marrow Stomach]	Нет [No]	Нет [No]	140 (64–330) 98 (55–410)

помощью отдельного комплекса программ на основании данных по газо-аэрозольным выбросам, предоставленных ПО «Маяк» [31].

Важной характеристикой качества системы являются параметры индивидуализации доз. Если у человека в дополнение к его истории проживания имеются измерения ^{90}Sr в организме, то в TRDS-2009 и TRDS-2016 они используются для уточнения дозы внутреннего облучения (см. табл. 1). А если у человека имеются данные по расположению индивидуального хозяйства, где он проживал в начальный период загрязнения реки Течи, то эти данные также используются в TRDS-2016 для уточнения дозы внешнего излучения (см. табл. 1).

В настоящее время дозиметрическая система представляет собой комплекс из нескольких компьютерных программ: TRDS-2016D, которая рассчитывает точечные оценки индивидуальных доз [7], и TRDS-2016MC, которая рассчитывает вероятностные распределения, характеризующие неопределенности оценок индивидуальных доз [32]. В таблице 1 показаны основные характеристики оценок индивидуальных доз для членов КРТ [33]. Также приведены данные для ККМ, для которого наибольший вклад в дозу вносил ^{90}Sr , и для стенок желудка, для которых основным было внешнее облучение и поступление ^{137}Cs .

Как видно из таблицы 1, для ККМ значения медианы находятся на уровне 200–240 мГр, а оценки средней дозы – на уровне 300–400 мГр, то есть достаточно стабильны. Однако учёт на индивидуальном уровне измерений ^{90}Sr в организме привёл к значительному уширению диапазона доз в когорте и увеличению максимальных значений до 8–9 Гр. Что касается желудка, то здесь наблюдается заметная тенденция к увеличению оценок доз: например, среднее значение возрастает с 28 мГр (TRDS-2000) до

59 мГр (TRDS-2016). Это связано с уточнением сбросов, удлинением периода поступления долгоживущих радионуклидов и внешнего облучения (см. табл. 1), а также уточнением мощностей доз внешнего облучения и уровня поступления ^{137}Cs с молоком.

Неопределённости оценок индивидуальных доз, которые имеются только для TRDS-2016, характеризуются средним по когорте коэффициентом вариации, равным 140% для ККМ и 98% для желудка. При этом нужно отметить, что неопределённости тоже оценивались на индивидуальном уровне для всех членов когорты, и для отдельных людей (при наличии дополнительных уточняющих дозу данных) индивидуальные коэффициенты вариации понижаются до уровней 55–64% (см. табл. 1). В целом, можно сказать, что оценки неопределенностей в TRDS-2016 сопоставимы с аналогичными оценками, которые были получены с использованием дозиметрических систем, основанных на реконструкции радиоактивного загрязнения окружающей среды в других радиационных ситуациях [34].

Радиационный риск канцерогенных эффектов у населения прибрежных сел реки Течи и ВУРСА

Исследуемые когорты

Для оценки отдаленных эффектов облучения населения на качественном уровне, кроме информации об индивидуальных дозах, были необходимы регистр облученных лиц, данные наблюдений за их жизненным статусом, информация о заболеваемости и причинах смерти.

Река Теча, в которую осуществлялись сбросы ЖРО ПО «Маяк», протекает по территории 5 районов Челябинской области, включавшей 26 прибрежных населенных пунктов, и 2 районов Курганской области с 15 прибрежными

селами. В конце 1950-х гг. одновременно с первыми медицинскими осмотрами жителей была начата регистрация населения прибрежных сел. В 1967 г. была зафиксирована Оригинальная когорта реки Течи, включавшая жителей прибрежных сел Течи, родившихся до 01.01.1950 г. и проживавших на реке в период с 1950 по 1952 г. Позже в когорту были добавлены лица, проживавшие в прибрежных селах с 1953 по 1960 г. Лица, приехавшие в прибрежные села после 1960 г., в когорту не включались в связи со значительным улучшением радиационной обстановки к тому времени и значительно более низкими дозами облучения. Общая численность КРТ составила около 30 000 человек [1, 3].

Когорта ВУРСа была сформирована в конце 1980-х гг. и включала около 24 000 человек, родившихся до аварии и проживавших во время аварии на территории 22 населенных пунктов, население которых было переселено на более чистые территории, и 15 населенных пунктов, наиболее близко прилегающих к эпицентру взрыва, но с плотностями загрязнения, не превышавшими 2 Ки/км² по ⁹⁰Sr [11]. Основные характеристики когорты представлены в таблице 2 [35–39].

Территория и период наблюдения, источники информации

В связи с процессами миграции населения территория наблюдения (ТН) за облученными жителями, их заболеваемостью и смертностью была шире территории мест первоначального проживания в прибрежных селах. Она также определялась возможностями сбора информации о местах проживания, онкологической заболеваемости и причинах смерти. Основными источниками информации о местах проживания вплоть до 2008 г. являлись запросы в адресные бюро (с 2006 г. отделы адресно-справочной работы УФМС России) по Челябинской и Курганской

областям. Для причин смерти основным источником являлись медицинские свидетельства о смерти или их копии, которые были доступны для резидентов всех НП Челябинской и Курганской областей [1, 3]. Обе области были определены как территория наблюдения за причинами смерти (ТНС).

Основным источником информации о случаях ЗНО являлось «Извещение о больном с впервые в жизни установленным диагнозом рака или другого злокачественного новообразования» (ф.090/у). Регулярный доступ к этой информации был возможен только для 5 районов Челябинской области (Каслинский, Кунашакский, Красноармейский, Аргаяшский и Сосновский), по которым протекала Теча и которые включали территорию ВУРСа, а также для мест наиболее частой миграции облученного населения (г. Челябинск и г. Озерск). Данная территория была определена как территория наблюдения за заболеваемостью ЗНО [1, 3].

Период наблюдения для анализа смертности и заболеваемости также отличался в связи с доступностью для анализа информации. Если причины смерти в России регистрировались в отделах ЗАГС, начиная с декабря 1917 г. (после официального отстранения Русской православной церкви от выполнения этой функции), то официальная регистрация онкологических заболеваний на государственном уровне фактически началась во второй половине 1950-х гг. В связи с этим период наблюдения за смертностью начинается с первых дней наблюдения, связанных с началом облучения, т.е. с 01.01.1950 г., а за заболеваемостью ЗНО – с 01.01.1956 г. Указанные различия периодов наблюдения объясняют разную численность когорты при анализе смертности и заболеваемости ЗНО.

Основными источниками информации для создания регистра облученного населения являлись: похозяй-

Таблица 2

Сравнительные характеристики Уральских когорт

[Table 2]

Comparative characteristics of the Urals cohorts

Параметр [Parameter]	КРТ [TRC]	КВУРС [EURTC]
Начало наблюдения [Start of follow-up]	01.01.1950	29.09.1957
Численность [Size]	29 730	21 427
Возраст на начало облучения [age at the onset of exposure] < 20 лет, [years old], %	Все возрасты [all ages] 43	Все возрасты [all ages] 42
Женщины [Women], %	58	56
Тюрки [Tyurkits], %	20	40
Доза средняя (максимальная), мГр [Mean dose (maximum), mGy]		
на костный мозг [to bone marrow]	346 (7 920) [33]	90 (7 180) [38]
на стенки желудка [to stomach wall],	59 (1 130) [33]	36 (1 130) [39] 11 (121)*

* – исключая 2055 человек, дополнительно облученных на реке Тече [* – excluding 2,055 persons additionally exposed on the Techa River].

ственные книги, результаты переписи и медицинского наблюдения населения сотрудниками УНПЦ РМ [1, 3].

В связи с длительным периодом наблюдения было принято решение кодировать причины смерти и случаи ЗНО согласно правилам МКБ-9 (1977 г.).

Как уже отмечалось, в течение многолетнего наблюдения имела место миграция облученного населения. Члены когорт, выехавшие с территории наблюдения на постоянное проживание в другие регионы, попадали в группу мигрантов, начиная с даты выезда. Часть людей (чаще молодого возраста) могла быть потеряна на ТН, если официально не меняла свою регистрацию в связи с переездом на учебу, новые места работы, по новому адресу проживания в связи с созданием семьи. Информация о жизненном статусе членов КРТ и КВУРС по опубликованным данным на конец 2007 г. и 2006 г. соответственно [40] представлена в таблице 3.

Поскольку наблюдение членов КРТ началось почти на 8 лет раньше, чем членов КВУРС, то к концу периода наблюдения доля умерших на ТНС в КРТ была в 1,5 раза выше, тогда как доля потерянных из наблюдения на ТНС в КВУРС была больше, чем в КРТ в 2,7 раза. По-видимому, большая часть потерянных из наблюдения облученных людей покинула радиоактивно-загрязненные территории в первые годы после аварий без регистрации отъезда. Большие потери в КВУРС были связаны с более поздним формированием когорты (через 30 лет после аварии). Данные потери уменьшают статистическую силу анализа, но не должны привести к значимым смещениям радиационного риска, так как эти процессы не были связаны с дозой облучения. Кроме того, цензурирование данных с использованием точной даты выбытия из наблюдения (исключение из анализа как случаев, так и человеко-лет после этой даты) минимизирует возможное смещение оценок риска. Доля мигрантов, выехавших за пределы двух областей к концу наблюдения, была одинаковой и составила около 16%.

Радиационный риск канцерогенных эффектов

Исследования радиационных последствий у членов КРТ в первые 30 лет после облучения показали тенденцию к увеличению показателей смертности и заболеваемости как от лейкозов, так и в целом от ЗНО с увеличением дозы [41].

Создание дозиметрической системы TRDS позволило рассчитать органные индивидуальные дозы для членов когорт и величины избыточного относительного риска (ИОР) смертности и заболеваемости от ЗНО. Исследования показали достоверное увеличение ИОР смертности от лейкозов и солидных ЗНО [42], а также заболеваемости солидными ЗНО и лейкозами у членов КРТ на единицу дозы [35, 36].

Последние оценки величин ИОР солидных ЗНО в обеих когортах представлены в таблице 4. Зависимость смертности [40, 42] и заболеваемости [36, 38] солидными ЗНО от дозы облучения в обеих когортах хорошо описывается линейной моделью, а величины ИОР сопоставимы для смертности и заболеваемости в когортах. ИОР смертности от солидных раков имел близкие значения в КРТ и всей КВУРС. Атрибутивный риск смертности от солидных раков в исследованных когортах составлял от 1,6 до 2,4%, а для заболеваемости – от 1,7 до 3,6%.

Важно отметить, что КВУРС включает 2055 членов КРТ, которые до аварии 1957 г. проживали в верховьях реки Течи и были переселены на территории, впоследствии ставшие частью ВУРС. Для исключения влияния доз облучения, полученных на реке Тече, у членов КВУРС был оценен ИОР солидных ЗНО в субкогорте КВУРС при исключении из нее лиц, ранее проживавших в прибрежных селах реки. Как видно из таблицы 4, у членов этой субкогорты не отмечалось статистически значимого повышения ИОР заболеваемости и смертности от солидных ЗНО.

Анализ радиационного риска заболеваемости всеми формами лейкозов, а также лейкозами при исключении хронического лимфолейкоза (ХЛЛ) в КРТ показал статистически значимо высокий ИОР (табл. 5). В КВУРС не

Жизненный статус членов когорты

Vital status of the cohort members]

Жизненный статус на 31.12.2018 г. [Vital status as of December 31, 2018]	КРТ на 31.12.2007 г. [TRC as of 31.12.2007]		КВУРС на 31.12.2006 г. [EURTC as of 31.12.2006]	
	n	%	n	%
Жив [Alive]	5 684	19	5 731	27
Умер, включая [Deceased, including]	17 307	58	8 016	37
Причина смерти известна [Known cause of death]	15 763	91	7 164	89
Потерянные из наблюдения [Lost to follow-up]	2 043	7	4 169	19
Всего на ТНС* к концу наблюдения [Total in the MCA* as of the end of the follow-up]	25 034	84	17 916	84
Мигранты [Migrants]	4 696	16	3 511	16
Всего [Total]	29 730	100	21 427	100

*ТНС – территория наблюдения за смертностью [Note: *MCA – mortality catchment area].

Таблица 3

[Table 3

Величины ИОР развития солидных ЗНО в КРТ и КВУРСа

Таблица 4

[Table 4]

ERR values of solid cancers in TRC and EURTC]

Параметры [Parameters]	КРТ [TRC]	КВУРС [EURTC]	
		вся когорта [Total]	исключая облученных на реке [excluding exposed on the river]
Смертность от солидных ЗНО [Solid cancer mortality]			
Период наблюдения [Follow-up period]	1950–2007	1957–2006	1957–2006
Число солидных ЗНО [Number of solid cancers]	2303	1039	866
Избыточные ЗНО [Excess cases], (атрибутивный риск, %) ([attributable risk, %])	50 (2,2)	25 (2,4)	14 (1,6)
ИОР/100 мГр [ERR/100mGy]	0,06	0,06	0,15
95% доверительный интервал [95% confidence interval]	0,004; 0,13	0,001; 0,13	–0,21; 0,63
Заболеваемость солидными ЗНО [Solid cancer incidence]			
Период наблюдения [Follow-up period]	1956–2007	1957–2014	1957–2014
Число солидных ЗНО [Number of solid cancers]	1933	1609	1366
Избыточные ЗНО [Excess cases], (атрибутивный риск [attributable risk], %)	69 (3,6)	37(2,3)	23 (1,7)
ИОР/100 мГр [ERR/100mGy]*	0,08	0,05	0,16
95% доверительный интервал [95% confidence interval]	0,01; 0,15	0,01; 0,10	–0,06; 0,42

* – с коррекцией на курение [36] [* – smoking adjusted [36]] .

Таблица 5

Избыточный относительный риск (линейная модель) заболеваемости лейкозами в КРТ и КВУРСА

[Table 5]

Excess relative risk (linear model) of leukemia incidence in TRC and EURTC]

Параметры [Parameters]	КРТ [35] [TRC]	КВУРС [38] [EURTC]
Период наблюдения [Follow-up period]	1953–2007	1957–2009
Число лейкозов (лейкозов без ХЛЛ) [Number of leukemias (excluding CLL)]		
Все лейкозы [All leukemias]	99	37
Исключая ХЛЛ [Excluding CLL]	72	29
Атрибутивный риск [Attributable risk], %		
Все лейкозы [All leukemias]	30	10
Исключая ХЛЛ [Excluding CLL]	47	11
ИОР/100 мГр (95% доверительный интервал) [ERR/100mGy, (95% confidence interval)]		
Все лейкозы [All leukemias]	0,12 (0,04; 0,24)	0,10 (nf <0; 0,37)
Исключая ХЛЛ [Excluding CLL]	0,22 (0,08; 0,54)	0,12 (nf <0; 0,45)

nf (not found) – граница доверительного интервала не может быть точно вычислена программой [nf (not found) – the limit of the confidence interval could not be calculated by the program].

выявлено статистически значимого повышения ИОР заболеваемости всеми лейкозами и лейкозами при исключении ХЛЛ [35, 38].

Перспективы исследования Уральской когорты аварийно-облученного населения (УКАОН)

В ходе проспективного наблюдения за состоянием здоровья членов КРТ и КВУРС разработана и использо-

вана единая методология многолетнего прослеживания когорт и анализа медико-дозиметрических данных. Была определена ТН, источники информации о случаях заболеваний и причинах смерти, выработаны единые методы и технологии наблюдения за здоровьем облученного населения, жизненным статусом, процессами миграции и др. Для расчета индивидуальных органных доз в обеих когортах была разработана единая дозиметрическая си-

стема TRDS-2016 и сделаны оценки неопределенностей органных доз.

Единые методы наблюдения и источники информации, общая территория проживания (Уральский регион), сходные социально-экономические условия жизни, одинаковый поло-возрастной и этнический состав облученного населения, близкие годы возникновения аварий и единая дозиметрическая система позволили создать в настоящее время Уральскую когорту аварийно-облученного населения (УКАОН). Она объединяет лиц, подвергшихся хроническому облучению в обеих радиационных авариях в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г. УКАОН также включает внутриутробно облученных людей и потомков облученных, если они облучились в указанный период постнатально.

УКАОН, которая в англоязычных публикациях получила название «South Urals Population Exposed to Radiation» (SUPER), была сформирована в 2018 г., и ее потенциальная численность в соответствии с вышеприведенными критериями составила около 63 000 человек [43]. Состав когорты представлен на рисунке 3.

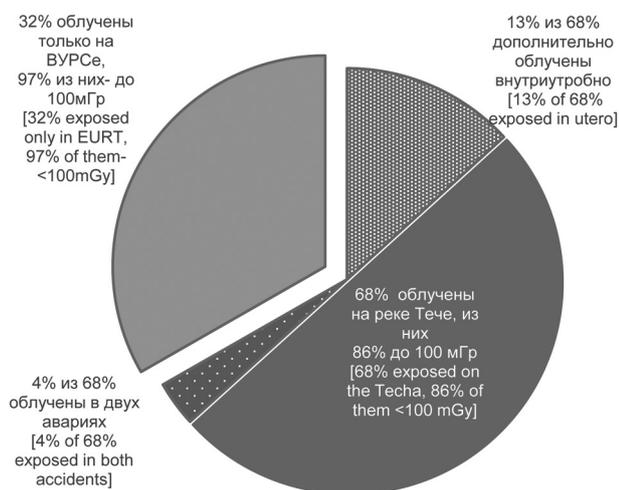


Рис. 3. Структура Уральской когорты аварийно-облученного населения (УКАОН)
[Fig. 3. Structure of the South Urals Population Exposed to Radiation (SUPER) cohort]

Объединение аварийно-облученного населения Уральского региона в единую когорту позволило увеличить численность когорты более чем в 2 раза по сравнению с КРТ и КВУРС и привело к увеличению статистической силы исследования. Число человеко-лет под наблюдением в когорте УКАОН к 2017 г. составило 1 283 267, число случаев смерти – около 30 000, а число случаев заболеваний солидными раками – более 4500. Дальнейшее увеличение периода наблюдения также позволит повысить статистическую силу исследования новой когорты.

Первые исследования УКАОН подтвердили статистически значимый риск заболеваемости солидными ЗНО. Всего за период с 1956 по 2017 г. в аналитической когорте было зарегистрировано 4537 случаев солидных ЗНО, из них 167 случаев (3,7%) могли быть связаны с облучением. Величина ИОР/100 мГр, согласно линейной модели, составила 0,075 (95% ДИ: 0,04–0,11), $p < 0,001$ [43].

Снижение неопределенностей радиационного риска в УКАОН будет достигнуто и за счет совершенствования дозиметрической системы, и за счет снижения неопределенностей оценки доз облучения. Перспективы развития дозиметрической системы для оценки доз в когорте УКАОН связаны с включением в систему модуля для расчета доз внутриутробного облучения; использованием современной дозиметрической модели скелета для уточнения доз от $^{89,90}\text{Sr}$; расширением и обновлением системных модулей; усовершенствованием программ расчета вероятностных распределений, характеризующих неопределенности оценок индивидуальных доз.

В свою очередь, повышение статистической силы исследования УКАОН позволит:

- сделать прямые оценки ИОР на единицу дозы для заболеваемости и смертности от отдельных нозологий онкологических заболеваний и нераковых заболеваний (таких как болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера и др.), а также для отдельных поло-возрастных групп населения (например, облученных в детском возрасте или внутриутробно);
- оценить пожизненный риск канцерогенных и нераковых эффектов;
- оценить модифицирующее влияние нерадиационных факторов на индукцию стохастических эффектов радиации;
- оценить значение фактора мощности дозы у человека для различных стохастических эффектов радиации.

Заключение

В статье представлены основные итоги радио-эпидемиологических исследований канцерогенных последствий хронического облучения в КРТ и КВУРС, проведенных в УНПЦ РМ в период с 1955 по 2021 г. В результате 65-летних исследований в обеих когортах:

- прослежено состояние здоровья, жизненный статус и места проживания облученных людей с использованием унифицированных подходов и источников информации;
- ретроспективно восстановлены индивидуальные значения годовых поглощенных доз (с начала облучения до даты выхода из-под наблюдения) в 23 органах от внешнего и внутреннего излучений;
- на основании вариабельности исходных данных оценена неопределенность индивидуальных доз;
- оценен радиационный риск онкологических заболеваний (солидных раков и лейкозов) у населения, подвергшегося многолетнему низкоинтенсивному облучению в широком диапазоне доз, представленного людьми разного возраста, пола и с различным исходным состоянием здоровья.

Результаты исследований на реке Тече показали, что хроническое радиационное воздействие на человека не снижает риск злокачественных опухолей и лейкозов по сравнению с острым облучением, как это принято Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) в настоящее время [44]. Сравнивая значения радиационного риска лейкозов в КРТ (исключая ХЛЛ) и в когорте LSS [45], можно отметить статистически значимо повышенные, но очень близкие значения ИОР на единицу дозы. Полученные данные свидетельствуют о том, что радиационный риск лейкозов вследствие облучения в широком диапазоне доз с высокой и низкой мощностью

дозы является сопоставимым. Из этого можно сделать вывод, что протрагирование облучения человека не оказывает влияния на радиационный риск лейкозов, а фактор мощности дозы равен единице.

Фактор дозы и мощности дозы для индукции радиацией солидных ЗНО также близок к единице. ИОР солидных раков, по данным онкологической заболеваемости и смертности в КРТ, в которой преобладали малые дозы хронического облучения, был сопоставим с таковым у людей, переживших атомные бомбардировки и подвергшихся острому облучению преимущественно в больших дозах [46–48]. Сопоставимые оценки радиационного риска лейкозов и солидных раков были отмечены в когортах LSS и INWORKS [49].

Таким образом, из наших данных следует, что современные рекомендации МКРЗ занижают радиационный риск солидных раков и лейкозов при хроническом облучении населения в 2 раза. В этой связи необходимо отметить, что Всемирная организация здравоохранения в отчете, посвященном прогнозу канцерогенных последствий аварии на АЭС «Фукусима-1», использовала оценки канцерогенных рисков, полученных в КРТ [50]. Оценивая качество радио-эпидемиологических исследований, НКДАР ООН в 2018 г. на основе организации нескольких наблюдений за облученными людьми, включая вышеприведенные Уральские исследования, разработал критерии качества исследований в радиационной эпидемиологии [51].

Вместе с тем, важно отметить, что даже 65-летнее прослеживание КРТ и КВУРС не позволило получить ответов на ряд вопросов. Ограниченность этих когорт, обусловленная, прежде всего, их численностью, не позволила оценить радиационный риск злокачественных опухолей отдельных локализаций и различных типов лейкозов, а также отдельных форм сердечно-сосудистых заболеваний и более редких нейродегенеративных заболеваний.

Для решения вышеуказанных проблем в настоящее время в УНПЦ РМ сформирована УКАОН, которая включает всех аварийно-облученных жителей Уральского региона (около 63 000 человек). Увеличение доли членов когорты с малыми дозами позволит уточнить значения ИОР солидных раков и нераковых эффектов при облучении человека малыми дозами и с низкой мощностью дозы.

В рамках исследования УКАОН планируется продолжить работу, направленную на снижение неопределенностей индивидуализированных доз облучения членов новой когорты. Оценка неопределенностей доз позволит оценить неопределенности в оценках радиационного риска отдаленных последствий хронического облучения человека.

Благодарности

Исследования выполнены при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России и в рамках Межправительственного соглашения между РФ и США «О сотрудничестве в области изучения радиационных воздействий с целью минимизации последствий радиоактивного загрязнения на здоровье человека и окружающую среду».

Авторы признательны сотрудникам отдела «База данных» УНПЦ РМ (заведующий Н.В. Старцев) за прослеживание жизненного статуса членов когорт, биофизической

лаборатории УНПЦ РМ за оценку индивидуализированных доз облучения и эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ, участвовавшей в сборе и подготовке данных для анализа.

Литература

1. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / под ред. А.В. Аikleeva, М.Ф. Киселева. М.: Медбиоэкстрем, 2001. 531 с.
2. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк» / под ред. А.В. Аikleeva, М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ», 2001. 294 с.
3. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи / под ред. А.В. Аikleeva. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
4. Akleyev A.V., Degteva M.O. Radioecological consequences of radioactive releases due to weapons-grade plutonium production at the «Mayak» facility in the Russian Federation // *Journal of Radiological Protection*. 2021. Vol. 41, No 2. P. 67–78. DOI:10.1088/1361-6498/abdfbb.
5. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations. 2011. 82 p.
6. Akleyev A.V. Specific features of medical care provision to the population of the Techa riverside settlements // *Journal of Radiological Protection*. 2021. DOI:10.1088/1361-6498/ac0c02; 2021.
7. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I., et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // *Health Physics*. 2019. Vol. 117, No 4. P. 378–387.
8. Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M.I. et al. Re-evaluation of waterborne releases of radioactive materials from the «Mayak» Production Association into the Techa River in 1949–1951 // *Health Physics*. 2012. Vol. 102. P. 25–38.
9. Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 годах // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016. Т. 56, № 5. С. 1–12.
10. Vorobiova M.I., Degteva M.O., Burmistrov D.S., et al. Review of historical monitoring data on Techa River contamination // *Health Physics*. 1999. Vol. 76. P. 605–618.
11. Shagina N.B., Vorobiova M.I., Degteva M.O., et al. Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949–1951 as a result of releases from the «MAYAK» Production Association // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2012. Vol. 51. P. 349–366.
12. Akleyev A.V., Krestinina L.Yu., Degteva M.O., Tolstykh E.I. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 // *Journal of Radiological Protection*. 2017. Vol. 37, No 3. P. 19–42. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
13. Degteva M.O., Kozheurov V.P., Tolstykh E.I., et al. The Techa River Dosimetry System: Methods for the reconstruction of internal dose // *Health Physics*. 2000. Vol. 79. P. 24–35.
14. Degteva M.O., Vorobiova M.I., Tolstykh E.I., et al. Development of an improved dose reconstruction system for the Techa River population affected by the operation of the Mayak Production Association // *Radiation Research*. 2006. Vol. 166. P. 255–270.
15. Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б.А. Оценка мощностей доз в воздухе при неравномерном вертикальном распределении -излучающих радионуклидов в различных типах почв // *Вопросы радиационной безопасности*. 2016. № 3. С. 43–52.
16. Дегтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., и др. Использование методов ЭПР и FISH для реконструкции доз у людей, облучившихся на реке Теча // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2017. Т. 57, № 1. С. 30–41.

17. Hiller M.M., Woda C., Bougrov N.G., et al. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56, No 2. P. 139-159. DOI: 10.1007/s00411-017-0688-3.
18. Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б.А. Дозовые коэффициенты для конвертации воздушной кермы в значения мощности дозы в органах людей разного возраста при внешнем облучении от ^{137}Cs в почве // *Вопросы радиационной безопасности*. 2018. Т. 89, № 1. С. 36-47.
19. Shishkina E.A., Volchkova A.Yu., Timofeev Y.S., et al. External dose reconstruction in tooth enamel of Techa riverside residents // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2016. Vol. 55, No 4. P. 1-23. DOI 10.1007/s00411-016-0666-1.
20. Израэль Ю.А., Василенко В.Н., Снакин В.В., и др. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года. Москва: ИГКЭ Росгидромета и РАН, 2013. 140 с.
21. Kozheurov V.P. SICH-9. 1-A unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung: The main results from a long-term investigation of the Techa River population // *Science of the Total Environment*. 1994. Vol. 14, No 1-2. P. 37-48.
22. Толстых Е.И., Бугров Н.Г., Кривошапов В.А., и др. Результаты прижизненных измерений стронция-90 в организме жителей Уральского региона: анализ данных за 2006-2012 гг. // *Радиационная гигиена*. 2013. Т. 6, № 1. С. 5-11.
23. Дёгтева М.О., Толстых Е.И., Суслова К.Г., и др. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона // *Радиационная гигиена*. 2018. Т. 11, № 3. С. 30-39.
24. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90 // *Health Physics*. 2011. Vol. 101, No 1. P. 28-47.
25. Толстых Е.И., Дёгтева М.О., Кривошапов В.А., Напье Б.А. Метод оценки индивидуальных значений поступления ^{90}Sr с рационом на основе измерений зубного датчика у жителей прибрежных сёл р. Теча // *Вопросы радиационной безопасности*. 2019. Т. 93, № 4. С. 55-63.
26. Tolstykh E.I., Peremyslova L.M., Degteva M.O., Napier B.A. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957-2011) // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2017. Vol. 56, No 1. P. 27-45. DOI 10.1007/s00411-016-0677-y.
27. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O., et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, No 1. P. 87-127.
28. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ^{137}Cs // *Health Physics*. 2013. Vol. 104, No 5. P. 481-498.
29. ICRP, 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67 // *Ann. ICRP*. 1993. Vol. 23, No 3-4.
30. Anspaugh L.R., Degteva M.O., Vorobiova M.I., et al. Dosimetry for members of the Extended Techa River Cohort // *Health Physics*. 2006. Vol. 91, No 4. P. 393-394.
31. Napier B.A., Eslinger P.W., Tolstykh E.I., et al. Calculations of individual doses for Techa River Cohort members exposed to atmospheric radioiodine from Mayak releases // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 178-179. P. 156-167. DOI 10.1016/j.jenvrad.2017.08.013
32. Напье Б.А., Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Анспо Л.П. Анализ неопределенностей в дозиметрической системе реки Теча // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2013. Т. 58, № 1. С. 5-28.
33. Дёгтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И., и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019. Т. 64, № 3. С. 46-53.
34. Drozdovitch V., Chumak V., Kesminiene A., et al. Doses for post-Chernobyl epidemiological studies: are they reliable? // *Journal of Radiological Protection*. 2016. Vol. 36, No 3. P. 36-73. DOI: 10.1088/0952-4746/36/3/R36.
35. Krestinina L.Yu., Davis F.G., Schonfeld S., et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953-2007 // *British Journal of Cancer*. 2013. Vol. 109. P. 2886-2893. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
36. Davis F.G., Krestinina L.Yu., Preston D., et al. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956-2007 // *Radiation Research*. 2015. Vol. 184, No 1. P. 56-65. DOI: <http://dx.doi.org/10.1667/RR14023.1>.
37. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Епифанова С.Б. Анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на территории Восточно-уральского радиоактивного следа за 50-летний период // *Радиационная гигиена*. 2014. Том 7, № 1. С. 23-29.
38. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Аклев А.В. Риск заболеваемости гемобластозами у членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа // *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2019. Т. 28, № 2. С. 36-50. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-2-36-50.
39. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклев А.В. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа населения за 1957-2014 гг. // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020. Т. 65, № 4. С. 58-64. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64.
40. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Тече и Восточно-Уральском Радиоактивном Следе // *Радиация и риск*. 2017. Т. 26. № 1. С. 100-114. DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114.
41. Косенко М.М., Аклев А.В., Старцев Н.В., и др. Эпидемиологический анализ отдаленных канцерогенных последствий хронического облучения населения Урала // *International Journal of Radiation Medicine*. 1999. Т. 2, № 2. С. 34-41.
42. Schonfeld S.J., Krestinina L.Yu., Epifanova S.B., et al. Solid Cancer Mortality in the Techa River Cohort (1950-2007) // *Radiation Research*. 2013. Vol. 179. P. 183-189. DOI: 10.1667/RR2932.1.
43. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д., и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956-2017 // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 3. С. 6-17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
44. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // *Ann ICRP*. 2007. 331 p.
45. Hsu W.-Li., Preston D.L., Soda M., et al. The Incidence of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma among Atomic Bomb Survivors: 1950-2001 // *Radiation Research*. 2013. Vol. 179, No 3. P. 361-382. DOI: 10.1667/RR2892.1
46. Grant E.J., Brenner A., Sugiyama H., et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009 // *Radiation Research*. 2017. Vol. 187, No 5. P. 513-537. DOI: 10.1667/RR14492.1.
47. Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A., et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950-2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases // *Radiation*

- Research. 2012. Vol. 177. P. 229–243. DOI: 10.1667/RR2629.1.
48. Preston D.L., Sokolnikov M.E., Krestinina L.Yu., Stram D.O. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and Atomic bomb survivor studies // Radiation Protection Dosimetry. 2017. Vol. 173. P. 26–31.
49. Leurad K., Richardson D.B., Cardis E., et al. Risk of cancer associated with low-dose radiation exposure: comparison of results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb survivors study // Radiation and Environmental Biophysics. 2021. Vol. 60. P. 23–39. DOI:10.1007/s00411-020-00890-7. doi:10.1093/rpd/ncw316.
50. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. Geneva: World Health Organization. 2013. 166 p.
51. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations. 2018. 184 p.

Поступила: 13.09.2021 г.

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: akleyev@urcrm.ru

Дегтева Марина Олеговна – кандидат технических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Аклеев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю. Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 31–44. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44

Radioepidemiological studies in the Urals: outcomes and future directions

Alexander V. Akleyev^{1,2}, Marina O. Degteva¹, Lyudmila Yu. Krestinina¹

¹ Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

The paper presents the key milestones and outcomes of 65-year studies of the carcinogenic consequences of accidental radiation exposure of the population of the Urals region. The radioactive contamination of the Techa River and the 1957 accident at the Mayak PA were the reasons for the long-term exposure of the population at a wide range of doses. The most important tasks of the study were the reconstruction of individual doses, follow-up of the health and life status of cohort members. The research results have shown that chronic human exposure, in comparison to acute exposure, does not reduce the risk of developing malignant tumors and leukemias, and the value of the dose-rate factor does not exceed “one”. Thus, according to our data, the current recommendations of the International Commission on Radiological Protection underestimate the radiation risk of malignant tumors and leukemias in case of chronic exposure of the population by a factor of two. Prospects for further radio-epidemiological studies in the Urals are associated with the analysis of the cohort of Southern Urals Populations Exposed to Radiation (SUPER), which includes about 63 thousand exposed people and makes it possible to assess the radiation risk of solid cancers of certain localizations, certain types of leukemia, and non-cancer effects.

Key words: radio-epidemiological studies, Techa River, East Urals Radioactive Trace, malignant tumors, leukemias, dose-rate factor.

Alexander V. Akleyev

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovskogo Str., 68-A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: akleyev@urcrm.ru

References

1. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Eds. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 531 p. (In Russian).
2. Ecological and medical consequences of the 1957 radiation accident at Mayak PA. Eds. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 294 p. (In Russian).
3. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Ed. Akleyev AV. Chelyabinsk: Kniga; 2016. 390 p. (In Russian).
4. Akleyev AV, Degteva MO. Radioecological consequences of radioactive releases due to weapons-grade plutonium production at the 'Mayak' facility in the Russian Federation. *Journal of Radiological Protection*. 2021 Jun;41(2): S67–S78. DOI:10.1088/1361-6498/abdfbb.
5. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations. 2011. 82 p.
6. Akleyev AV. Specific features of medical care provision to the population of the Techa riverside settlements. *Journal of Radiological Protection*. 2021 Jun; DOI:10.1088/1361-6498/ac0c02.
7. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019 Oct;117(4): 378–387.
8. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA. Re-evaluation of waterborne releases of radioactive materials from the "Mayak" Production Association into the Techa River in 1949–1951. *Health Physics*. 2012 Jan; 102(1): 25–38.
9. Degteva MO, Shagina NB, Vorobiova MI, Shishkina EA, Tolstykh EI, Akleyev AV. Current view of the Techa River radioactive contamination in 1949–1956. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(5): 1–12. (In Russian).
10. Vorobiova MI, Degteva MO, Burmistrov DS, Safronova NG, Kozheurov VP, Anspaugh LR, et al. Review of historical monitoring data on Techa River contamination. *Health Physics*. 1999 Jun;76(6): 605–618.
11. Shagina NB, Vorobiova MI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shishkina EA, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of the contamination of the Techa River in 1949–1951 as a result of releases from the "MAYAK" Production Association. *Radiation Environmental Biophysics*. 2012 Nov;51(4): 349–366.
12. Akleyev AV, Krestinina LYU, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957. *Journal of Radiological Protection*. 2017 Sep;37(3): R19–R42. DOI: 10.1088/1361-6498/aa7f8d.
13. Degteva MO, Kozheurov VP, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Anspaugh LR, Napier BA, et al. The Techa River Dosimetry System: Methods for the reconstruction of internal dose. *Health Physics*. 2000 Jul;79(1): 24–35.
14. Degteva MO, Vorobiova MI, Tolstykh EI, Shagina NB, Shishkina EA, Anspaugh LR, et al. Development of an improved dose reconstruction system for the Techa River population affected by the operation of the Mayak Production Association. *Radiation Research*. 2006 Jul;166(1 Pt 2): 255–70.
15. Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO, Napier BA. Evaluation of dose rates in the air at non-uniform vertical distribution of gamma-emitting radionuclides in different types of soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2016;3: 43–52. (In Russian).
16. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Vozilova AV, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. The use of EPR and FISH methods for dose reconstruction in persons exposed on the Techa River. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2017;57(1): 30–41. (In Russian).
17. Hiller MM, Woda C, Bougrov NG, Degteva MO, Ivanov O, Ulanovsky A, et al. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modeling. *Radiation Environmental Biophysics*. 2017 May;56(2): 139–159. DOI: 10.1007/s00411-017-0688-3.
18. Shishkina EA, Volchkova AYU, Degteva MO, Napier BA. Dose coefficients to convert air kerma into organ dose rate values for people of different ages externally exposed to ¹³⁷Cs in soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2018;89(1): 36–47. (In Russian).
19. Shishkina EA, Volchkova AYU, Timofeev YS, Fattibene P, Wieser A, Ivanov DV, et al. External dose reconstruction in tooth enamel of Techa riverside residents. *Radiation Environmental Biophysics*. 2016 Nov;55(4): 477–499. DOI 10.1007/s00411-016-0666-1.
20. Izrael YuA. Atlas of the East-Urals and Karachay Radioactive Traces, including the prognosis up to 2047. Moscow: IGKE of Roshydromet and RAS; 2013. 140 p. (In Russian).
21. Kozheurov VP. SICH-9.1-A unique whole-body counting system for measuring Sr-90 via bremsstrahlung: The main results from a long-term investigation of the Techa River population. *Science of the Total Environment*. 1994 Mar;142(1-2): 37–48.
22. Tolstykh EI, Bugrov NG, Krivoschapov VA, Shishkina EA, Shagina NB, Degteva MO, et al. Results of in vivo measurements of strontium-90 body-burden in Urals residents: analysis of data obtained in 2006–2012. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(1): 5–11. (In Russian).
23. Degteva MO, Tolstykh EI, Suslova KG, Romanov SA, Akleyev AV. Analysis of the results of long-lived radionuclide body-burden monitoring in residents of the Urals region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 30–39. (In Russian).
24. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Physics*. 2011 Jul;101(1): 28–47.
25. Tolstykh EI, Degteva MO, Krivoschapov VA, Napier BA. Method for assessing individual values of ⁹⁰Sr diet intake based on tooth-beta counter measurements in residents of the Techa riverside settlements. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*. 2019;4(96): 55–63. (In Russian).
26. Tolstykh EI, Peremyslova LM, Degteva MO, Napier BA. Reconstruction of radionuclide intakes for the residents of East Urals Radioactive Trace (1957–2011). *Radiation Environmental Biophysics*. 2017 Mar;56(1): 27–45. DOI:10.1007/s00411-016-0677-y.
27. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015 Mar;35(1): 87–127.
28. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Physics*. 2013 May;104(5): 481–98.
29. ICRP, 1993. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. *Ann. ICRP*. 1993;23(3–4).
30. Anspaugh LR, Degteva MO, Vorobiova MI, Mokrov YuG, Napier BA. Dosimetry for members of the Extended Techa River Cohort. *Health Physics*. 2006 Oct;91(4): 393–4.
31. Napier BA, Eslinger PW, Tolstykh EI, Vorobiova MI, Tokareva EE, Akhramenko BN, et al. Calculations of individual doses for Techa River Cohort members exposed to atmospheric radioiodine from Mayak releases. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017 Nov;178–179: 156–167. DOI:10.1016/j.jenvrad.2017.08.013.
32. Napier BA, Degteva MO, Shagina NB, Anspaugh LR. Uncertainty analysis for the Techa River Dosimetry System.

- Meditsinskaya radiologiya I radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2013;58(1): 5-28. (In Russian and in English).
33. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bugrov NG, Krestinina LY, et al. Individual dose distribution in cohort of people exposed as a result of radioactive contamination of the Techa River. *Meditsinskaya radiologiya I radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019;64(3): 46-53. (In Russian).
 34. Drozdovitch V, Chumak V, Kesminiene A, Ostroumova E, Bouville A. Doses for post-Chernobyl epidemiological studies: are they reliable? *Journal of Radiological Protection*. 2016 Sep;36(3): R36-R73. DOI: 10.1088/0952-4746/36/3/R36.
 35. Krestinina LY, Davis FG, Schonfeld S, Preston DL, Degteva M, Epifanova S, et al. Leukaemia incidence in the Techa River Cohort: 1953–2007. *British Journal of Cancer*. 2013 Nov;109(11): 2886–93. DOI: 10.1038/bjc.2013.614.
 36. Davis FG, Krestinina LY, Preston D, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. *Radiation Research*. 2015 Jul;184(1): 56–65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
 37. Krestinina LY, Silkin SS, Epifanova SB. Analysis of solid cancer mortality risk for the population exposed in the territory of the East-Urals Radioactive Trace over a 50-year period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 23-29. (In Russian).
 38. Krestinina LY, Silkin SS, Akleyev AV. Risk of developing hematological malignancies in the cohort of the East Urals Radioactive Trace. *Radiatsiya I Risk (Bulletin Natsionalnogo Radiatsionnogo I Epidemiologicheskogo Registra) = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2019;28(2): 36-50. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-2-36-50. (In Russian).
 39. Silkin SS, Krestinina LY, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk among the population exposed in the East Urals Radioactive Trace over 1957–2014. *Meditsinskaya radiologiya I radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(4): 58-64. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64. (In Russian).
 40. Krestinina LY, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Risk of death from solid cancer among residents of the Techa riverside and East Urals Radioactive Trace areas exposed to radiation: comparative analysis. *Radiatsiya I Risk (Bulletin Natsionalnogo Radiatsionnogo I Epidemiologicheskogo Registra) = Radiation and Risk (Bulletin of the National Radiation and Epidemiological Registry)*. 2017;26(1): 100-114. DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114. (In Russian).
 41. Kossenko MM, Akleyev AV, Startsev NV, et al. Epidemiological analysis of late carcinogenic effects of chronic exposure of the population of the Urals. *International Journal of Radiation Medicine*. 1999;2(2): 34-41. (In Russian).
 42. Schonfeld SJ, Krestinina LY, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV, Preston DL. Solid Cancer Mortality in the Techa River Cohort (1950–2007). *Radiation Research*. 2013 Feb;179(2): 183-9. DOI: 10.1667/RR2932.1.
 43. Krestinina LY, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17. (In Russian).
 44. International Commission for Radiological Protection. ICRP Publication 103. Elsevier; 2007. 331 p.
 45. Hsu W-Li, Preston DL, Soda M, Sugiyama H, Funamoto S, Kodama K, et al. The Incidence of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma among Atomic Bomb Survivors: 1950–2001. *Radiation Research*. 2013 Mar;179(3): 361-382. DOI: 10.1667/RR2892.1.
 46. Grant EJ, Brenner A, Sugiyama H, Sakata R, Sadakane A, Utada M, et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958-2009. *Radiation Research*. 2017 May;187(5): 513-537. DOI: 10.1667/RR14492.1.
 47. Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, et al. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors, Report 14, 1950–2003: An Overview of Cancer and Noncancer Diseases. *Radiation Research*. 2012 Mar;177(3): 229–243. DOI: 10.1667/RR2629.1.
 48. Preston DL, Sokolnikov ME, Krestinina LY, Stram DO. Estimates of radiation effects on cancer risks in the Mayak worker, Techa River and Atomic bomb survivor studies. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017 Apr;173(1-3): 26-31.
 49. Leurad K, Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, Haylock R, et al. Risk of cancer associated with low-dose radiation exposure: comparison of results between the INWORKS nuclear workers study and the A-bomb survivors study. *Radiation Environmental Biophysics*. 2021 Mar;60(1): 23-39. DOI:10.1007/s00411-020-00890-7.
 50. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami. Geneva: World Health Organization; 2013. 166 p.
 51. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations; 2018. 184 p.

Received: September 13, 2021

For correspondence: Alexander V. Akleyev – Doctor of Medical Science, Professor, Honoured Science Worker of the Russian Federation, Director, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: akleyev@urcrm.ru)

Marina O. Degteva – Candidate of Technical Sciences, Head, Biophysics Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, Head, Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Akleyev A.V., Krestinina L.Yu., Degteva M.O. Radioepidemiological studies in the Urals: outcomes and future directions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 4, P. 31-44. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44.

Сравнение ранних прогнозов заболеваемости раком щитовидной железы жителей Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС с данными наблюдений

И.А. Звонова, М.И. Балонов

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

Представлен обзор методов оценки доз в щитовидной железе, прогнозов отдаленных последствий ее облучения и реальной заболеваемости раком щитовидной железы жителей 4 областей Российской Федерации с наиболее значительными радиоактивными выпадениями после аварии на Чернобыльской АЭС. Методика оценки доз в щитовидной железе базируется на результатах мониторинга в мае – июне 1986 г. радиойода в окружающей среде, пищевых продуктах и в организме жителей. Данные дозиметрии щитовидной железы у населения были использованы для обоснования мер медицинской и социальной защиты, а также эпидемиологических исследований. Кроме того, органам власти и здравоохранения были необходимы прогнозы возможной заболеваемости населения для организации адекватного медицинского обслуживания. Большую часть заболеваний раком щитовидной железы прогнозировали среди взрослого населения, что не подтвердилось наблюдениями за 35 лет после аварии. Прогноз заболеваемости раком щитовидной железы детей дошкольного возраста различался в разных работах за счёт применения разных коэффициентов снижения биологической эффективности излучения ^{131}I в щитовидной железе и долгосрочного внешнего и внутреннего облучения всего тела с малой мощностью дозы. Рост заболеваемости раком щитовидной железы среди детей начался через 5 лет после аварии на Чернобыльской АЭС, приведены примеры динамики заболеваемости для детей Брянской области Российской Федерации. Обобщения НКДАР ООН 2018 г. показали, что за 1986–2015 гг. среди детей и подростков моложе 18 лет на день аварии в Белоруссии, Украине и 4 областях Российской Федерации выявлено более 19 тысяч заболеваний раком щитовидной железы, из них доля радиационно-индуцированных заболеваний оценена в 25%. Для 4 областей Российской Федерации это составляет 460 случаев с диапазоном возможных оценок от 130 до 900 случаев. Наибольшая заболеваемость проявилась среди младших детей, облученных в возрасте 0–4 года. У старших детей и подростков доля радиационно-индуцированных заболеваний существенно снизилась по прошествии 30 лет после аварии. В целом, ранние прогнозы радиационно-индуцированной заболеваемости раком щитовидной железы детей в 4 областях Российской Федерации с высокими уровнями радиоактивных выпадений согласуются с данными последующих 30-летних эпидемиологических наблюдений в пределах порядка величины. В отношении рака щитовидной железы у взрослых жителей такое сопоставление затруднено, поскольку радиогенное повышение заболеваемости не выявлено.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, население, щитовидная железа, дозы, прогноз и наблюдаемая заболеваемость раком щитовидной железы.

Введение

По оценкам экспертов, в результате аварии на Чернобыльской АЭС в атмосферу поступило около $1,8 \times 10^{18}$ Бк радионуклидов ^{131}I и по меньшей мере столько же радиологически значимых короткоживущих изотопов йода [1]. Именно радионуклид ^{131}I с периодом полураспада 8,04 сут после переноса в атмосфере и выпадения на почву давал в течение первого месяца аварии наибольший вклад в дозу внутреннего облучения населения, проживавшего на загрязненной территории Российской Федерации (РФ).

Радионуклиды йода обладают летучестью, высокой химической реактивностью, способностью включаться в органические структуры при выпадении на растительность и поступлении в организм животных и человека. Они быстро мигрируют по биологической цепочке: атмосфера – пастбище – молочный скот – молоко – человек [2, 3]. Йод входит в состав тиреоидных гормонов, которые образуются в щитовидной железе (ЩЖ) человека и животных. Практически все соединения радиоактивного йода при поступлении в организм полностью и быстро всасываются в кровь в органах поступления – желудоч-

Звонова Ирина Александровна

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

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

но-кишечном тракте и/или в легких, концентрируются в ЩЖ, создавая значительные дозы излучения [4, 5]. Все эти свойства объясняют высокую радиобиологическую опасность радионуклидов йода в случае аварии ядерного реактора и необходимость оценки радиационного воздействия на население.

Обследование территорий Российской Федерации, в том числе и аэрогаммасъёмка, выявили наибольшие уровни радиоактивных выпадений в 4 областях: Брянской, Калужской, Орловской и Тульской. Анализ метеорологических данных показал, что северо-восточный радиоактивный след в этих областях образовался в результате выпадений из одного облака, сформированного от выбросов радионуклидов из разрушенного реактора во второй половине 27 апреля 1986 г., отношение плотностей выпадения радионуклидов ^{131}I к ^{137}Cs оценивалось около 10 на дату выброса [6–8].

Накопленные к 1986 г. научные знания о радиобиологическом действии радиоизотопов йода, а также результаты радиационного мониторинга в 4 областях давали основания прогнозировать, что наиболее серьезным отдаленным медицинским последствием для населения загрязненных территорий может быть увеличение заболеваемости раком ЩЖ из-за воздействия радиоизотопов йода [9–12]. Для обоснования медицинских и социальных защитных мероприятий, а также для проведения научных эпидемиологических исследований необходимо было оценить дозы излучения в ЩЖ у населения от радиоизотопов йода чернобыльского происхождения. Кроме того, органам власти и здравоохранения были необходимы прогнозы возможной заболеваемости населения для организации адекватного медицинского обслуживания, и такие прогнозы были представлены в сентябре 1986 г. [10, 11]. Через 35 лет после чернобыльской аварии имеется возможность сравнить эти прогнозы с фактической заболеваемостью раком ЩЖ и оценить, насколько они были точны и полезны.

Работа посвящена обзору методов оценки индивидуальных и коллективных доз облучения ЩЖ радиоизотопами ^{131}I у жителей РФ, подвергшихся воздействию радиоактивных выпадений вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, прогнозам медицинских последствий облучения ЩЖ в сравнении с выявленной заболеваемостью раком ЩЖ жителей РФ за 35 лет после Чернобыльской аварии.

Исходные данные для оценки доз в щитовидной железе жителей загрязненных территорий

Методика и оценки доз излучения в ЩЖ у населения территорий России, где выпали радиоактивные вещества вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, базируются на результатах мониторинга радионуклидов йода в окружающей среде, продуктах питания и в организме жителей, который был проведен в мае – июне 1986 г.

Измерения содержания ^{131}I в ЩЖ жителей являются приоритетными данными для оценки доз в щитовидной железе, особенно если измерения дополнены информацией о поведении, рационе питания, выполнении защитных мероприятий человеком в предшествующий измерению период. Второй значимой информацией при отсутствии измерений человека являются измерения концентрации радионуклидов йода и цезия в молоке и других пищевых продуктах. При отсутствии индивидуаль-

ных сведений о поступлении ^{131}I в организм человека необходимо было обосновать обобщенную для населенного пункта (НП) функцию поступления радиоактивного йода в организм жителей с учётом усредненных факторов поведения, рациона питания и выполнения защитных мер [9, 13–16].

Первые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ жителей территорий, загрязненных радиоактивными выпадениями от аварийных выбросов Чернобыльской АЭС, начались 13 мая по приказу Минздрава РСФСР в Брянской, Тульской и Орловской областях в радиоизотопных лабораториях областных больниц и онкодиспансеров по стандартным методикам радиодиагностического обследования ЩЖ с применением ^{131}I на диагностических приборах «Гамма» и ГТРМ [13–16]. Всего в 3 областях в течение месяца было обследовано около 5000 человек, и эти измерения считаются наиболее достоверными, однако индивидуальные опросы о поведении и питании в аварийный период, необходимые для построения функции поступления радиойода в организм обследуемых, не проводили.

С 31 мая по 7 июня 1986 г. в Брянской области и с 17 по 31 мая 1986 г. в Калужской области измерения содержания ^{131}I в ЩЖ жителей проводили непосредственно в НП наиболее загрязненных районов с использованием геологоразведочных радиометров СРП-68-01. В Калужской области было обследовано более 28 000 человек, в Брянской области – около 12 000 человек [13, 14, 17]. Методические подробности проведения измерений и вычисления активности ^{131}I в ЩЖ жителей по результатам измерений приведены в [13–16, 18–20].

Активность ^{131}I в ЩЖ жителей, измеренная в мае – июне 1986 г. разными методами и разными приборами, была определена для 45 000 жителей 4 областей. Наибольшее содержание ^{131}I в ЩЖ было зарегистрировано в середине мая 1986 г. в Красногорском районе Брянской области, где некоторые индивидуальные измерения доходили до 250–360 кБк ^{131}I , а средние значения для НП – до 80 кБк [13–15, 20]. В этот же период в 5 других наиболее загрязненных районах Брянской области средние значения содержания ^{131}I в ЩЖ жителей составляли 5–20 кБк, в наиболее загрязненных районах Тульской области – 5–8 кБк, в Орловской области – 2–5 кБк [13, 14, 20].

В тех населенных пунктах, где не проводили измерения жителей на содержание ^{131}I в ЩЖ, для оценки дозы использовали измерения удельной активности ^{131}I в молоке. Радиационный мониторинг молока и других пищевых продуктов проводили сотрудники областных центров санитарного надзора под методическим руководством и контролем НИИ радиационной гигиены (НИИРГ), начиная с 1 мая 1986 г. В Брянской, Калужской и Орловской областях было выполнено около 4000 исследований проб молока на суммарную бета-активность на приборе ДП-5. В Брянской области было выполнено около 100 радиохимических анализов молока, которые позволили выделить из суммарной бета-активности долю активности, обусловленную ^{131}I . В Тульской области на одноканальной спектрометрической установке в энергетическом окне излучения ^{131}I было измерено более 2000 проб молока. Измерения, проведенные в 4 областях, позволили оценить эффективную скорость снижения концентрации ^{131}I в молоке (за счёт радиоактивного распада радионуклида

и процессов биологического снижения активности в пастбищной траве), скорость снижения активности ^{131}I в молоке, а также показали, что молоко местного производства является основным фактором внутреннего облучения человека радиоизотопами йода и цезия [13–16, 20–22].

Осенью – зимой 1986–1987 гг. в загрязненных районах Брянской области проводили всеобщую диспансеризацию населения, в рамках которой сотрудники НИИРГ выполняли измерения содержания радионуклидов цезия в организме жителей и заполняли дозиметрический вкладыш к карте обследования на каждого измеренного человека. Дозиметрический вкладыш был дополнен вопросами, необходимыми для реконструкции дозы в ЩЖ у обследованных жителей. Таким образом была получена информация о рационах питания жителей, суточном потреблении молока в мае 1986 г., датах прекращения потребления молока из личного хозяйства и датах начала выпаса личного скота в апреле – мае 1986 г., об отсутствии или применении блокады ЩЖ препаратами стабильного йода в мае 1986 г. Было получено более 12 000 анкет в Брянской области и около 2000 в Тульской области. Все эти ответы использовали для построения обобщенной функции поступления ^{131}I в организм жителей [13–16, 21, 23]. Дополнительные сведения о датах выпаса общественного молочного стада и о проведенных защитных мероприятиях в НП собирали в последующие годы среди руководителей колхозов/совхозов, а также рассчитывали по агроклиматической модели [24].

Модель поступления ^{131}I в организм человека и оценка дозы в ЩЖ по результатам измерений

Основными путями поступления ^{131}I в организм человека после Чернобыльской аварии были: вдыхание радионуклидов во время прохождения радиоактивного облака, потребление загрязненного молока, существенно меньшее поступление за счёт потребления ранних листовых овощей, а также других продуктов с возможным поверхностным загрязнением.

В первые годы после аварии для оценки доз в ЩЖ по результатам измерений использовалась упрощенная модель поступления ^{131}I в организм: равномерное поступление в течение 10 дней после радиоактивного выпадения в ареале НП, затем поступление уменьшалось со скоростью снижения удельной активности ^{131}I в молоке. Начальная «ступенька» моделировала суммарное поступление радионуклида в организм жителей за счет ингаляции при прохождении радиоактивного облака и вторичной ресуспензии радионуклидов в последующие дни и потребление молока, в котором концентрация ^{131}I увеличивалась в течение 5–8 дней при выпасе коров на загрязненном пастбище. В сумме эти 2 источника давали примерно равномерное поступление ^{131}I в организм человека в течение 10 дней после радиоактивного загрязнения местности. Анализ рационов питания жителей и результаты радиационного контроля пищевых продуктов в мае 1986 г. показали, что основное поступление радио-

нуклидов йода и цезия происходило с молоком местного производства, поэтому в модели скорость снижения поступления ^{131}I принята равной эффективной скорости снижения удельной концентрации ^{131}I в молоке [9, 13, 14, 25]. Начальное поступление (высота «ступеньки») рассчитывалось из решения обратной задачи описания по данной модели измеренного содержания ^{131}I в ЩЖ.

В последующие годы была обоснована более детальная дозиметрическая модель, в которой были оценены вклады отдельных составляющих поступления: с воздухом, молоком, листовыми овощами с учётом дат начала выпаса молочного скота, дат прекращения потребления молока местного производства, приёма препаратов стабильного йода [15, 16, 23].

Описанным методом оценены дозы от излучения ^{131}I в ЩЖ 12 723 жителей Брянской области, 3835 жителей Орловской области, 647 жителей Тульской области и 27 877 человек в Калужской области [17]. Наибольшие «измеренные» индивидуальные дозы облучения ЩЖ у детей 0–3 лет в юго-западных районах Брянской области достигали 5 Гр.

Оценка средних для населённых пунктов доз в щитовидной железе жителей 4 областей РФ

По результатам прямых измерений ^{131}I в ЩЖ в соответствии с принятой моделью поступления радионуклидов человеку были рассчитаны средние для НП дозы для жителей разного возраста и получены зависимости средних поглощенных доз в ЩЖ от возраста в сельских и городских НП [13, 25]. В сельских НП дозы в ЩЖ младенцев менее 1 года в 4–6 раз превышали дозу у взрослых жителей, в городах это различие достигало 10–12 раз. Такие возрастные зависимости объясняются разным потреблением молока городскими и сельскими жителями [21]. Для оценки дозы в тех НП, где не было прямых измерений ЩЖ жителей, использовали уравнения корреляции средних для НП доз в ЩЖ с измеренными концентрациями ^{131}I молока в тех же сёлах и с уровнем загрязнения почвы радионуклидами ^{137}Cs . Методические подробности оценки средних для НП доз в ЩЖ жителей 4 областей РФ приведены в [15, 16, 23].

После определения средних доз в ЩЖ жителей каждого НП для оценки дозы в разных возрастных группах использовали зависимости средних доз от возраста, а также реальных условий выпаса молочного скота и выполненных защитных мер с помощью соответствующих поправок на эти факторы, согласно принятой модели поступления ^{131}I в организм жителей России. При наличии сведений об образе жизни во время аварии конкретного человека можно индивидуализировать поправки к стандартным условиям и оценить индивидуализированную дозу в ЩЖ данного человека.

Представленные в [14–16, 20] исходные данные мониторинга радиационной обстановки и методические приёмы их обработки были применены для разработки официальных методических указаний¹, на основе которых

¹ МУ 2.6.1.1000-00 «Реконструкция дозы излучения радиоизотопов йода в щитовидной железе жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году» [МУ 2.6.1.1000-00 «Reconstruction of the radiation dose of radioisotopes of iodine in the thyroid gland of the inhabitants of the settlements of the Russian Federation exposed to radioactive contamination as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986» (In Russ.)]

был создан каталог средних доз в ЩЖ у жителей разного возраста, проживавших в 1986 г. в населённых пунктах с загрязнением территории ^{137}Cs выше 37 kBq/m^2 (1 Ки/км^2) в Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областях [26]. Оценки дозы в ЩЖ даны для всех НП, которые включены в «Перечень населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС», утвержденный Правительством РФ 18.12.1997 г. В таблице 1 представлено распределение НП загрязнённых территорий (выше 37 Bк/м^2 по ^{137}Cs) по уровню средних доз в ЩЖ для 6 возрастных групп жителей. В них проживало около 350 000 человек в Брянской области, 730 000 человек в Тульской области, 150 000 человек в Орловской области и менее 100 000 человек в Калужской области [26, 27].

В Брянской области практически все дети младше 8 лет из НП с загрязнением ^{137}Cs выше 37 kBq/m^2 получили дозы в ЩЖ больше $0,05 \text{ Гр}$; в западных районах в 141 НП средние дозы излучения ^{131}I в ЩЖ детей младших возрастных групп превышали 1 Гр , а в 12 НП – $2,5 \text{ Гр}$. В Калужской, Орловской и Тульской областях большая часть средних доз в ЩЖ детей дошкольного возраста

оценена в пределах $0,05\text{--}0,5 \text{ Гр}$, в старших возрастных группах средние дозы в 2–6 раз ниже.

Аналогичные каталоги средних доз в ЩЖ жителей разных возрастных групп были подготовлены для Белгородской, Воронежской, Курской, Ленинградской, Липецкой и Рязанской областей. В этих областях практически все оценки средних доз в ЩЖ жителей не превышали $0,1 \text{ Гр}$.

Коллективные дозы излучения в ЩЖ жителей наиболее загрязнённых областей РФ с общим населением 5,3 млн человек составили в Брянской области 60 000 чел.-Гр, в Тульской области – 20 000 чел.-Гр, в Орловской области – 13 000 чел.-Гр, в Калужской области – 3500 чел.-Гр [15, 27]. В общем для 15 областей России с населением 24 млн человек, подвергшихся загрязнению ^{137}Cs выше 37 kBq/m^2 , коллективная доза оценена в 210 000 чел.-Гр [15, 27].

Примерно 60% коллективной дозы реализовались у городских жителей и 40% – у сельских жителей. В то же время средние дозы у городского населения примерно в 1,5 раза ниже, чем у сельских жителей, при равной плотности радиоактивных выпадений. Около половины всей коллективной

Распределение населенных пунктов 4 областей с выпадением ^{137}Cs на почву выше 37 kBq/m^2 в 1986 г. по уровням средних доз в ЩЖ жителей разного возраста [26]

Таблица 1

Distribution of settlements with ^{137}Cs soil contamination above 37 kBq/m^2 in 1986 in four regions on mean thyroid dose in inhabitants of different age [26]

[Table 1

Диапазон доз, мГр [Dose range, mGy]	Возрастные группы, лет [Age groups, years]					
	< 1	1–2	3–7	8–12	13–17	≥18
Брянская область [Bryansk region]						
0–50	–	–	1	36	83	373
50–200	45	162	593	734	768	531
200–500	588	560	277	186	109	63
500–1000	199	180	89	15	12	6
1000–2500	129	66	13	2	1	–
≥ 2500	12	5	–	–	–	–
Тульская область [Tula region]						
0–50	33	152	791	1144	1249	373
50–200	1159	1111	512	160	56	19
200–500	111	41	2	1	–	–
500–1000	2	1	–	–	–	–
Орловская область [Orel region]						
0–50	2	28	366	795	878	897
50–200	826	857	534	105	22	3
200–500	72	15	–	–	–	–
500–1000	–	–	–	–	–	–
Калужская область [Kaluga region]						
0–50	5	10	166	257	305	335
50–200	279	315	186	95	47	17
200–500	68	27	–	–	–	–
500–1000	–	–	–	–	–	–

дозы в Брянской области с населением 1,5 млн человек приходится на 270 000 жителей, проживающих в 6 наиболее загрязненных юго-западных районах.

Полученные оценки средних доз в ЩЖ были переданы в Российский государственный медико-дозиметрический регистр и явились основой для анализа заболеваемости и выделения когорты долгосрочного наблюдения из населения 4 областей РФ с наибольшими уровнями радиоактивных выпадений, для последующих эпидемиологических исследований связи заболеваемости раком ЩЖ с полученным радиационным воздействием и оценки риска радиогенных заболеваний раком ЩЖ в разных возрастных категориях.

Прогноз медицинских последствий облучения щитовидной железы

Уже летом 1986 г. стало ясно, что острых эффектов – лучевой болезни различной степени тяжести у населения загрязненных территорий выявлено не было [28]. Однако оставалось беспокойство о развитии отдаленных канцерогенных заболеваний среди облученного населения, в первую очередь, это относилось к наиболее облученному органу – ЩЖ. На основании первых оценок радиационного воздействия на население были сделаны прогнозы возможных отдаленных медицинских последствий [9–12, 29]. Они базировались на имеющейся к тому времени информации об эпидемиологических наблюдениях за жителями Японии, пережившими атомные бомбардировки в 1945 г., и за несколькими группами пациентов, получавших внешнее рентгеновское облучение в детском возрасте с терапевтической целью по поводу неонкологических заболеваний, когда в поле облучения попадала ЩЖ [30].

Во всех этих многолетних наблюдениях обследуемые получили кратковременное внешнее гамма- или рентгеновское излучение в дозах от 0,04–0,08 Гр до 10 Гр. В большинстве исследований было обнаружено повышение заболеваемости раком ЩЖ по сравнению с контролем, пропорционально полученной дозе, у женщин дополнительная заболеваемость в 2–3 раза превышала заболеваемость мужчин, были также обнаружены некоторые этнические различия в появлении дополнительных заболеваний раком ЩЖ; данные о влиянии возраста в момент облучения были противоречивыми [30].

В то же время длительное наблюдение в Швеции за 10 000 пациентов, которые получали в диагностических целях ^{131}I , со средней дозой в ЩЖ у лиц в возрасте старше 20 лет 0,6 Гр, моложе 20 лет – 1,6 Гр, повышения частоты заболеваний раком ЩЖ не выявило [31]. Многочисленные экспериментальные работы на лабораторных животных с целью сравнения эффективности канцерогенного воздействия на ЩЖ внешнего гамма-/рентгеновского излучения и внутреннего облучения радиоизотопами йода оказались неоднозначными: коэффициент снижения эффективности ^{131}I оценивался от 10-кратного до равного 1 по сравнению с кратковременным внешним облучением. Экспериментальные данные о биологической эффективности облучения с малой дозой и мощностью дозы по сравнению с острым внешним облучением в большой дозе показывали такой же диапазон значений [30].

Ранние отечественные прогнозы медицинских последствий облучения ЩЖ населения вследствие аварии на ЧАЭС [10–12] ссылаются на оценки риска и параметры

канцерогенной эффективности ^{131}I из докладов НКДАР ООН 1977, 1982 и 1986 гг., причем основные данные по отдаленным эффектам облучения ЩЖ содержатся в докладе 1977 г. [30]. В этой публикации обсуждались все доступные, часто фрагментарные и противоречивые, данные по вопросам радиационного канцерогенеза для ЩЖ, из которых авторы [10–12] выбрали разные коэффициенты риска и модифицирующие факторы. Видимо, этой возможностью разного выбора параметров для расчета прогнозов, представленных в таблице 2, объясняется их значимое отличие друг от друга. В таблице 2 представлены только прогнозы, разработанные до 1995 г, т.е. до того времени, когда рост заболеваемости раком ЩЖ среди детей, получивших облучение железы йодом-131 в 1986 г., стал фактом.

Авторы ранних прогнозов располагали первыми оценками коллективных доз в ЩЖ, основанных на измерениях содержания ^{131}I в пищевых продуктах и в ЩЖ жителей 4 областей РФ. Обработка дозиметрических данных продолжалась, и в наиболее зрелом виде коллективные дозы в ЩЖ жителей были представлены специалистами ФБУН НИИРГ в НКДАР ООН и опубликованы в [1, табл. В10-В12]: 60 500 чел.-Гр в Брянской области и 96 000 чел.-Гр в 4 областях, включая Брянскую область. Эти оценки незначительно отличаются от первых оценок, использованных в [10–13].

В работах [10–12] используют сходные оценки средних и коллективных доз облучения ЩЖ, однако оценки прогнозируемой заболеваемости для наиболее радиочувствительной части населения – детей до 7 лет во время аварии, – различаются более чем на порядок, например, для 5 наиболее загрязненных районов Брянской области от 16 до 200 случаев радиогенных заболеваний раком ЩЖ за жизнь. Можно предположить, что различия обусловлены выбором разных значений факторов снижения радиобиологической эффективности ^{131}I и пролонгированного внешнего и внутреннего облучения по сравнению с кратковременным внешним облучением.

В работе НИИРГ [11] по сохранившимся черновикам удалось восстановить, что прогноз сделан на основе следующих положений, вытекающих из доклада НКДАР ООН 1977 г. [30]: коэффициент пожизненного риска возникновения радиогенного рака ЩЖ принят равным $100 \cdot 10^{-4}$ случаев/(чел.-Гр) независимо от возраста и пола, причем суммировалась доза в ЩЖ от ^{131}I и доза долгосрочного внешнего и внутреннего облучения радионуклидами цезия без понижающих коэффициентов. Это втрое выше современной оценки такого риска [32, табл. А.4.1 и А.4.18].

В работах [10–12] для наиболее загрязненных районов 4 областей (Брянской, Тульской, Орловской и Калужской) заболеваемость всего населения прогнозировали в пределах от 70 до 1400 дополнительных заболеваний раком ЩЖ, а среди детей 0–6 лет на день аварии от 30 до 340 дополнительных случаев. Большая часть прогнозируемых случаев приходится на наиболее загрязненные районы Брянской области (280 000 населения): от 50 до 1000 дополнительных случаев среди всех возрастов, из них на детей до 7 лет в 1986 г. от 16 до 200 случаев.

В работе [12] с наименьшими оценками прогноза коэффициенты риска рассчитаны по данным доклада НКДАР ООН 1988 г. [33], с учетом в 3 раза большей радио-

Таблица 2

[Table 2]

Ранние прогнозы радиогенной заболеваемости раком щитовидной железы у населения РФ вследствие аварии на Чернобыльской АЭС

Early forecasts of thyroid cancer incidence in the population of the Russian Federation due to radiation exposure to after the accident at the Chernobyl NPP]

Публикация [Reference]	Территория [Territory]	Население, тыс. чел. [Population, ths. persons]		Средняя доза в ЩЖ детей до 7 лет, мГр [Mean thyroid dose of children under 7 y, mGy]	КД в ЩЖ от ¹³¹ I, тыс. чел.-Гр [Collective thyroid dose from ¹³¹ I, ths. pers Gy]		КД всего тела, тыс. чел.-Гр *) [Whole body collective dose, ths. pers Gy]	Период прогноза, лет [Forecast period, years]	Число прогнозируемых РЩЖ [Number of predicted thyroid cancer cases]		Комментарии [Comments]
		Всё население ² [Total population ²]	Дети до 7 лет [Children under 7 years]		Всё население ² [Total population ²]	Дети до 7 лет [Children under 7 years]					
Буддаков и др., 1987 [10]	Брянская обл.: наибольшее р/а загрязнение [Bryansk region: areas with larger radionuclide deposition]	205	24	600	50	15	50	70	1000	72	Коллективная доза в ЩЖ, модель абсолютного риска из доклада НКДАР ООН 1977 г. [30] [Collective thyroid dose, additive risk model from 1977 UNSCEAR report [30]]
		490	55	500	74	27	62	70	1350	88	
Рамзаев и др., 1987 [11]	Брянская обл., 5 районов [Bryansk region, 5 districts]	280	30	600	50	15	50	70	1000	200	Коллективная доза в ЩЖ, модель абсолютного риска из доклада НКДАР ООН 1977 г. Коэф. пожизненного риска для РЩЖ – 100·10 ⁻⁴ случаев/чел.-Гр [30]. [Collective thyroid dose, additive risk model from 1977 UNSCEAR report. Lifetime risk coefficient for thyroid cancer – 100 10 ⁻⁴ cases per person Gy [30]]
		600	63	500	76	28	63	70	1400	340	

² Включая детей до 7 лет.

Публикация [Reference]	Территория [Territory]	Население, тыс. чел. [Population, ths. persons]		Средняя доза в ЩЖ детей до 7 лет, мГр [Mean thyroid dose of children under 7 y, mGy]	КД в ЩЖ от ¹³¹ I, тыс. чел.-Гр [Collective thyroid dose from ¹³¹ I, ths. pers Gy]		КД всего тела, тыс. чел.-Гр *) [Whole body collective dose, ths. pers Gy]	Период прогноза, лет [Forecast period, years]	Число прогнозируемых РЩЖ [Number of predicted thyroid cancer cases]		Комментарии [Comments]
		Всё население ² [Total population ²]	Дети до 7 лет [Children under 7 years]		Всё население ² [Total population ²]	Дети до 7 лет [Children under 7 years]					
Ильин и др. 1990 [12]	Брянская обл.: Вся область – [Bryansk region: total region] 5 районов [5 districts] 4 области, 19 район нов наибольшего p/a загрязнения [4 regions, 19 districts with larger radionuclide deposition]	1470	160	600	50	25	50 (5)	30	50	21	Коэф. риска рака ЩЖ: для детей: внешнее γ-излучение – 2,5·10 ⁻⁴ ; от ¹³¹ I 8,3·10 ⁻⁵ случаев/год/чел.Гр; Для взрослых: 1,66·10 ⁻⁴ и 5,5·10 ⁻⁵ . Фактор коррекции на малую мощность дозы внешнего облучения – 0,2. [Thyroid cancer risk coefficients: For children: external γ- 2,5·10 ⁻⁴ ; internal ¹³¹ I – 8,3·10 ⁻⁵ cases per year per person Gy; For adults: 1,66·10 ⁻⁴ and 5,5·10 ⁻⁵ . Correction factor for low dose rate of external radiation – 0,2]
		280	29,8		36	18	44 (5)		36	16	
		704	75	470	70	35	60 (6)	30	70	30	
Zvonova, Balonov, 1993 [13]	Брянская обл.: [Bryansk region:] Вся область – [Total region] Контролируемая территория (>555 кБк/м ²) [Controlled area (>555 kBq/m ²)] 3 области (Брянск, Орёл, Тула) целиком [3 total regions (Bryansk, Orel, Tula)]	1500			55				160 ³		Коэф. риска по [34]: внешнее γ-излучение: 2,5·10 ⁻⁴ для детей <18 лет, для взрослых – 1,25·10 ⁻⁴ ; от ¹³¹ I: 8·10 ⁻⁵ для детей, 4·10 ⁻⁵ для взрослых случаев/год/чел.Гр. [Risk coefficients according to [34]: external γ- 2,5·10 ⁻⁴ for children under 18 yr., for adults – 1,25·10 ⁻⁴ ; from internal ¹³¹ I – for children 8·10 ⁻⁵ , for adults, 4·10 ⁻⁵ cases per year per person Gy.]
		112			22			70	67	34	
		4300	11,3	600	120	6,6	10-20		349		

*3) КД облучения всего тела от длительного внешнего и внутреннего излучения для всего населения, в скобках КД для детей в данной группе населения. [Whole-body CD from long-term external and internal radiation for the total population, in parentheses CD for children in this population.]

³ Только от внутреннего облучения йодом-131. [From ¹³¹I internal exposure only]

чувствительности ЩЖ у женщин, чем у мужчин, и российской возрастно-половой структуры населения: для детей до 7 лет и взрослых от внутреннего облучения ЩЖ ^{131}I $8,3 \cdot 10^{-5}$ и $5,5 \cdot 10^{-5}$ случаев/год/чел.-Гр; для пролонгированного внешнего и внутреннего от ^{137}Cs облучения введен корректирующий фактор 0,2. Кроме того, авторы считали, что все радиационные эффекты в ЩЖ реализуются за 35 лет после радиационного воздействия, из них первые 5 лет – латентный период. В других работах прогноз рассчитывали на 70 лет жизни, и поправки на пролонгированное облучение с малой мощностью дозы не вводили. Всё это привело к очень низкому прогнозу радиогенной заболеваемости раком ЩЖ в работе [12].

Обобщение эпидемиологических и экспериментальных исследований по последствиям облучения ЩЖ было сделано в 1985 г. Национальной комиссией по радиационной защите США (НКРЗ США) в публикации 80 [34], которая стала доступной российскому научному сообществу лишь в 1990-е гг. Выводы доклада базировались на анализе североамериканских эпидемиологических исследований пациентов, облученных в детском возрасте по поводу нераковых заболеваний. Результаты наблюдений за жителями Японии, пережившими атомные бомбардировки в 1945 г., не использовали, так как раковый регистр когорты пожизненного наблюдения (Life Span Study – LSS) выживших японцев начал функционировать на 13 лет позже [30, 35], пропустив ранний период роста радиогенной заболеваемости ЩЖ. Таким образом в публикации [34] были сформулированы следующие выводы:

1. При дозах в ЩЖ в диапазоне 0,06–15 Гр не происходит гибели клеток ткани железы.

2. Средний коэффициент риска составляет 2,5 случая заболеваний раком ЩЖ на 10 000 чел.-Гр в ЩЖ в год для лиц в возрасте до 18 лет ($2,5 \cdot 10^{-4}$ случаев/год/чел.-Гр) от острого внешнего гамма- и рентгеновского облучения.

3. Риск для взрослых примерно вдвое ниже, чем для детей, а для женщин вдвое выше, чем для мужчин.

4. Минимальный латентный период возникновения радиационно-индуцированного рака ЩЖ – 5 лет, а время возможного проявления повышенной заболеваемости раком – до 40 лет после облучения.

5. Смертность от рака ЩЖ оценивалась в 10% заболеваемости (МКРЗ считала, что 5%).

6. Эффективность внутреннего облучения ЩЖ ^{131}I в среднем в 3 раза ниже, чем острого внешнего гамма- и рентгеновского облучения.

7. Облучение с низкой мощностью дозы примерно в 3 раза менее эффективно, чем облучение с высокой мощностью дозы в больших дозах (есть информация о диапазоне значений 2–10).

В нашей работе [13] заболеваемость раком ЩЖ прогнозировали в соответствии с рекомендациями публикации 80 НКРЗ США [33]. Этот прогноз также предсказывал невысокие значения дополнительных случаев заболеваемости – 160 случаев для всего населения Брянской области, из них более 40% среди 112 тысяч жителей территорий строгого контроля (выпадения ^{137}Cs выше 555 kBq/m^2), причем половину этих случаев прогнозировали среди детей младше 7 лет на день аварии. За счёт пролонгированного внешнего и внутреннего облучения ^{137}Cs с учётом выполненных мер защиты населения могло добавиться 15–20 случаев на контролируемой территории.

В работе [13], как и в более ранних работах [10–12], использовали аддитивную модель оценки риска отдалённых последствий облучения. Такая модель не привязана к спонтанной заболеваемости, прогноз исходит из полученной коллективной дозы у жителей, а дополнительная заболеваемость прибавляется к спонтанной.

На международной конференции «10 лет после Чернобыля» [36] подводили итоги изучения радиационного воздействия на здоровье населения, в том числе обсуждали результаты международных проектов по дозиметрии облучения населения, прогнозы медицинских последствий и первые наблюдения роста заболеваемости раком ЩЖ детей в наиболее загрязнённых районах. Сравнение прогнозов с заболеваемостью раком ЩЖ среди детей и подростков в Белоруссии, России и Украине за 10 лет после аварии показали, что реальная заболеваемость в несколько раз превышала прогнозы, например, в Гомельской области Белоруссии – до 10 раз [37]. Обсуждение возможных причин расхождения не внесло ясности, поэтому было принято заключение о необходимости изучать последствия внутреннего облучения населения радиоизотопами йода для последующей оценки коэффициентов риска. Особое внимание предлагалось уделять мультипликативной модели оценки риска, которая должна более адекватно учитывать местные особенности спонтанной заболеваемости раком ЩЖ населения.

Заболеваемость населения РФ раком щитовидной железы после аварии на ЧАЭС

Повышение заболеваемости раком ЩЖ у детей произошло в начале 1990-х гг. На рисунке 1 показана годовая заболеваемость детей Брянской области в возрасте 0–14 лет на дату постановки диагноза за 1981–2007 гг. Заболеваемость раком ЩЖ населения Брянской области представлена по официальным данным Брянского онкологического диспансера. Заключительный диагноз устанавливался по результатам клинического обследования,

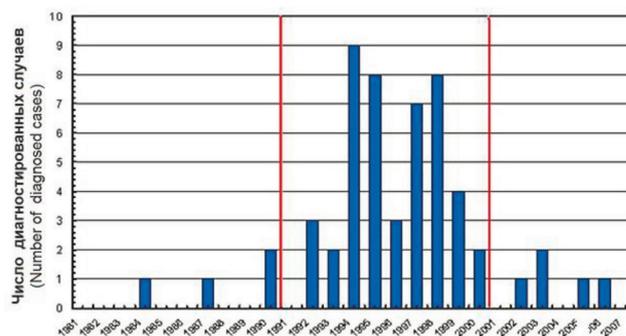


Рис. 1. Диагностированные случаи рака ЩЖ у детей в возрасте 0–14 лет на дату диагноза в Брянской области в 1981–2007 гг.

([38] + неопубликованные собственные данные за 2002–2007 гг.). Красными линиями выделен конец минимального латентного периода (1991 г.) и период времени (2001 г.), когда все дети в возрасте 0–14 лет на день аварии перешли в возрастную категорию подростков

[Fig. 1. The diagnosed cases of thyroid cancer in children aged 0–14 years at the date of diagnosis in the Bryansk region for 1981–2007 ([38] + unpublished own data for 2002–2007). The red lines mark the end of the minimum latency period (1991) and the time period (2001) when all children aged 0–14 years on the day of the accident passed into the teenage age category]

цитологического анализа и послеоперационного гистологического анализа, который имелся в среднем в 65% случаев в 1981–1985 гг., в 89% случаев в 1986–1991 гг. и у всех пациентов, начиная с 1992 г. [38].

Рак ЩЖ – редкое заболевание: у взрослых жителей в 1980-е гг. в европейской части РСФСР заболеваемость была на уровне 20–40 случаев в год на 1 млн жителей, а у детей – 1–2 случая на 1 млн детского населения в год. На таком фоне рост заболеваемости раком ЩЖ после Чернобыльской аварии среди 305 000 детей Брянской области стал очень заметным в период 1991–2000 гг. Начиная с 2001 г., заболеваемость детей резко уменьшилась, так как в возрастной группе 0–14 лет уже не было детей, облученных во время Чернобыльской аварии, все они перешли в группы медицинского наблюдения подростков и взрослых. Аналогичные данные получены в Белоруссии и Украине [1, 39].

В то же время среди группы лиц, возраст которых в 1986 г. был меньше 15 лет, продолжался рост заболеваемости раком ЩЖ и в последующие годы (рис. 2). Рост числа заболеваний в группе детей на день аварии обусловлен несколькими факторами: естественным увеличением спонтанной заболеваемости с возрастом, совершенствованием методов и аппаратуры для УЗИ-диагностики и радиационным воздействием радиоактивного йода после аварии на ЧАЭС.

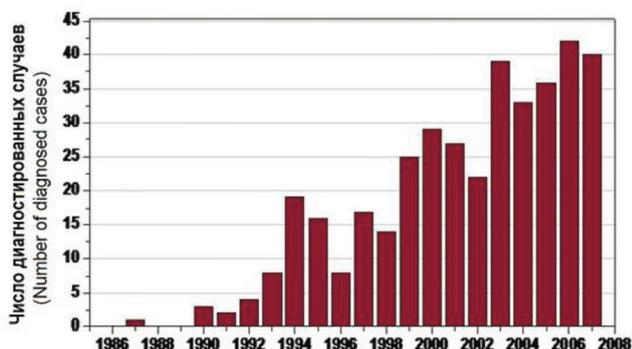


Рис. 2. Диагностированные случаи рака ЩЖ у жителей Брянской области, возраст которых был меньше 15 лет на день аварии на ЧАЭС – 26 апреля 1986 г. (305 000 чел.) ([40] + неопубликованные собственные данные за 2002–2007 гг.)
[Fig. 2.] The diagnosed cases of thyroid cancer in residents of the Bryansk region, who were younger than 15 years on the day of the Chernobyl accident – April 26, 1986 (305 000 people) ([40] + unpublished own data for 2002–2007)]

За период 1991–2001 гг. среди детей 0–14 лет на дату аварии в Брянской области (305 000 детей) было выявлено 172 заболевания раком ЩЖ [38, 40]. Для выделения из них случаев, индуцированных радиацией, в этом исследовании за спонтанный уровень была принята средняя заболеваемость населения Брянской области за 1987–1989 гг., когда радиогенная патология ещё не проявилась, но проявились эффекты скрининга населения юго-западных районов при диспансеризации и более передовая техническая оснащённость исследований ЩЖ. На последующие годы спонтанную заболеваемость за 1987–1989 гг. пересчитывали с учётом взросления населения и смертности в 5-летних когортах населения (группировка

по 5-летним интервалам по 1986 г.). Из полученных данных 2/3 случаев (~65%) отнесены на счёт радиационного воздействия (доверительный интервал 50–80%) [38, 40], заболевания проявились после 5-летнего латентного периода. Из этой средней оценки в возрастной группе 0–4 года радиационным фактором объясняется более 90% случаев (60 из 65 случаев), в группе 5–9 лет – около 70% (30 из 44), в группе 10–14 лет – около 40%, 15–19 лет – 8% [40]. При наблюдении за той же когортой лиц до 2007 г. было диагностировано 382 рака ЩЖ (см. рис. 2).

Стоит отметить, что в работе [40] показано, что примерно половина дополнительных заболеваний раком ЩЖ детей 0–14 лет на дату аварии в Брянской области за период 1991–2001 гг. были выявлены среди жителей относительно слабо загрязнённых территорий. Хотя средние дозы в ЩЖ в этих районах были меньше, чем на контролируемой территории, там проживало в четыре раза больше детей (около 250 тыс. человек), чем в 6 наиболее загрязнённых юго-западных районах (примерно 60 000 человек). Коллективные дозы в ЩЖ детей оказались примерно равными в этих группах населения, что могло инициировать заболевания пропорционально полученной коллективной дозе в этих не равных по численности и территории проживания группах населения.

В работах [41, 42] исследовали заболеваемость раком ЩЖ в когортах из 108 000 детей и подростков 0–17 лет на дату аварии и 219 500 взрослых из наиболее загрязнённых районов 4 областей РФ, которые включены в Национальный радиационно-эпидемиологический регистр (НРЭР) и которые ежегодно проходят медицинские осмотры. За период с 1991 по 2013 г. было выявлено 316 случаев рака ЩЖ среди детей и подростков и 925 случаев среди взрослых старше 18 лет. Проведенный анализ показал, что среди всех заболеваний детей и подростков к радиационно-индуцированным относятся 22,5%, но в возрастной группе 0–4 года эта доля составляет 60,5% – 52 случая из 86, в группе 5–9 лет – 30%; 10–17 лет – 2,6% [41]. С этими результатами хорошо согласуются оценки работы [40].

При продолжении наблюдения за той же когортой до 2019 г. было выявлено 423 случая рака ЩЖ, из них 20,6% (87 случаев) отнесены за счёт полученного в 1986 г. облучения. При этом доля заболеваний, отнесенных к радиационному фактору, в группе детей 0–4 года практически не изменилась – 58%, в группе 5–9 лет уменьшилась до 18%, в группе 10–17 лет составляла 4% [42]. Представленные данные дают основания заключить, что младшая возрастная группа детей наиболее выражено и продолжительно реагирует на облучение ЩЖ радиоизотопами йода, а у старших детей и подростков доля радиационно-индуцированных заболеваний существенно снизилась по прошествии 30 лет после аварии.

В 2018 г. НКДАР ООН обобщил сведения о заболеваемости раком ЩЖ среди детей и подростков (0–17 лет на дату аварии 26.04.1986) в Белоруссии, Украине и в 4 наиболее загрязнённых областях России за 30 лет после аварии на ЧАЭС [39]. Всего выявлено за период 1991–2015 гг. (по прошествии 5 лет латентного периода) более 19 000 заболеваний раком ЩЖ: в Белоруссии 5906, Украине – 11 489, в 4 областях России – 1838 случаев. Для возрастной категории 0–14 лет на дату аварии оценки заболеваемости для каждой страны составляют: 4628, 8546 и 1351 случай соответственно.

За период 1991–2005 гг. среди молодых людей моложе 19 лет на дату аварии было выявлено 6848 случаев рака ЩЖ и 5127 случаев в возрастной группе 0–14 лет [1], т.е. число заболеваний за 10 лет увеличилось к 2015 г. в 2,8 раза для этих возрастных групп. Столь быстрый рост заболеваемости объясняется, в первую очередь, тем, что наблюдаемая когорта облученных детей повзрослела, а молодые взрослые характеризуются более высокой спонтанной заболеваемостью: в 2000-е гг. в РФ заболеваемость молодых взрослых 20–29 лет была примерно на порядок выше, чем среди детей 0–14 лет и в 100 раз больше, чем в возрастной группе 0–9 лет [43]. Второй важный фактор – улучшение технического оснащения УЗИ-диагностики во всех странах и в первую очередь – в радиоактивно загрязненных областях. В-третьих, происходит рост естественной онкологической заболеваемости во всех странах, например, с начала 1990-х гг. удвоение заболеваемости раком ЩЖ в РФ произошло за 15 лет [43]. В настоящее время прирост злокачественных новообразований ЩЖ существенно замедлился. На этом фоне доля заболеваний, вызванных радиационным воздействием в детском и молодом возрасте, становится всё меньше, и её труднее выявить.

НКДАР ООН оценил долю радиогенных заболеваний раком ЩЖ у неэвакуированных детей и подростков моложе 19 лет на день аварии в Белоруссии, России и Украине в 25% для периода наблюдения 1991–2015 гг. с интервалом погрешности от 0,07 до 0,5 [39]. Основываясь на этой оценке, за счёт облучения в 1986 г. можно отнести около 5000 случаев рака ЩЖ в 3 странах, а отдельно в РФ – 460 случаев для 4 областей с диапазоном возможных оценок от 130 до 900 случаев.

Если применить возрастные особенности выявленных радиогенных заболеваний раком ЩЖ из работ [41, 42] к результатам 30-летних наблюдений в 4 областях РФ [39], то можно оценить, что в РФ из диагностированных 460 заболеваний на детей в возрасте 0–6 лет на дату аварии можно отнести примерно 300 случаев. Для такого же возрастного контингента в 4 областях РФ в работе [11] прогнозировали пожизненное появление 340 радиационно-индуцированных раков ЩЖ среди 63 000 детей до 7 лет, в работе [10] – 88 случаев среди 55 000 детей, проживавших в районах 4 областей РФ с наибольшими радиоактивными выпадениями.

Эти прогнозы для целых 4 областей РФ, которые можно сравнить с наблюдениями [39], должны быть выше. Так, в [40] показано, что за первые 15 лет после аварии в 22 районах Брянской области с меньшими уровнями выпадений (включая город Брянск) было диагностировано столько же дополнительных случаев рака ЩЖ среди детей 0–14 лет, как в 6 районах с наибольшими выпадениями. С учетом этого факта, можно заключить, что использованная в [10, 11] простая аддитивная модель риска показала разумное согласие с наблюдаемой в РФ радиогенной заболеваемостью детей раком ЩЖ за 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС

В ранних прогнозах [10–13] большая часть заболеваний раком ЩЖ предполагалась среди взрослого населения. Эти оценки для всего населения 4 областей и отдельно Брянской области не нашли эпидемиологического подтверждения, так как среди жителей в возрасте старше 18 лет в 1986 г. за более чем 20 лет не были достоверно

выявлены радиационно-обусловленные заболевания [41, 42].

В работах [10, 11, 13] предполагалось, что дополнительная заболеваемость раком ЩЖ будет проявляться равномерно в течение всех предстоящих лет жизни, что до настоящего времени не могло быть подтверждено наблюдениями, и исследования продолжаются.

Что касается предполагаемых заболеваний гипотиреозом среди детей, то у небольшого числа лиц наблюдалось кратковременное снижение уровня тиреоидных гормонов, но стойкого гипотиреоза у детей не было выявлено [44].

Следует также понимать, что как описанные прогнозы, так и выделение радиогенной компоненты заболеваемости раком ЩЖ из данных 30-летних эпидемиологических наблюдений характеризуются большой статистической неопределенностью. Эта неопределенность ограничивает точность приведенных выше сравнений и обоснованность рекомендаций для прогноза. К настоящему времени закономерности образования радиационно-индуцированного рака ЩЖ изучены несравненно лучше, чем это было 30–40 лет назад, а данная работа имеет характер исторического анализа.

Заключение

Несмотря на широкий диапазон прогностических оценок отдаленных канцерогенных последствий облучения ЩЖ у населения РФ, эти прогнозы привлекли внимание органов власти к проблеме и помогли организации специализированной медицинской помощи населению. Прогнозы также стимулировали научное наблюдение для уточнения коэффициентов риска радиационно-индуцированных заболеваний, возникших в реальных условиях масштабной аварии ядерного реактора.

В целом, ранние прогнозы радиационно-индуцированной заболеваемости раком ЩЖ детей в 4 областях РФ с высокими уровнями радиоактивных выпадений [10–13] разумно согласуются с данными последующих 30-летних эпидемиологических наблюдений. В отношении рака ЩЖ у взрослых жителей такое сопоставление затруднено, поскольку повышение радиогенной заболеваемости не выявлено.

До настоящего времени нет международного консенсуса относительно модели и численных оценок коэффициента риска облучения ЩЖ радиоизотопами йода, оценок эффекта скрининга в когортных исследованиях, периода реализации индуцированных облучением заболеваний ЩЖ. Масштабные радиационно-эпидемиологические исследования, проводимые в Белоруссии, России и Украине, нацелены на решение этих вопросов.

Литература

1. Научный комитет ООН по действию атомной радиации. Последствия облучения для здоровья человека в результате Чернобыльской аварии. Научное приложение D к Докладу НКДАР ООН 2008 года Генеральной Ассамблее. Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк, 2012.
2. Ильин Л.А., Архангельская Г.В., Константинов Ю.О., Лихтарев И.А. Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности. М.: Атомиздат, 1972.
3. Kirchner G. Transport of iodine and cesium via the grass-cow-milk pathway after the Chernobyl accident // Health Physics. 1994. Vol. 66, No 6. P. 653-664.

4. ICRP Publication 56. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides // *Annals of the ICRP*. 1989. Vol. 20.
5. ICRP Publication 72. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 5: Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients // *ICRP Annals of the ICRP*. 1996. Vol. 26, No 1.
6. Borzilov V.A., Klepikova N.V. Effect of Meteorological Conditions and Release Composition on Radionuclide Deposition after the Chernobyl Accident // In: *The Chernobyl Papers*. Vol. 1: "Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies". Eds. Merwin S., Balonov M. Richland: Research Enterprises; 1993. P. 47-68.
7. Орлов М.Ю., Сныков В.П., Хваленский Ю.А., и др. Радиоактивное загрязнение территорий Белоруссии и России после Чернобыльской аварии // *Атомная энергия*. 1992. Т. 72, № 4. С. 371-376.
8. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А., и др. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. Гидрометеоиздат, 1990. 223 с.
9. Звонова И.А., Балонов М.И., Константинов Ю.О. Реконструкция поглощенной дозы излучения йода-131 в щитовидной железе жителей загрязненных территорий РСФСР // В кн. «Ближайшие и отдаленные последствия радиационной аварии на Чернобыльской АЭС». М.: 1987. С. 168-175.
10. Булдаков Л.А., Аветисов Г.М., Бархударов Р.М., и др. Оценка дозовой нагрузки на население и долгосрочных радиологических последствий в результате аварии на ЧАЭС. В кн. «Ближайшие и отдаленные последствия радиационной аварии на Чернобыльской АЭС». М., 1987. С. 5-17.
11. Рамзаев П.В., Иванов Е.В., Балонов М.И., и др. Прогноз медицинских последствий аварии на ЧАЭС для населения РСФСР // В кн. «Ближайшие и отдаленные последствия радиационной аварии на Чернобыльской АЭС». М.: 1987. С. 348-355.
12. Ильин, Л.А. Балонов М.И., Булдаков Л.А., и др. Экологические особенности и медико-биологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС // *Медицинская радиология*. 1989. Т. 34, № 12. С. 59-81.
13. Zvonova I.A., Balonov M.I. Radioiodine Dosimetry and Forecast for Consequences of Thyroid Exposure of the RSFSR Inhabitants Following the Chernobyl Accident. In: *The Chernobyl Papers*. Vol. 1: Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Ed. by S. Merwin and M. Balonov. Richland: Research Enterprises; 1993. P. 71-125.
14. Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А., и др. Оценка поглощенной дозы в щитовидной железе жителей Брянской, Тульской, Орловской областей по результатам радиометрии в 1986 году // *Радиация и риск*. 1997. Вып. 10. С. 95-116.
15. Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А. Внутреннее облучение щитовидной железы йодом-131. В кн. «Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС». Под ред. РАН Г.Г. Онищенко и А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ имени проф. Рамзаева, 2016. Т. 1. С. 47-88.
16. Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А., и др. Экспериментальное обоснование методики реконструкции дозы облучения щитовидной железы для жителей России // В кн. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях». СПб: Гидрометеоиздат, 2000. Т. 3. С. 151-159.
17. Цыб А.Ф., Степаненко В.Ф., Матвеев Е.Г., и др. Структура и уровни облучения щитовидной железы у жителей загрязненных районов Калужской области // *Радиация и риск*. 1994. Вып. 4. С. 129-135.
18. Zvonova I.A., Bruk G.Ya., Kaidanovsky G.N., et al. Mass Internal Exposure Monitoring of Population in Russia After the Chernobyl Accident // *Radiation Protection Dosimetry*. 2000. Vol. 89, No 3-4. P. 173-178.
19. Улановский А.В., Дроздович В.В. Влияние радионуклидов, распределенных в теле человека, на оценку доз облучения щитовидной железы по результатам прямых измерений. Препринт ИПЭ-27, Минск, 1997.
20. Bratilova A.A., Zvonova I.A., Balonov M.I., et al. ¹³¹I in the human thyroid estimated from direct measurements of the inhabitants of Russian areas radioccontaminated due to the Chernobyl accident // *Radiation Protection Dosimetry*. 2003. Vol. 105, No. 1-4. P. 623-626.
21. Звонова И.А., Жеско Т.В., Братилова А.А. Параметры режима питания и поведения жителей Брянской области в мае 1986 года, влияющие на оценку дозы, полученной вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная гигиена*. 2011. Т. 4, № 2. С. 50-58.
22. Zvonova I., Bratilova A., Zhesko T., et al. Ecological half-life of I-131 in milk after dry and wet radionuclide deposition due to the Chernobyl accident // *Radioprotection*. 2009. Vol. 44, № 5. P. 731-734.
23. Balonov M.I., Bruk G.Ya., Zvonova I.A., et al. Methodology of internal dose reconstruction for Russian population after the Chernobyl accident // *Radiation Protection Dosimetry*. 2000. Vol. 92, No 1-3. P. 247-253.
24. Власов О.К., Питкевич В.А. Агроклиматическая модель оценки транспорта радионуклидов по пищевым цепочкам и формирования доз внутреннего облучения населения // *Радиация и Риск*. 1999. Вып. 11. С. 65-86.
25. Zvonova I.A., Balonov M.I., Bratilova A.A. Thyroid Dose Reconstruction for Population of Russia Suffered after the Chernobyl Accident // *Radiation Protection Dosimetry*. 1998. Vol. 79, No.1-4. P. 175-178.
26. Справочник: «Средние дозы облучения щитовидной железы жителей разного возраста, проживавших в 1986 г. в населенных пунктах Брянской, Тульской, Орловской и Калужской областей, загрязненных радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. Под ред. М.И. Балонова и И.А. Звоновой. М.: Минздрав России, 2002.
27. Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А., и др. Дозы облучения щитовидной железы у населения России вследствие выпадений радиоактивного йода после аварии на Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия*. 2004. Т. 96, вып.4. С. 310-316.
28. Пятак О.А., Лукьянова Е.М., Бугаев В.Н., и др. Проблемы оценки состояния здоровья населения в условиях аварии на АЭС. В кн. «Медицинские аспекты аварии на Чернобыльской атомной станции». Киев: Здоровье, 1988. С. 165-171.
29. Звонова И.А., Лихтарев И.А., Филюшкин И.В., и др. Оценка онкологического риска облучения щитовидной железы человека // *Вестник АМН СССР*. 1991. № 8. С. 32-35.
30. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. 1977 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, 1977.
31. Holm L., Lundell G., Walinder G. Incidence of malignant thyroid tumors in Human after exposure to diagnostic doses of iodine 131 // *Journal of the National Cancer Institute*. 1980. Vol. 64. P. 1055-1059.
32. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ. И.А. Гусева; под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. 1988 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York: 1988.
34. Induction of Thyroid Cancer by Ionizing Radiation: Recommendation of the National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP Report No. 80). Bethesda: NCRP. 1985.

35. Duple E.B., Mabuchi K., Cullings H.M., et al. Long-term Radiation-Related Health Effects in a Unique Human Population: Lessons Learned from the Atomic Bomb Survivors of Hiroshima and Nagasaki. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, American Medical Association. 2011. Vol. 5, Suppl. 1.
36. Proceedings of the International Conference on One Decade After Chernobyl: Summing Up the Consequences of the Accident 8-12 April 1996. Vienna: IAEA, 1996. 555 p. (ISSN 0074-1884).
37. Cardis E., Anspaugh L., Ivanov V.K., et al. Estimated long term health effects of the Chernobyl Accident. In: *One Decade After Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident*. IAEA, Vienna, 1996. P. 241-267.
38. Звонова И.А., Братилова А.А., Почтенная Г.Т., Петрова Г.В. Рак щитовидной железы у жителей Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС // *Вопросы Онкологии*. 2005. № 5. С. 540-545.
39. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. United Nations. New-York. 2018.
40. Звонова И.А., Братилова А.А., Почтенная Г.Т. Риск радиогенных заболеваний раком щитовидной железы у жителей Брянской области вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2005. Т. 50, № 5. С. 41-52.
41. Иванов В.К., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., и др. Рак щитовидной железы: уроки Чернобыля и их применение к ситуации в Фукусиме // *Радиация и риск*. 2016. Т. 25, № 2. С. 5-19.
42. Иванов В.К., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., и др. Оценка радиационных рисков злокачественных новообразований среди населения 3 регионов России, загрязнённых радионуклидами вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиация и риск*. 2021. Т. 30, № 1. С. 58-77.
43. Петрова Г.В., Каприн А.Д., Грецова О.П., Старинский В.В. Злокачественные новообразования в России, обзор статистической информации за 1993-2013 гг. Под общ. ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, 2015. 511 с.
44. Беникова Е.А., Большова Е.В., Звонова И.А., и др. Состояние гипофизарно-тиреоидной системы у детей в различные сроки после радиационного воздействия в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В кн. «Медицинские аспекты аварии на Чернобыльской атомной станции». Киев: Здоровье. 1988. С. 177-180.

Поступила: 10.08.2021 г.

Звонова Ирина Александровна – доктор технических наук, доцент, главный 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ir_zv@bk.ru

Балонов Михаил Исаакович – доктор биологических наук, профессор, главный 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

Для цитирования: Звонова И.А., Балонов М.И. Сравнение ранних прогнозов заболеваемости раком щитовидной железы жителей Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС с данными наблюдений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. – С. 45-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-45-59

Comparison of early forecasts of the incidence of thyroid cancer in residents of the Russian Federation after the Chernobyl accident with observational data

Irina A. Zvonova, Mikhail I. Balonov

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

A review of methods for assessing doses in the thyroid gland, predictions of the long-term consequences of its irradiation and the actual incidence of thyroid cancer in residents of four regions of the Russian Federation with the most significant radioactive fallout after the Chernobyl accident are presented. The method for assessing doses in the thyroid gland is based on the results of monitoring in May-June 1986 of radioiodine in the environment, food and in the body of residents. Thyroid doses in the population were used to justify medical and social protection measures, as well as epidemiological studies. In addition, the authorities needed

Irina A. Zvonova

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: ir_zv@bk.ru

forecasts of the possible morbidity of the population in order to organize adequate medical care. Most of the thyroid cancer cases were predicted among the adult population, which was not confirmed by observations 35 years after the accident. The prognosis of the incidence of thyroid cancer in preschool children differed in different studies due to the use of different coefficients of reducing the biological effectiveness of ^{131}I radiation in the thyroid gland and long-term external and internal irradiation of the whole body with a low dose rate compared to the effect of acute exposure. The increase in the incidence of thyroid cancer among children began five years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Examples of the dynamics of the incidence for children in the Bryansk region of the Russian Federation are given. The 2018 UNSCEAR Report showed that for 1986–2015, among children and adolescents under 18 years of age on the day of the accident in Belarus, Ukraine and four regions of Russia, more than 19 thousand thyroid cancer cases were detected, of which the share of radiation-induced diseases was estimated at 25%. For four regions of Russia, this amounts to 460 cases with a range of possible estimates from 130 to 900 cases. The highest morbidity was manifested among younger children exposed at the age of 0–4 years. In older children and adolescents, the proportion of radiation-induced diseases has significantly decreased 30 years after the accident. In general, early forecasts of radiation-induced thyroid cancer incidence in children in four regions of the Russian Federation with high levels of radioactive fallout are consistent with the data of subsequent 30-year epidemiological observations within an order of magnitude. With regard to thyroid cancer in adults, such a comparison is difficult, since no radiogenic increase in the incidence has been detected.

Key words: Chernobyl accident, population, thyroid doses, cancer prognosis and observed incidence of thyroid cancer.

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. Annex D UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II. Annex D. United Nations, New York; 2011.
2. Ilyin LA, Arkhangelskaya GV, Konstantinov YuO, Likhtarev IA. Radioactive iodine in the problem of radiation safety. Moscow, Atomizdat; 1972. (In Russian)
3. Kirchner G. Transport of iodine and cesium via the grass-cow-milk pathway after the Chernobyl accident. *Health Physics*. 1994;66(6): 653-664.
4. ICRP Publication 56. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. *Annals of the ICRP*. 1989;20.
5. ICRP Publication 72. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 5: Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients. ICRP Annals of the ICRP. Oxford; 1996. 26 (1).
6. Borzilov VA, Klepikova NV. Effect of Meteorological Conditions and Release Composition on Radionuclide Deposition after the Chernobyl Accident. In *The Chernobyl Papers*. Vol. 1: "Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies". Eds. Merwin S, Balonov M. Richland: Research Enterprises; 1993. P. 47-68.
7. Orlov MYu, Snykov VP, Khvalensky YuA, Teslenko VP, Korenev AI. Radioactive contamination of the territories of Belarus and Russia after the Chernobyl accident. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1992;72(4): 371-376. (In Russian).
8. Izrael YuA, Vakulovsky SM, Vetrov VA, Petrov VN, Rovinsky FYa, Stukin ED. Chernobyl: radioactive contamination of natural environments. Hydrometeoizdat; 1990. 223 p. (In Russian).
9. Zvonova IA, Balonov MI, Konstantinov YuO. Reconstruction of the absorbed dose of iodine-131 radiation in the thyroid gland of residents of the contaminated territories of the RSFSR. In "Immediate and Long-Term Consequences of the Radiation Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant." Moscow: 1987. P. 168-175. (In Russian).
10. Buldakov LA, Avetisov GM, Barkhudarov RM, Margulis UYa, Moskalev Yul, Osanov DP, et al. Assessment of the dose load on the population and long-term radiological consequences as a result of the Chernobyl accident. In "Immediate and long-term consequences of the radiation accident at the Chernobyl nuclear power plant." Moscow; 1987. P. 5-17. (In Russian).
11. Ramzaev PV, Ivanov EV, Balonov MI, Lieberman AN, Arkhangelskaya GV. Forecast of the medical consequences of the Chernobyl accident for the population of the RSFSR. In "Immediate and removed consequences of a radiation accident at the Chernobyl nuclear power plant". Moscow: 1987. P. 348-355. (In Russian).
12. Ilyin LA, Balonov MI, Buldakov LA, et al. Environmental features and medico-biological consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Medical radiology. Meditsinskaya radiologiya = Medical radiology*. 1989;34(12): 59-81. (In Russian).
13. Zvonova IA, Balonov MI. Radioiodine Dosimetry and Forecast for Consequences of Thyroid Exposure of the RSFSR Inhabitants Following the Chernobyl Accident. In: *The Chernobyl Papers*. Vol. 1: Doses to the Soviet Population and Early Health Effects Studies. Ed. by S. Merwin and M. Balonov. Richland, W., USA: Research Enterprises; 1993. P. 71-125.
14. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA, Baleva GE, Gridasova SA, Mitrokhin MA, et al. Estimation of the absorbed dose in the thyroid gland of residents of the Bryansk, Tula, Oryol regions based on the results of radiometry in 1986. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 1997;10: 95-116. (In Russian).
15. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA. Internal irradiation of the thyroid gland with iodine-131. In the monography "Radiation-hygienic aspects of overcoming the consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant". Ed. G.G. Onishchenko and A.Yu. Popova. Saint-Petersburg: NIIRG named after prof. Ramzaeva; 2016. Vol. 1. P. 47-88. (In Russian).
16. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA, Pitkevich VA, Vlasov OK, Shishkanov NG. Experimental Substantiation of The Technique for Reconstructing The Thyroid Dose For The Inhabitants Of Russia. In "Radioactivity in Nuclear Explosions and Accidents". Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat; 2000. Vol. 3. P. 151-159. (In Russian).
17. Tsyb AF, Stepanenko VF, Matveenkov EG, et al. The structure and levels of thyroid gland exposure in residents of contaminated areas of the Kaluga region. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 1994;4: 129-135. (In Russian).
18. Zvonova IA, Bruk GYa, Kaidanovsky GN, Zhesko TV, Balonov MI. Mass Internal Exposure Monitoring of Population in Russia After the Chernobyl Accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;89(3-4):173-178.
19. Ulanovsky AV, Drozdovich VV. Influence of radionuclides distributed in the human body on the assessment of thyroid

- doses based on the results of direct measurements. Preprint IPE-27: Minsk; 1997. (In Russian).
20. Bratilova AA, Zvonova IA, Balonov MI, Shishkanov NG, Trushin VI, Hoshi M. ¹³¹I in the human thyroid estimated from direct measurements of the inhabitants of Russian areas radiocontaminated due to the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2003;105(1-4): 623-626.
 21. Zvonova IA, Zhesko TV, Bratilova AA. Parameters of the diet and behavior of residents of the Bryansk region in May 1986, affecting the assessment of the dose received as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(2): 50-58. (In Russian).
 22. Zvonova I, Bratilova A, Zhesko T, Sarycheva S, Fomintseva M. Ecological half-life of I-131 in milk after dry and wet radionuclide deposition due to the Chernobyl accident. *Radioprotection*. 2009;44(5): 731-734.
 23. Balonov MI, Bruk GYa, Zvonova IA, Pitkevich VA, Bratilova AA, Zhesko TV, et al. Methodology of internal dose reconstruction for Russian population after the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2000;92(1-3): 247-253.
 24. Vlasov OK, Pitkevich VA. Agroclimatic model for assessing the transport of radionuclides along the food chain and the formation of doses of internal exposure of the population. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 1999;11: 65-86. (In Russian).
 25. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA. Thyroid Dose Reconstruction for Population of Russia Suffered after the Chernobyl Accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 1998;79(1-4):175-178.
 26. Handbook: "Average doses of thyroid gland exposure of residents of different ages who lived in 1986 in settlements of the Bryansk, Tula, Oryol and Kaluga regions contaminated with radionuclides as a result of the Chernobyl accident. Ed. M.I. Balonov and I.A. Zvonova. Ministry of Health of Russia: Moscow; 2002. (In Russian).
 27. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA, Danilova IO, Vlasov OK, Shchukina NV. Radiation doses of the thyroid gland in the population of Russia due to the fallout of radioactive iodine after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2004;96(4): 310-316. (In Russian).
 28. Pyatak OA, Lukyanova EM, Bugaev VN, Nedelko VP, Prisyazhnyuk AE, Burenin PI, et al. Problems of assessing the state of health of the population in the conditions of an accident at a nuclear power plant. In "Medical aspects of the accident at the Chernobyl nuclear power plant". Kiev: Health; 1988. P. 165-171.
 29. Zvonova IA, Likhtarev IA, Filyushkin IV, Shandala NK, Gulko GM. Assessment of the oncological risk of exposure to the human thyroid gland. *Bulletin of the USSR Academy of Medical Sciences*. 1991;8: 32-35.
 30. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1977 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations: New York; 1977.
 31. Holm L, Lundell G, Walinder G. Incidence of malignant thyroid tumors in Human after exposure to diagnostic doses of iodine 131. *Journal of the National Cancer Institute*. 1980;64: 1055-1059.
 32. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
 33. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. 1988 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations: New York; 1988.
 34. Induction of Thyroid Cancer by Ionizing Radiation: Recommendation of the National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP Report No. 80). Bethesda: NCRP; 1985.
 35. Douple EB, Mabuchi K, Cullings HM, Preston DL, Kodama K, Shimizu Y, et al. Long-term Radiation-Related Health Effects in a Unique Human Population: Lessons Learned from the Atomic Bomb Survivors of Hiroshima and Nagasaki. Disaster Medicine and Public Health Preparedness, American Medical Association. 2011;5(1).
 36. Proceedings of the International Conference on One Decade After Chernobyl: Summing Up the Consequences of the Accident. Vienna: IAEA; 1996. 555 p. (ISSN 0074-1884).
 37. Cardis E, Anspaugh L, Ivanov VK, Likhtarev IA, Mabuchi K, Okeanov AE, et al. Estimated long term health effects of the Chernobyl Accident. In: One Decade After Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident. IAEA Agency: Vienna; 1996. P. 241-267.
 38. Zvonova IA, Bratilova AA, Pochtennaya GT, Petrova GV. Thyroid cancer in residents of the Bryansk region after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. "Questions of Oncology". 2005;(5): 540-545. (In Russian).
 39. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Evaluation of data on thyroid cancer in regions affected by the Chernobyl accident. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. United Nations: New-York; 2018.
 40. Zvonova IA, Bratilova AA, Pochtennaya GT. The risk of radiogenic diseases of thyroid cancer among residents of the Bryansk region due to the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Medical radiology and radiation safety*. 2005;50(5): 41-52. (In Russian).
 41. Ivanov VK, Kascheev VV, Chekin SYu, Maksyutov MA, Tumanov KA, Menyailo AN, et al. Thyroid cancer: lessons from Chernobyl and their application to the situation in Fukushima. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2016;25(2): 5-19. (In Russian).
 42. Ivanov VK, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksyutov MA, Tumanov KA, Kochergina EV, et al. Assessment of radiation risks of malignant neoplasms among the population of 3 regions of Russia contaminated with radionuclides as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2021;30(1): 58-77. (In Russian).
 43. Petrova GV, Kaprin AD, Gretsova OP, Starinsky VV. Malignant neoplasms in Russia, a review of statistical information for 1993-2013. Ed. by A.D. Kaprin, Prof. V.V. Starinsky. Moscow: MNIOL im. P.A. Herzen; 2015. 511 p. (In Russian).
 44. Benikova EA, Bolshova EV, Zvonova IA, Zubovsky GA, Markov VV, Matvienko EG, et al. The state of the pituitary-thyroid system in children at various times after radiation exposure as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. In "Medical aspects of the accident at the Chernobyl nuclear power plant." Kiev: Health; 1988. P. 177-180. (In Russian).

Received: August 10, 2021

For correspondence: Irina A. Zvonova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of 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: ir_zv@bk.ru)

Mikhail I. Balonov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher of 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

For citation: Zvonova I.A., Balonov M.I. Comparison of early forecasts of the incidence of thyroid cancer in residents of the Russian Federation after the Chernobyl accident with observational data. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 4. P. 45-59. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-45-59

Анализ медицинского облучения пациентов в рентгеновской диагностике России за полвека наблюдения (1970–2019 гг.)

С.А. Кальницкий¹, Н.В. Целиков²

¹ 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

² Ленинградская областная клиническая больница, Санкт-Петербург, Россия

На протяжении 50 лет вначале в РСФСР в составе СССР (1970–1980 гг.), затем в Российской Федерации (1990–2019 гг.) авторы занимались вопросами радиационной безопасности при медицинском рентгенодиагностическом облучении пациентов. Читателю предлагается интегральный радиационно-гигиенический анализ 50-летнего медицинского рентгенодиагностического облучения пациентов и населения России с целью информирования и анализа имеющихся данных по наиболее значимому виду использования источников ионизирующего излучения в народном хозяйстве, поскольку на протяжении полвека сменилось несколько поколений людей, радикально изменилась медицинская диагностическая рентгеновская техника и технологии. Приведенные в статье сведения получены на основе радиационно-гигиенической статистики, а также по данным собственных исследований. Материал представлен на федеральном уровне в виде объема проводимых исследований – определяемом количеством рентгенологических процедур, а также уровня медицинского рентгенодиагностического облучения в виде эффективной дозы облучения пациентов России – огромного региона с населением около 150 млн человек, где ежегодно выполнялось около 200 млн рентгенологических процедур, т.е. около 10 млрд рентгенологических процедур за все время наблюдения. За время исследования была сформирована коллективная эффективная доза, равная 6,5 млн чел.-Зв из расчета 100 000 чел.-Зв и выше в год. В работе приведена динамика и структура исследуемых показателей в зависимости от вида излучения, а также его локализации. Показан вклад рентгенодиагностики в общий объем лучевой диагностики, которая динамично развивается. Найдено, что на всем протяжении исследования происходили два разнонаправленных процесса: увеличение числа рентгенологических процедур при одновременном снижении эффективной дозы облучения пациентов. В настоящее время достигнут минимум дозы, после чего началось ее повышение, связанное с использованием новых технологий, преимущественно за счет компьютерной томографии. Определено, что в зависимости от локализации основная лучевая нагрузка при проведении рентгенологических процедур ложится на скелет и органы пищеварения. В целом, представлен громадный по объему и значимый по информативности материал. Полученные на основе столь уникального материала сведения являются представительными и позволяют, во-первых, аналитически исследовать вопросы радиационной защиты пациентов и, во-вторых, планировать стратегию и тактику ее развития.

Ключевые слова: рентгеновская диагностика, пациенты, рентгенологическая процедура, медицинское облучение, эффективная доза, радиационная защита.

Введение

Медицинское применение источников ионизирующей радиации было и остается главным антропогенным фактором облучения населения. Авторы, являясь на протяжении 50 лет непосредственными участниками формирования системы радиационной защиты (РЗ) от медицинского рентгенодиагностического облучения (МРО) пациентов и населения, обладают соответствующей уникальной информацией. За прошедшее время в России была создана и успешно функционирует система радиационной безопасности (РБ), основанная на стратегии (соблюдении безопасных усло-

вий проведения рентгенологических исследований – РЛИ) и тактике (использовании основных способов РЗ пациентов: обоснования и оптимизации) развития.

Особенностью МРО является, во-первых, значительный контингент обследуемых, приравненный практически ко всему населению, во-вторых, реальный и значимый уровень МРО пациентов, участвующих в проведении РЛИ и, в-третьих, отсутствие нормирования облучения пациентов.

Несмотря на развитие нерадиационных методов диагностики, таких как ультразвуковые исследования (УЗИ)

Кальницкий Сергей Анатольевич

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

и магнитно-резонансная томография (МРТ), рентгенология остается главным средством получения диагностической информации в клинической практике. Более того, в последние годы к ней добавились новые рентгеновские методы, в том числе компьютерная томография (КТ), интервенционная радиология (ИР) и др., отличающиеся высокой информативностью, но одновременно – высокими дозами облучения пациентов. При этом новые диагностические методы добавляются к традиционно используемым, а не заменяют их.

Уровень МРО населения существенным образом зависит от структуры РЛИ, а также от уровня технической оснащенности рентгенологии и степени профессиональной подготовки медицинского персонала, назначающего и выполняющего РЛИ. Статистика показывает, что в настоящее время объем выполняемых рентгенологических процедур (РЛП) в виде числа РЛП на 1000 человек населения (‰) в России и ряде ее регионов является достаточно высоким и составляет в среднем 2000‰, достигая 2500‰ [1]. Столь высокие значения обусловлены, главным образом, огромными масштабами стандартных исследований и наличием массовых профилактических обследований населения, проводимых с целью скрининга туберкулеза органов грудной клетки (ОГК) и рака молочной железы (МЖ) у женщин.

В последнее время на фоне громадных и все увеличивающихся масштабов использования медицинского рентгенодиагностического облучения во всем мире [2] и современных представлений о радиобиологическом действии источников ионизирующего излучения (ИИИ) [3] вызывает интерес долгосрочный анализ уровня МРО в России.

Цель исследования – интегральный радиационно-гигиенический анализ уровня МРО при проведении РЛП в лучевой диагностике России в динамике за длительное (полвека) время наблюдения (1970–2019 гг.).

Задачи исследования

1. Установление объема проводимых исследований в виде числа РЛП.
2. Определение уровня МРО пациентов в виде эффективной дозы (ЭД).
3. Оценка структуры РЛП и коллективной дозы (КД) применительно к виду и локализации облучения.
4. Анализ радиационно-гигиенических показателей.

Материал и методы исследования

В работе проведен радиационно-гигиенический анализ рентгенодиагностических методов исследования и МРО за полвека наблюдения, во-первых, во всем мире и, во-вторых, для России: вначале для РСФСР (1970–1980 гг.), затем для РФ (1990–2019 гг.). В частности, на основании литературных [1,4–10]^{1,2,3}, собственных [11] данных, а также сведений медицинской⁴ и радиационно-гигиенической статистики⁵ определен и проанализирован уровень МРО в России в виде количества выполненных РЛП, индивидуальной дозы (ИД) и КД облучения пациентов и населения, а также их динамики и структуры за 50 лет наблюдения с интервалом исследования в 10 лет. Для этого в советский период использовалась компьютерная программа «Регион» для обработки ежегодных статистических сведений из отчетов ЛПУ регионов (по форме №30)⁶, а в постсоветское время – единая государственная система контроля индивидуальных доз населения (ЕСКИД) с формой статистического наблюдения 3-ДОЗ регионов⁷, где на основе полученной первичной информации рассчитывались все требуемые показатели на федеральном уровне. Окончание исследования 2019 г. обусловлено начавшейся эпидемией вируса COVID-19, значительно изменившей традиционную медицинскую статистику в 2020 г. и в последующем.

Изучены основные виды РЛП: рентгенография, флюорография и рентгеноскопия, в том числе пленочные

¹ Контроль и ограничение доз облучения пациентов при рентгенологических исследованиях. Методические рекомендации. Л., 1988. 26 с. [Control and limitation of radiation doses of patients during X-ray examinations. Guidelines. Leningrad; 1988. 26 p. (In Russ.)].

² Заполнение форм государственного статистического наблюдения 3-ДОЗ. Методические рекомендации. М.: Роспотребнадзор, 2001. [Filling of the Federal state statistical surveillance form No. 3-DOZ. Methodical recommendations the provision of the radiation safety. Approved by the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection – 2001. (In Russ.)].

³ Заполнение форм государственного статистического наблюдения 3-ДОЗ. Методические рекомендации МР № 0100/1659-07-26 от 16.02.2007. М.: Роспотребнадзор, 2007. [Filling of the Federal state statistical surveillance form No. 3-DOZ. Methodical recommendations the provision of the radiation safety. Approved by the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection on February 16, 2007, No. 0100 / 1659-07-26. (In Russ.)].

⁴ Форма статистического наблюдения № 30 «Сведения о медицинской организации в РФ за 20...г.» от 03.08.2018. №483 Росстата. [The Federal state statistical surveillance form № 30 "Information about a medical organization in the Russian Federation in 20 ..." Approved by the Russian Federal State Statistics Service on August 03, 2018, №483 (In Russ.)].

⁵ Форма статистического наблюдения 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских диагностических рентгенодиагностических исследований в РФ за 20...г.» от 16.10.2013. №441 Росстата. [The Federal state statistical surveillance form No. 3-DOZ. Information about patient doses from medical exposure in the Russian Federation in 20 Approved by the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection on October 16, 2013, No441 (In Russ.)].

⁶ Якубовский-Липский Ю.О. Программа для обработки на ЭВМ статистической годовой отчетности ЛПУ региона и оценки уровня радиационной безопасности пациентов и населения при проведении РЛИ (Регион-1А). ЦИФ ГосФАП №50900001184 от 17.01.91. [Yakubovskiy-Lipskiy YuO. Program for computer processing of statistical annual reports of health care facilities of the region and assessment of the level of radiation safety of patients and population during RLI (Region-1A). CIF GosFAP No. 50900001184 dated 17.01.91. (In Russ.)].

⁷ Постановление Правительства РФ от № 718 от 16 июня 1997 г. «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Resolution of the Government of the Russian Federation on June 16, 1997 No. 718 «The procedure for creating a unified state system for monitoring and recording individual doses of people exposure.» (In Russ.)]

и цифровые методы, включая современные технологии: КТ и ИР. Рассмотрены основные анатомические локализации РЛИ: ОГК, костно-суставная система (КСС), органы пищеварения (ОПВ) и мочеполовые органы (МПО).

Все исследуемые показатели рассчитывались на 1000 человек населения (промилле, ‰), то есть являлись относительными и позволяли сравнивать их между собой по единой шкале измерений, что дало возможность получать объективную информацию. Данные на одного человека составляют 1/1000 от ‰.

Необходимо отметить, что за прошедшие полвека сменилось несколько дозиметрических понятий: экспозиционной дозы, интегральной дозы, органной дозы (гонадной, костномозговой), эффективной эквивалентной и, наконец, эффективной дозы. В работе в качестве дозы облучения пациентов использовалась ЭД. Расчет ЭД происходил на основе режимов исследования с помощью соответствующих компьютерных программ [12,13] или специальных методик⁸, где в основе лежали вначале полуэмпирические методы, рассчитанные на экспериментальном определении профиля поля, а затем расчетные методы моделирования излучения в антропоморфном гетерогенном фантоме человека. В качестве производных от ЭД рассматривались: средняя доза за одну процедуру (КД/РЛП) и средняя доза на одного человека – (КД/чел). КД выражалась в чел.-мЗв для удобства восприятия и возможности анализа.

Результаты и обсуждение

Следует отметить, что рассматриваемый период сопровождался значительным развитием, во-первых, на-

учных представлений об использовании ИИИ в народном хозяйстве, включая медицину, и, во-вторых, научно-технической революции, характеризующейся совершенствованием рентгеновского оборудования и технологий. Это непосредственно отразилось на величине доз облучения пациентов (табл. 1). В таблице приведена динамика действующих в практике ЭД при основных РЛП за все время наблюдения. Как видно, в общей динамике процедурных доз обращает на себя внимание вначале увеличение стандартных доз, а затем их снижение, связанное с модернизацией рентгенодиагностического оборудования, в том числе с помощью цифровых технологий.

В целом, за время наблюдения в лучевой диагностике происходили два разноплановых процесса в плане воздействия МРО на пациента: во-первых, снижение дозы облучения за счет оптимизации структуры РЛИ, совершенствования оборудования, включая использование цифровых приемников излучения, а также оптимизации условий облучения пациентов, и, во-вторых, ее увеличение – за счет внедрения новых технологий, сопровождающихся в том числе компьютерными методами, особенно КТ.

Особенностью рассматриваемого периода является также тот факт, что все исследуемые процессы происходили в промежуток времени с радиационной аварией на Чернобыльской АЭС в 1986 г., отразившейся на рассматриваемых показателях. В частности, в России были приняты беспрецедентные меры по оптимизации РЗ населения, в том числе по снижению КД от всех ИИИ, включая медицинские, обладающие максимальными резервами снижения дозы. Данное обстоятельство диктовалось необходимостью уменьшить риск суммарного облучения

Таблица 1

Динамика средних эффективных доз облучения пациентов при проведении основных рентгенодиагностических исследований в России за 50 лет наблюдения (мЗв/процедура)

[Table 1

The dynamics of the average effective doses of patients for the most common X-ray examinations in Russia for 50 years (mSv / examinations)]

Анатомическая область [Anatomical area]	Орган [Organ]	Вид исследования [Examination]	1970 г. [1970 y] [°]	1980 г. [1980 y] [¹]	1990 г. [1990 y] [²]	2000 г. [2000 y] [²]	2010 г. [2010 y] [³]	2019 г. [2019 y] [⁴]
Органы грудной клетки [Chest]	Легкие [Lungs]	Рентгенография: [Radiography]: на пленке [Analogue]	0,10	0,09	0,25	0,26	0,18	0,17
		цифровая [Digital]	–	–	–		0,04	0,05
		Флюорография (скрининг): [Fluorography (screening)]: на пленке [Analogue]	0,65	0,50	0,50	0,80	0,37	0,37
		цифровая [Digital]	–	–	–		0,05	0,04
		Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	1,50	1,20		1,9/5,7*	3,10	1,30
		КТ[СТ]	–	–	–	11,0	5,90	5,2/12,1 ³
		Интервенционные исследования ¹ [Interventional examinations]	–	–	–	–	19,2	15/28 ⁴

⁸ Методические указания МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль доз облучения у пациентов при проведении рентгенодиагностических медицинских исследований». [MU 2.6.1.2944-11 Control of the effective doses of patients for the medical X-ray examinations. Methodical instructions. (In Russ.)]

Анатомическая область [Anatomical area]	Орган [Organ]	Вид исследования [Examination]	1970 г. [1970 y] [⁶]	1980 г. [1980 y] [¹]	1990 г. [1990 y] [⁷]	2000 г. [2000 y] [²]	2010 г. [2010 y] [³]	2019 г. [2019 y] [⁸]	
Костно-суставная система [Osteoarticular system]	Череп [Skull]	Рентгенография [Radiography]	0,09	0,12	0,12	0,17	0,10	0,07	
		КТ [СТ]	–	–	–	2,00	1,66	1,90	
	Зубы [Teeth]	Рентгенография [Radiography]	–	0,02	–	0,04	0,03	0,02	
		КТ [СТ]	–	–	–	–	0,70	0,60	
	Шейные позвонки [Cervical spine]	Рентгенография [Radiography]	0,18	0,20	0,20	0,22	0,20	0,15	
		Грудные позвонки [Thoracic spine]	Рентгенография [Radiography]	1,18	1,60	1,60	0,60	0,70	0,50
			Рентгенография [Radiography]	1,43	1,20	1,20	1,70	1,00	0,70
			Рентгенография [Radiography]	2,10	1,60	1,60	1,90	0,80	0,79
	Таз, тазобедренные суставы [Pelvis, hip]	Рентгенография [Radiography]	0,70	1,40	1,40	1,10	1,70	1,14	
		Рентгеноскопия пищевода [Fluoroscopy of esophagus]	0,50	1,50	1,50	–	3,50	1,84	
Брюшная полость [Abdomen]		Рентгеноскопия желудка [Fluoroscopy of stomach]	3,45	6,00	6,00	4,6/11*	10,0	8,0	
		Ирригоскопия [Irrigoscopy]	14,4	10,0	10,0	–	20,0	12,0	
КТ [СТ]		–	–	–	14,0	7,30	7,1/23 ³		
Интервенционные исследования [Interventional examinations]	–	–	–	–	–	20/60 ⁴	15/45 ⁴		
	Почки, мочевые пути [Kidneys, urinary tract]	Рентгенография [Radiography]	2,00	1,00	–	0,60	0,54/0,	0,52/0,14	
		Молочная железа [Breast]	Рентгенография ² [Radiography] на пленке [Analogue]	–	–	0,10	0,60	0,09	0,05
цифровая [Digital]	–		–	–	–	0,06	0,05		
ВСЕГО [Total]			1,40	0,94	0,79	0,71	0,35	0,31	

*с УРИ/без УРИ, ¹сосудов сердца, ²диагностика – 4 снимка, профилактика – 2, ³с контрастом, ⁴терапия [*with image intensifier/without image intensifier, ¹heart vessels, ²diagnostics -4 images, screening – 2 prevention images, ³with contrast, ⁴therapy]

населения от ИИИ для компенсации аварийного чернобыльского облучения в силу существовавшей зависимости риска облучения от коллективной, а не индивидуальной дозы, как в настоящее время [3].

Следует иметь в виду, что МРО в отечественной рентгеновской диагностике является частью глобальной мировой системы облучения пациентов при использовании ИИИ в медицине [2]. Поскольку рентгенодиагностические методы широко используются в мировой практике на протяжении длительного времени, информация по ним отражена вплоть до самого высокого уровня – Организации

объединенных наций (ООН) в виде докладов НКДАР ООН (табл. 2). За период наблюдения с 1970-х гг., фиксируемый НКДАР ООН, в мире растет как число РЛП (с 1100% до 1600%), так и коллективная доза (с 1,4 млн чел.-Зв до 2,4 млн чел.-Зв в 2000-е гг. в странах с высоким уровнем развития медицины (экономически-развитые страны – ЭРС). С учетом этого средняя индивидуальная доза МРО населения увеличилась с 1,10 мЗв/чел. до 1,91 мЗв/чел. То есть отмечается повышение уровня МРО.

Поскольку основным аспектом формирования МРО и, следовательно, обеспечения РБ является техничес-

Динамика радиационно-гигиенических показателей в рентгеновской диагностике в России и в мире*

Таблица 2

[Table 2]

The dynamics of radiation-hygienic indicators in X-ray diagnostics in Russia and in the world*

Регион [Region]	Показатель [Indicator]	1970 г. [1970 y]	1980 г. [1980 y]	1990 г. [1990 y]	2000 г. [2000 y]
В мире [in the world]	Население, млн человек [Population, million people]	4200	5000	5290	5800
	Количество рентгеновских аппаратов, на 100 тыс.чел. [The number of X-ray units, per 100 thousand people]	13,5	14,0	13,4	11,3
	Число специалистов, работающих с медицинскими ИИИ, на 100 тыс.чел. [The number of specialists working with medical radiation sources, per 100 thousand people]	2,6	5,3	4,0	6,8
	Число рентгенологических исследований, на 1 тыс.чел. [The number of X-ray examinations, per 1,000 people]	360	400	430	670
	Коллективная доза (чел.-мЗв), на 1 тыс.чел. [Collective dose (men-mSv), per 1,000 people]	357	400	430	530
	Средняя эффективная доза, мЗв/процедура [Average effective dose, mSv / examination]	1,0	1,0	1,0	0,8
	Население, млн человек (вклад от мирового уровня, %) [Population, million people (contribution from the world level, %)]	1220 (29)	1350 (27)	1320 (25)	1510 (26)
экономически развитые страны [economically developed countries]	Количество рентгеновских аппаратов, на 100 тыс.чел. [The number of X-ray units, per 100 thousand people]	45,0	38,0	35,0	29,0
	Число специалистов, работающих с медицинскими ИИИ, на 100 тыс.чел. [The number of specialists working with medical radiation sources, per 100 thousand people]	6,2	7,6	7,2	10,6
	Число рентгенологических исследований на 1 тыс.чел. [The number of X-ray examinations, per 1,000 people]	1150	1230	1230	1740
	Коллективная доза (чел.-мЗв) на 1 тыс.чел. [Collective dose (men-mSv), per 1,000 people]	–	960	1260	1420
	Средняя эффективная доза, мЗв/процедура [Average effective dose, mSv / procedure]	–	1,0	1,2	1,4
Россия [Russia]	Население, млн человек [Population, million people]	130	138	148	147
	Количество рентгеновских аппаратов, на 100 тыс.чел. [Number of X-ray units, per 100 thousand people]	–	17,0	20,9	23,6
	Число специалистов, работающих с медицинскими рентгеновскими ИИИ, на 100 тыс.чел. [The number of specialists working with medical radiation sources, per 100 thousand people]	–	24,3	35,3	31,7

[2,14-16]

кое оснащение лучевой диагностики и, в первую очередь, рентгеновскими аппаратами, их количество и характеристика являются предметом постоянного внимания специалистов в плане обеспечения качества. Соответствующие данные для рентгенологического оборудования в различных странах и в целом в мире также приведены в таблице 2.

Из приведенных данных видно, во-первых, громадные объемы проводимых исследований, соответственно, уровни МРО и, во-вторых, неравномерность распределения средств и методов рентгеновской диагностики в разных странах. В этом отношении следует отметить, что Россия относится к ЭРС.

С учетом вышесказанного, особый интерес представляет радиационно-гигиеническое состояние отечественной лучевой диагностики. В частности, анализ рентгенодиагностических методов исследования за полвека наблюдения в России показал практически посто-

янное увеличение числа РЛП на всех сроках наблюдения с 1065‰ в 1970 г. до 2002‰ в 2019 г. (почти в 2 раза) (табл. 3). Исключением явился период после аварии на чернобыльской АЭС в 1986 г. (когда были предприняты различные способы снижения уровня облучения населения, в том числе за счет ограничения проведения профилактических РЛП) (рис. 1а, б). Наблюдаемое увеличение числа РЛП на всем протяжении исследования обусловлено уровнем заболеваемости и требует отдельного рассмотрения.

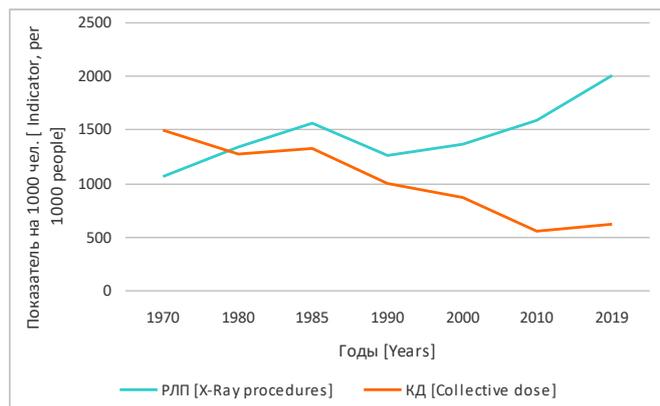
Из приведенных данных видно, что за рассматриваемый период параллельно с ростом числа РЛП сопутствующее МРО постоянно снижалось. Как уже было отмечено, в мировой практике наблюдаются другие закономерности: одновременное повышение числа исследований и дозы облучения, причем наиболее интенсивно в последнее время (рис. 1в) [2,14–16]. Данные закономерности обусловлены иной структурой РЛИ и, в частности, нали-

Таблица 3
[Table 3]

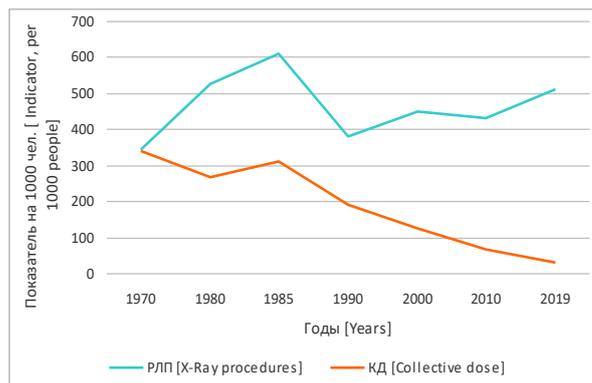
Долгосрочная динамика медицинского облучения пациентов в рентгеновской диагностике в России (1970–2019 гг.) *
The long-term dynamics of patient medical exposure of X-ray diagnostics in Russia (1970–2019) *

Рентгеновские исследования [X-Ray examinations]	Показатель [Indicator]	1970 г. [1970 y]	1980 г. [1980 y]	1990 г. [1990 y]	2000 г. [2000 y]	2010 г. [2010 y]	2019 г. [2019 y]
ВСЕГО [TOTAL]	РЛП, ‰						
	из них профилактических (%) [X-Ray examinations, ‰, including preventive examinations (%)]	1065 344(32)	1340 526(39)	1260 382(30)	1360 449(33)	1575 430(27)	2002 647(32)
	КД (чел.-мЗв) ¹ , ‰	1496	1265	1000	870	550	620
	из них профилактических [Collective dose (men-Sv), ‰, including preventive examinations]	471	265	190	125	80	46
	КД/РЛП, мЗв/проц. [Collective dose/X-Ray examinations, mSv/examin.]	1,40	0,94	0,92	0,68	0,33	0,31
В том числе органы грудной клетки [including chest]	РЛП, ‰						
	из них профилактических (%) [X-Ray examinations, ‰, including preventive examinations (%)]	776 344(44)	848 526(62)	810 382(47)	689 449(65)	743 430(60)	874 508(58)
	КД (чел.-мЗв), ‰	750	501	329	258	128	202
	из них профилактических [Collective dose (men-Sv), ‰, including preventive examinations]	340	265	190	125	64	28
	КД/РЛП, мЗв/проц. [Collective dose/X-Ray examinations, mSv/examin.]	0,97	0,57	0,39	0,72	0,267	0,21
костно-суставная система [Osteoarticular system]	РЛП, ‰ [X-Ray examinations, ‰]	168	241	253	412	647	817
	КД (чел.-мЗв), ‰ [Collective dose (men-Sv), ‰]	90	103	127	144	135(110) ²	197 (195) ²
	КД/РЛП, мЗв/проц. [Collective dose/X-Ray examinations, mSv/examin.]	0,53	0,43	0,45	0,44	0,21	0,21
	РЛП, ‰ [X-Ray examinations, ‰]	77	147	108	73	60	62
Органы пищеварения [Digestive organs]	КД (чел.-мЗв), ‰ [Collective dose (men-Sv), ‰]	650	581	525	320	163	142
	КД/РЛП, мЗв/проц. [Collective dose/X-Ray examinations, mSv/examin.]	8,44	3,95	3,44	2,75	2,72	2,29
	РЛП, ‰	5	6	8	12	116	238
	из них профилактических (%) [X-Ray examinations, ‰, including preventive examinations (%)]	–	–	–	–	34	155
Мочеполовые органы [Urogenital organs]	КД (чел.-мЗв) ¹ , ‰	10	14,0	16,2	22,8	28	54
	из них профилактических [Collective dose (men-Sv), ‰, including preventive examinations]	–	–	–	–	15	18
	КД/РЛП, мЗв/проц. [Collective dose/X-Ray examinations, mSv/examin.]	2,0	0,13	0,15	0,12	0,71	0,23
	РЛП, ‰						

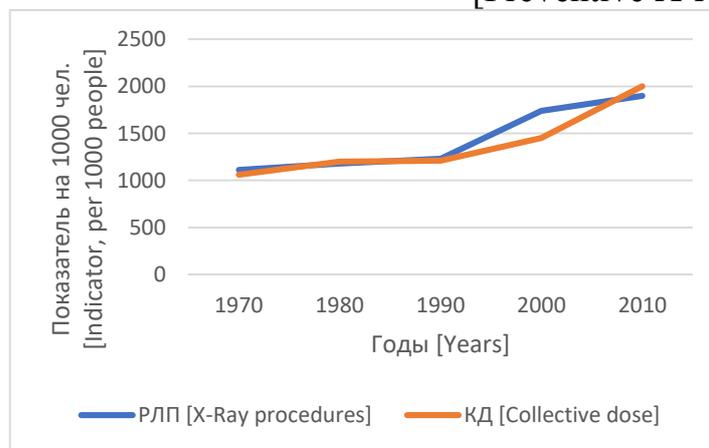
*по данным статистической формы №3-ДОЗ (до 2000г. по форме №30): вначале для РСФСР, а затем для РФ, ¹коллективная доза на 1000 чел.(на основе измеренных доз): соответственно доза на одного человека из населения – КД/чел., мЗв/чел. – в 1000 раз меньше, ²без учета конечностей и зубов [*according to the statistical form 3-DOZ (according to form № 30 up to 2000 year): for the RSFSR, and then for the Russian Federation, collective dose per 1000 people (based on measured doses): accordingly, the dose per person from the population is CD / people, mSv / person - 1000 times less, 2 excluding limbs and teeth]



1а – все РЛП [All X-ray examinations]



1б – профилактические РЛП [Preventive X-ray examinations]



1в – РЛП в экономически-развитых странах [X-ray examinations in economically developed countries]

Рис. 1. Долгосрочная динамика объема диагностических (а) и профилактических (б) РЛП, а также сопутствующего МРО пациентов в рентгеновской диагностике России по сравнению с аналогичными данными в ЭРС (в) в виде числа РЛП (в ЭРС – РЛИ) и КД (чел.-мЗв) облучения пациентов

[Fig. 1. The long-term dynamics of the volume of diagnostic (a) and preventive (b) X-ray examinations, as well as concomitant patient medical exposure in X-ray diagnostics in Russia in comparison with similar data from economically developed countries (c), are presented in the format of the number of X-Ray procedures and collective dose (men-mSv)]

чем большого количества специальных исследований, сопровождающихся повышенным МРО.

Исследование динамики МРО за 50 лет наблюдения в России показало, что реабилитационные мероприятия после аварии на Чернобыльской АЭС способствовали уменьшению числа диагностических РЛП с 1560‰ в 1985г. до 1260 в 1990 г. – более чем на 20% (рис. 1а). Еще более существенным было снижение профилактических исследований за эти же годы с 619‰ до 385‰, т.е. почти на 40% (рис. 1б). Однако в дальнейшем при наличии соответствующей заболеваемости, данные показатели снова стали расти.

Следует отметить, что среди всех лучевых методов исследования массовые профилактические флюорографические обследования населения являются одними из наиболее масштабных и затратных мероприятий в здравоохранении. В качестве единственного возможного метода раннего выявления туберкулеза легких они были внедрены в России (СССР) в 1950–1960 гг. в условиях высокого уровня туберкулезной заболеваемости и неблагоприятных эпидемиологических тенденций. Эта мера в со-

вокупности с другими оздоровительными медицинскими, а также социальными мероприятиями позволила снизить уровень заболеваемости туберкулезом. Однако полностью радикально решить данную проблему в России не удалось до настоящего времени. Поэтому она остается актуальной и сейчас, отчасти благодаря появившимся социальным аспектам.

Вышесказанное особенно актуально, поскольку флюоропрофилактика затрагивает около 1/3 всех РЛП. При этом облучается практически здоровое население, в основном, трудоспособного возраста. Поэтому главная цель радиационной гигиены заключается в снижении здесь уровня облучения пациентов и населения, что и было достигнуто с помощью современных и, в частности, цифровых, технологий. В настоящее время стоит задача повышения информативности профилактических методов обследования с обеспечением соответствующего уровня РБ.

Таким образом, приходится констатировать, что на сегодняшний день имеющаяся система массовой флюорографической профилактики населения является неидеальной и требует своего дальнейшего совершенство-

вания на основе реализации различных современных подходов, в том числе радиационно-гигиенических.

Наряду с вышесказанным, в последние годы в России наметился и другой аспект профилактических рентгенологических исследований и, в частности, маммографических. Дело в том, что не менее важной проблемой в настоящее время является выявление и лечение злокачественных новообразований МЖ у женщин. Данная патология по распространенности занимает в последние годы 1-е место среди всех видов онкологии у женщин.

В этих условиях рентгеновский метод (маммография) по-прежнему остается главенствующим в диагностике и профилактике рака МЖ. Свидетельством тому является тот факт, что коллективная ЭД облучения женщин при проведении маммографии за последние годы (2010–2017 гг.) увеличилась в 2 раза, а с 1990 г. – в 15 раз (см. табл. 3). Данный факт свидетельствует также о необходимости совершенствования здесь методов РЗ, включая оптимизацию.

В ходе эволюции рентгенодиагностики наблюдались экстремальные случаи использования МРО и, в частности, применение в целом ряде случаев необоснованных видов исследований, сопровождающихся высокими дозами облучения пациентов, в том числе профилактической рентгеноскопии, флюоромаммографии, электро-рентгенографии (ксерография) и др., доза на которые в несколько раз превышала средние показатели. Данные исследования практиковались в 1970–1980 гг. и приводили к излишнему облучению пациентов.

В целом, говоря о МРО, следует отметить, что при увеличении общего числа РЛП в лучевой диагностике России в 2 раза уровень МРО за рассматриваемый период (50 лет) снизился с КД (‰) 1500 чел.-мЗв в 1970 г. до 550 чел.-мЗв в 2018 г., то есть почти в 3 раза. При этом КД на процедуру снизилась в 5 раз с 1,40 мЗв до 0,28 мЗв. Объяснением снижению МРО являются совершенствование структуры РЛИ (в основном, за счет сокращения рентгеноскопических исследований), техническая модернизация рентгенодиагностического оборудования и использование оптимальных условий проведения РЛП.

В последние годы после длительного снижения в отечественной лучевой диагностике наметилась тенденция увеличения МРО. Она, в первую очередь, происходит за счет развития компьютерных методов исследований и, в частности, КТ. Следует иметь в виду, что диагностическая информация, получаемая данными методами, значительно превосходит аналогичную других лучевых методов, что подразумевает дальнейшее расширение ее использования. В то же время данные методы сопровождаются значительными лучевыми нагрузками на пациентов (до нескольких десятков мЗв за исследование). Поэтому вопросы обеспечения РБ в данной сфере являются приоритетными.

Задача здравоохранения заключается в нахождении баланса или оптимального уровня использования КТ, а Роспотребнадзора – в контроле МРО и поддержании соответствующего уровня РБ при внедрении новых технологий, поскольку излишнее применение подобных методов диагностики, например, в США привело к многократному увеличению уровня МРО населения, которое впервые достигло уровня природного облучения [2].

То, что в лучевой диагностике вполне можно ограничиться оптимальными объемами КТ, свидетельствует опыт его использования в Великобритании, являющейся законодателем мод в области РЗ [2]. Здесь при небольших объемах КТ успешно и эффективно осуществляется деятельность лучевой диагностики. Сравнение показывает, что в России основная часть РЛИ проводится с помощью менее информативных стандартных (рутинных) исследований, в то время как в Великобритании (как и в других ЭРС) основная диагностическая информация получается с помощью высокоинформативных специальных исследований, в том числе КТ, что свидетельствует о практической возможности разумного использования метода КТ в рентгенологии и тем самым недопущения чрезмерного облучения пациентов.

Между тем, как было показано (см. табл. 3), в России из всех видов диагностических РЛП только КТ растет постоянно и значительно. Так, за последние 10 лет число КТ выросло в 4,8 раза, а КД от нее увеличилась в 4,9 раза, в то время как общее число РЛП увеличилось в 1,5 раза, а суммарная коллективная доза от них снизилась на 5,1%. Если в 2007 г. вклад КТ в число РЛП составлял 1,1%, то через 10 лет в 2017 г. – 3,6%, для КД аналогичные значения составляли 0,01% и 50,5% соответственно.

В данных условиях необходимо не только продолжить работу по дальнейшему совершенствованию РЗ пациентов, но и активизировать ее на основе принципа оптимизации и, в частности, путем внедрения референтных диагностических уровней (РДУ) облучения пациентов, а также расширить применение обоснованности РЛП.

В целом, полувековой анализ наблюдения за динамикой и структурой стандартных РЛП и КД показывает смещение приоритета с высокодозовых исследований (рентгеноскопии) в 1970 г. на низкодозовые (рентгенографию) в 2019 г. (рис. 2, см. табл. 3). В частности, объем рентгеноскопии сократился с 38% (в 1960-х гг. – 54%) до 0,5% в 2019 г., а в дозе – с 60% до 5,2%. В то же время за счет увеличения числа рентгеновских снимков объем рентгенографии, составлявшей ранее около 20%, увеличился в 3 раза и достиг максимума (65%), а вклад дозы от нее, составляя 27% и пройдя максимум в 56% в 2000г., снизился до 17% (рис. 2б).

В последние годы стали превалировать специальные исследования, в том числе КТ, которая при вкладе в объем исследований всего 4,6% обуславливает дозу 60,2%, и ИР, которая при объеме менее 1% создает дозу, равную 11,8% (рис. 2б).

Поэтому представляло интерес определить тенденции изменения объема проводимых РЛП и уровня МРО для основных локализаций РЛИ на протяжении столь длительного срока наблюдения. Соответствующие данные приведены в таблице 3. и на рисунках 3 и 4.

Следует отметить, что при исследовании облучения различных органов и структур организма человека здесь наблюдаются различные тенденции (см. табл. 3). Во-первых, около половины всех исследований (44%) в настоящее время приходится на ОГК, и это положение стабильно сохраняется на всех сроках исследования (см. рис. 4а). Кроме того, из всех РЛП ОГК более половины (58%) осуществляются с профилактической целью. В данной сфере более всего нашли свое отражение ограничительные меры от последствий аварии на ЧАЭС.

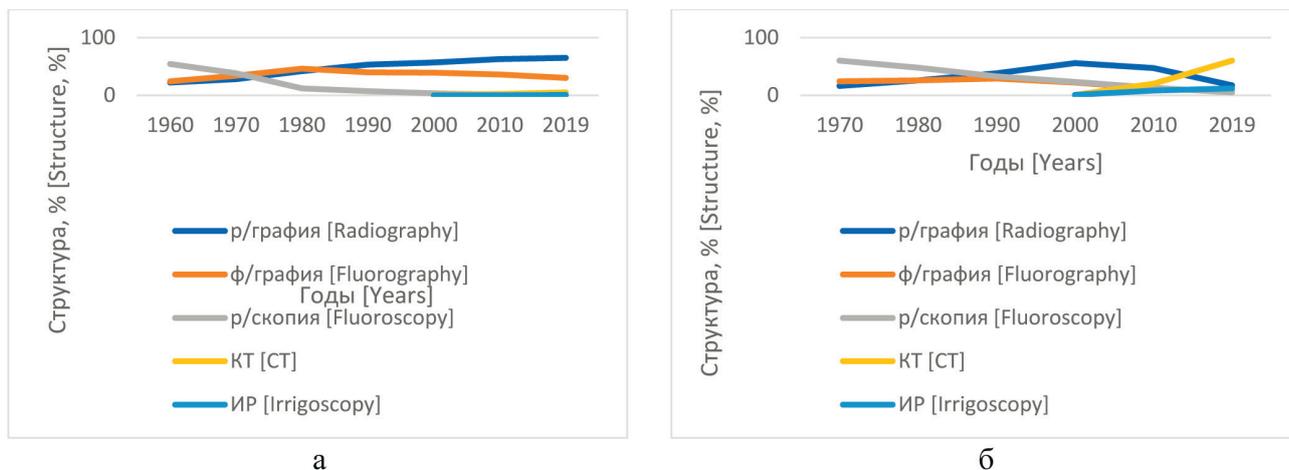


Рис. 2. Изменение структуры РЛП (а) и ЭД (б) в лучевой диагностике в России
[Fig. 2. The change in the structure of X-Ray examinations (a) and effective doses (b) in radiation diagnostics in Russia]

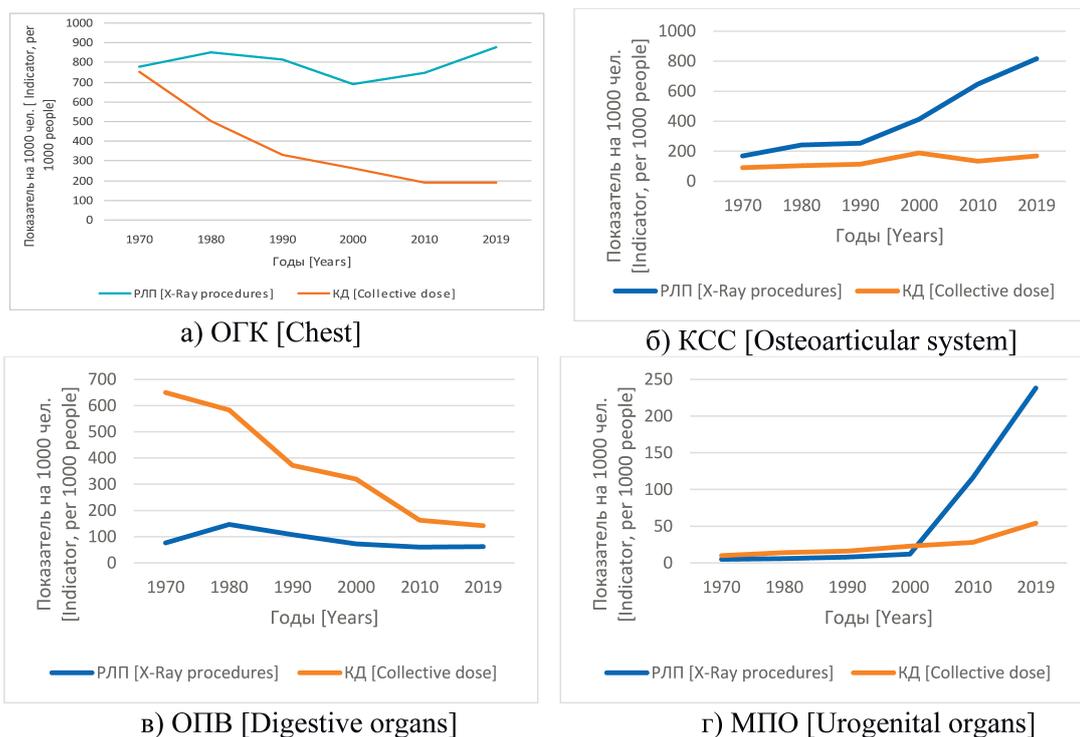
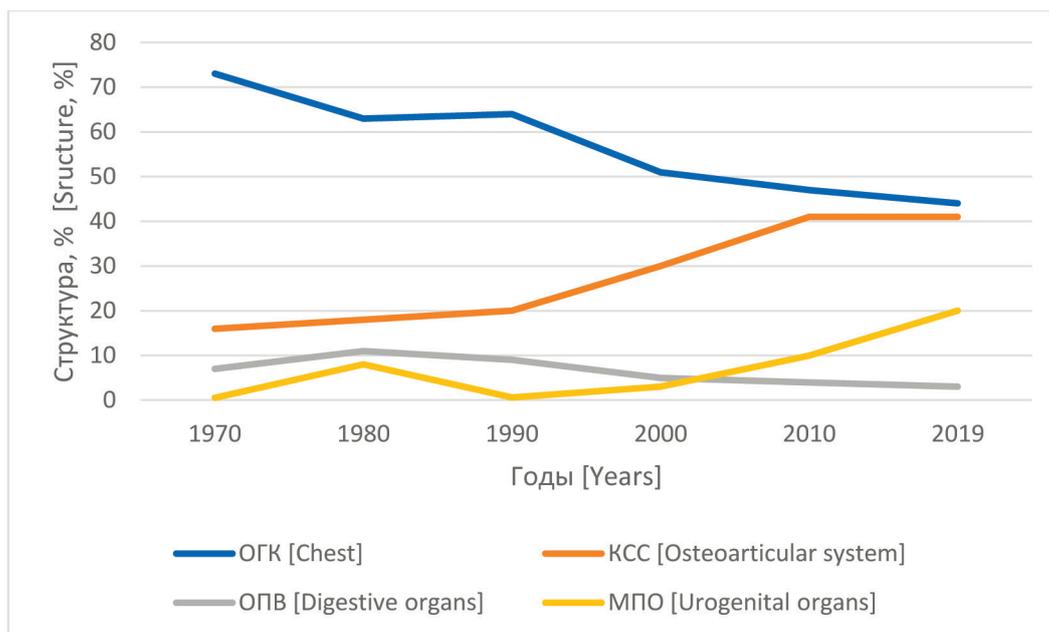
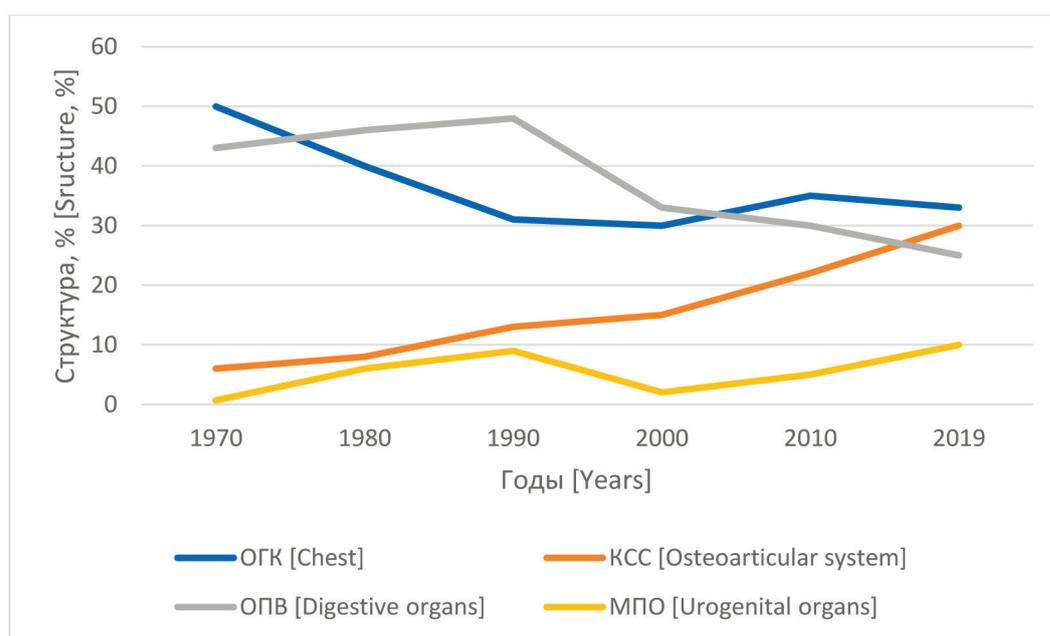


Рис. 3. Долгосрочная динамика числа РЛП и уровня МРО пациентов (чел. -мЗв) в рентгеновской диагностике в России при исследовании: (а) ОГК, (б) КСС, (в) ОПВ, (г) МПО
[Fig. 3. The long-term dynamics of the number of X-Ray examinations and the level of patient medical exposure (men-mSv) in X-ray diagnostics in Russia for: (a) chest, (b) osteoarticular system, (c) digestive organs, (d) urogenital organs]



а) РЛП [X-ray procedures]



б) ЭД [Effective doses]

Рис. 4. Динамика локализации РЛП (а) и ЭД (б) в лучевой диагностике в России
[Fig. 4. The dynamics of localization of X-Ray procedures (a) and effective doses (b) in X-Ray diagnostics in Russia]

В то же время в плане МРО ОГК следует отметить, что оно постоянно снижалось, а средние дозы от разных видов облучения ОГК (скопия, графия и т.д.) за процедуру (0,21 мЗв) и на человека (0,19 мЗв) являются невысокими, что свидетельствует в целом о благоприятном состоянии здесь условий РЗ. В последние годы наметилась тенденция увеличения МРО ОГК, в основном, за счет использования КТ.

Примерно такой же невысокий уровень МРО наблюдается и при исследовании КСС. Средняя процедурная доза здесь равняется 0,21 мЗв, а доза на человека – 0,17 мЗв (рис. 3б). Но число РЛП постоянно растет и особенно значимо в последние годы (с 1990 г. по 2019 г. – в 3,2 раза).

Такая же тенденция, но при меньшем числе РЛП (240‰), более значительном их росте (с 1990 по 2019 г.

в 30 раз) и еще более низком уровне МРО (доза на процедуру – 0,23 мЗв, доза на человека – 0,05 мЗв) наблюдается и при исследовании МПО (см. рис. 3г). Здесь основной вклад и в объем исследований, и в дозу облучения пациентов вносят РЛП МЖ, особенно в последнее время с внедрением скрининга рака МЖ.

Наиболее существенными являются дозы при исследовании ОПВ (см. рис. 3в). В настоящее время в среднем они составляют 2,3 мЗв за процедуру, при этом значительно снизившись за время наблюдения при практически неизменном незначительном объеме исследований.

Таким образом, суммируя общую картину наблюдаемых изменений, следует отметить, что из всех органов человека основной вклад в объем РЛП вносит обследование легких и ранее, и сейчас (см. рис. 4). Это вполне объяснимо, поскольку здесь к числу диагностических РЛП добавляется значительная часть профилактических исследований. Соответственно, максимальный вклад вносит и облучение легких (33% от суммарного). И если за 40 последних лет вклад РЛП ОГК снизился незначительно (на 20%), несмотря на некоторое повышение абсолютного числа РЛП, то снижение дозы в абсолютных числах было более существенным (в 4 раза).

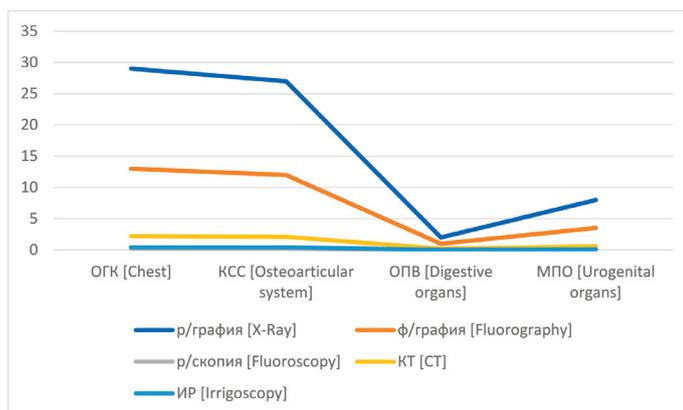
За последние 30 лет объем РЛП КСС увеличился в 4 раза и практически достиг уровня ОГК, в то время как вклад дозы облучения от нее увеличился в 2 раза и также почти сравнялся с уровнем ОГК. Объем исследований

ОПВ практически не изменился, а доза от них уменьшилась в 4,5 раза. В то же время количество МПО значительно (в 50 раз) возросло, в основном, в последние годы из-за внедрения скрининга рака МЖ, а доза от них увеличилась всего в 2 раза.

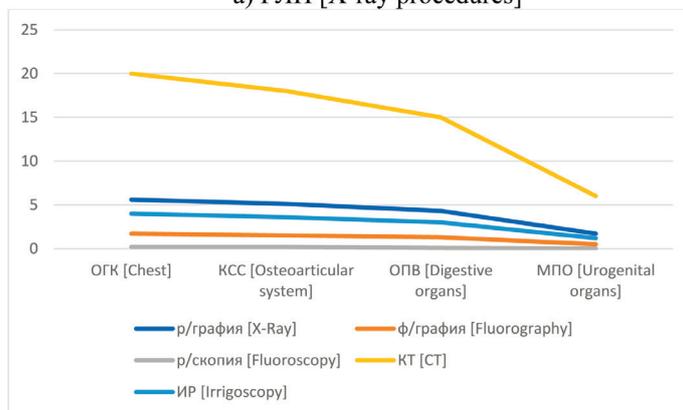
Таким образом, в 2 локализациях из 4 (КСС и МПО) существенно увеличилось число исследований при незначительном увеличении дозы облучения пациентов. В 2 других локализациях (ОГК и ОПВ) число исследований практически не изменилось, а дозы облучения в несколько раз снизились. То есть при разных локализациях исследований различным образом менялось МРО. Следовательно, с точки зрения радиационной гигиены необходимо отслеживать данные процессы, чтобы обеспечивать здесь требуемые условия РБ.

Для объективного видения динамики РЛП пациентов представляло интерес установить, какими рентгенологическими способами обследовались те или иные органы и ткани организма человека. Это дает возможность представить интегральную оценку использования рентгеновского излучения. На рисунке 5 приведены объемы и дозы облучения пациентов при различных видах исследования для всех основных локализаций облучения человека в настоящее время.

Показано, что большинство стандартных обследований пациентов проводятся при основных локализациях традиционными методами: рентгенографии (65%) и флю-



а) РЛП [X-ray procedures]



б) ЭД [Effective doses]

Рис. 5. Соотношение вида и локализации РЛП (а) и ЭД (б) в лучевой диагностике в России в 2019 г.
[Fig. 5. The ratio of the type and localization of X-Ray procedures (a) and effective doses (b) in X-Ray diagnostics in Russia in 2019]

орографии (29%), в общей сложности обуславливающих свыше 94% всех РЛИ. При этом максимальный вклад вносят исследования ОГК и КСС (всего 85%), где, помимо вышеуказанных методов исследований, в последнее время добавляется КТ.

Говоря об уровне МРО в настоящее время, необходимо отметить, что максимальный вклад в КД в рентгеновской диагностике составляют: КТ (60%), причем для всех локализаций, рентгенография (17%) и ИР (12%) (всего 87%). В основной своей части вклад дозы приходится на ОГК (33%), КСС (30%) и ОПВ (25%) (всего 87%).

Таким образом, в радиационно-гигиеническом плане, в первую очередь, заслуживают внимания именно вышеуказанные локализации при обследовании пациентов. На эти исследования должно быть направлено повышенное внимание в плане обоснованности исследований и оптимизации облучения.

В целом, давая интегральную оценку уровню МРО в отечественной лучевой диагностике на протяжении 50 лет, следует отметить, что здесь в разных ее областях

постоянно происходят количественные и качественные изменения как радиационно-гигиенических, так и медицинских показателей, что также требует пристального внимания.

Необходимо иметь в виду, что рентгеновская диагностика является частью лучевой диагностики, куда, помимо радиационных методов исследования, включающих также радионуклидную диагностику, входят неионизирующие методы, в том числе УЗИ, МРТ и др. При этом лучевая диагностика как никакая другая область здравоохранения, во-первых, имеет громадные масштабы использования, во-вторых, обладает значительным разнообразием и, в-третьих, постоянно расширяется (табл. 4).

Как видно из представленных данных, за последние 30 лет наблюдения объем лучевых методов исследования в России увеличился в 2 раза и достиг практически 3 процедур на каждого жителя: 2 рентгеновских и 1 УЗИ, а спектр исследований расширился с привлечением различных излучений, а также цифровых и компьютерных методов обработки данных.

Динамика развития основных визуальных методов исследования в лучевой диагностике в России*

Таблица 4

The dynamics of the development of the most common medical imaging methods in radiation diagnostics in Russia*

[Table 4]

Вид исследования [Medical imaging method]	Показатель [Indicator]	1990 г. [1990 y]	2000 г. [2000 y]	2010 г. [2010 y]	2018 г. [2018 y]
Рентгенологические исследования (РЛИ): [X-Ray examinations]	РЛИ,‰ [X-Ray examinations,‰]	832	884	1155	1326
в том числе [including]	Структура ¹ , % [Structure ¹ , %]	94,9	69,1	60,6	57,1
рентгенологические процедуры (РЛП) [X-Ray procedures]	РЛП,‰ [X-Ray procedures,‰]	1260	1360	1575	1870
компьютерная томография (КТ) [Computed tomography]	Структура, % [Structure, %]	96,6	77,5	67,7	65,1
	КТ,‰ [CT]	1,0	6,9	25,5	62,6
	Структура, % [Structure, %]	–	0,5	1,6	3,3
Радионуклидные исследования (РНИ) [Radionuclide examinations]	РНИ,‰ [Radionuclide examinations,‰]	15	11,8	3,6	5,7
в том числе позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) [including PET]	Структура, % [Structure, %]	1,7	0,9	0,2	0,002
	ПЭТ,‰ [PET,‰]	–	–	0,01	0,27
	Структура, % [Structure, %]	–	–	–	–
Все ионизирующие методы (РПИ, РРП) ² [All types of medical imaging methods]	РПИ,‰ [X-Ray examinations,‰]	847	896	1160	1330
	Структура, % [Structure, %]	96,6	70,1	60,9	57,3
	РРП,‰ [X-Ray procedures,‰]	1275	1372	1580	1873
	Структура, % [Structure, %]	97,7	78,2	70,0	65,3
Ультразвуковые исследования (УЗИ) [Ultrasound examinations (ultrasound)]	УЗИ,‰ [Ultrasound,‰]	30	380	740	980
	Структура, % [Structure, %]	2,3	29,7	38,8	42,2
Магнитно-резонансная томография (МРТ) [Magnetic resonance imaging (MRI)]	МРТ,‰ [MRI,‰]	–	2,5	6,4	18,0
	Структура, % [Structure, %]	–	0,2	0,003	0,01
Все неионизирующие методы [All non-ionizing methods]	Число на 1000 чел.,‰ [Number per 1000 people]	30	383	746	996
	Структура, % [Structure, %]	3,4	29,9	39,1	42,9

Вид исследования [Medical imaging method]	Показатель [Indicator]	1990 г. [1990 y]	2000 г. [2000 y]	2010 г. [2010 y]	2018 г. [2018 y]
Все исследования (ЛИ, ЛП) ³ [All examinations, (radiation examinations, radiation procedures)]	ЛИ, ‰ [Radiation examinations, ‰]	877	1280	1906	2322
	Структура, % [Structure, %]	100	100	100	100
	ЛП ³ , ‰ [Radiation procedures ³ , ‰]	1305	1754	2325	2870
	Структура, % [Structure, %]	100	100	100	100

*По данным стат.формы №30, ¹от всех исследований/процедур, ²рентгенорадиологические исследования (РПИ)/рентгенорадиологические процедуры (РПП), ³лучевые исследования(ЛИ)/лучевые процедуры(ЛП) [*according to the statistical form №30, ¹from all x-ray examinations/procedures, ²x-ray and radionuclide examinations/procedures, ³radiation diagnostics examinations/procedures]

При этом метод радионуклидной диагностики в виде радионуклидных исследований (РНИ) является незначительным и составляет менее 1% от всех исследований, в то время как объем УЗИ увеличился за время наблюдения в 30 раз и превысил 40% от всех исследований (рис. 6). То есть если в плане диагностического рентгеновского облучения мы имеем удвоение объема исследований, то в отношении всех ЛИ он практически утраивается.

Таким образом, можно констатировать, что по мере развития лучевой диагностики рентгеновские методы исследования не замещаются нерадиационными методами, как представлялось специалистами ранее [16], а добавляются к традиционно используемым РЛИ, вызывая дополнительную лучевую нагрузку на организм пациента.

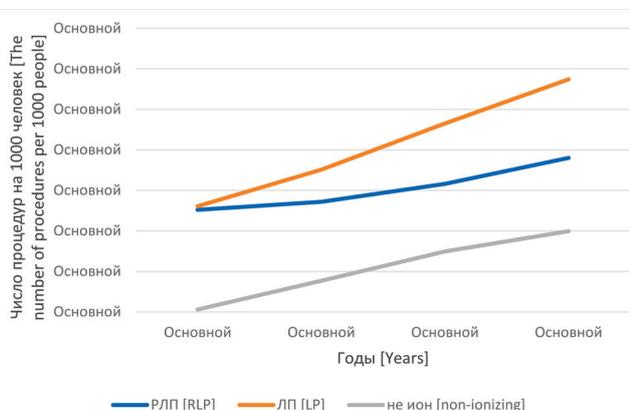


Рис. 6. Динамика ЛП, РЛП, а также других (не ионизирующих) методов исследования в лучевой диагностике в России.

[Fig. 6. The dynamics of radiation procedures, X-Ray procedures, as well as other (non-ionizing) methods in radiation diagnostics in Russia]

Заключение

На основании вышеизложенного следует, что за 50 лет Россия из наиболее облучаемой в плане диагностического МРО страны превратилась в страну с минимальным уровнем МРО. В радиационно-гигиеническом плане это является большим достижением и, соответственно, большой заслугой специалистов в области РЗ. Главной

причиной столь значительного снижения уровня МРО является, во-первых, совершенствование структуры РЛИ с переносом центра тяжести с наиболее дозообразующего вида исследования – рентгеноскопии на низкодозообразующую – рентгенографию и, во-вторых, оптимизация уровня облучения пациентов за счет модернизации рентгеновского оборудования с акцентом на использование цифровых технологий.

Вышеназванному обстоятельству способствовала авария на ЧАЭС: в результате чего были приняты разнообразные меры РЗ населения, в том числе в области МРО. До нее отечественная рентгеновская диагностика развивалась по экстенсивному пути, после – по интенсивному. В результате мы стали вполне благополучной в области МРО страной.

В настоящее время в условиях начавшегося повышения уровня МРО от использования специальных методов исследований, в основном, из-за КТ, одной из задач медицинской рентгенологии является нахождение баланса или оптимального уровня использования КТ, а Роспотребнадзора – в контроле МРО и поддержании соответствующего уровня радиационной безопасности при внедрении новых технологий.

На основании вышесказанного одной из первоочередных задач в области МРО персонала, пациентов и населения является организация всестороннего контроля соблюдения действующих норм и правил РБ, регламентированных разнообразными документами, в которых содержатся требования для реального снижения уровня МРО без потери необходимого количества и качества диагностической информации и соответствующего лечебного эффекта.

Исходя из этого, использование МРО, помимо регулирования основными принципами РЗ и созданными на их основе регламентирующими документами, должно контролироваться различными способами, среди которых необходимо выделить радиационный контроль (РК), а также мониторинг МРО, существующий в настоящее время в виде ЕСКИД и созданной на ее основе формы статистического наблюдения за МРО № 3-ДОЗ, для чего необходима ее модернизация.

РК включает в себя различные позиции, в том числе контроль доз облучения пациентов. В отсутствие нормирования диагностического облучения пациентов он

должен стать основой соблюдения здесь необходимых условий РБ. С другой стороны, при реальном отсутствии стандартизации методов РЛИ проводимый в рамках производственного контроля анализ состояния рентгеновской аппаратуры в виде контроля эксплуатационных параметров позволяет, во-первых, осуществлять контроль качества (КК) используемого оборудования и, во-вторых, вырабатывать оптимальные режимы проведения РЛИ и тем самым устанавливать РДУ облучения пациентов. Такой путь представляется наиболее эффективным в плане оптимизации медицинского диагностического облучения.

Таким образом, с учетом вышесказанного, можно констатировать, что в настоящее время в системе охраны здоровья населения в условиях процессов глобализации, вызванных демократическими, демографическими, социальными и другими изменениями, необходимо совершенствовать систему РБ в медицине на основе принципов РЗ, принятых мировым сообществом и основанных на гарантии обеспечения качества. Данный аспект подразумевает контроль всех основных составляющих радиационного процесса в медицине, начиная с оборудования и персонала и кончая безопасностью пациентов. Сказанное тем более актуально, поскольку вклад МРО в общее облучение населения от ИИИ является существенным и постоянно растет [2].

В современных условиях уровень МРО в России, в целом, и в административных территориях, в частности, должен тщательнейшим образом контролироваться при одновременном развитии и совершенствовании современных методов диагностики. В этом должна состоять генеральная линия отечественной лучевой диагностики и радиационной гигиены на ближайшие годы.

Литература

- Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 г. Информационный сборник. СПб., 2020. 70 с.
- UNSCEAR UN. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, Annex A. – New York, UN, 2010.
- МКРЗ. Рекомендации 2007г. Международной комиссии по радиационной защите. Публикация № 103 МКРЗ. Пер. с англ. / Под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
- Радиационно-гигиеническая оценка лучевых воздействий при рентгенодиагностических исследованиях. Редколлегия: П.В. Рамзаев, Ю.К. Кудрицкий, А.Н. Кронгауз, и др. / Материалы симпозиума. Л., 1972. 77 с.
- Акулов К.И., Лев М.Я., Кудрицкий Ю.К., и др. Радиационная безопасность пациентов и населения РСФСР при рентгенологических исследованиях. Справочно-информационные материалы. Л., 1979. 94 с.
- Никитин В.В., Ермаков И.А., Жербин Е.А., и др. Оценка популяционных доз от рентгенодиагностических процедур в СССР (1970-1980 гг.). М.: ЦНИИАтоминформ, 1986. 25 с.
- Никитин В.В. Радиационно-гигиеническая оценка рентгенодиагностических процедур. Автор. дис. докт. биол. наук. Л.: ЛСГМИ, 1990. 28 с.
- Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. Т.1. Лучевая диагностика. Авторы: Под ред. М.И. Балонина. СПб.: НИИРГ, 2019. 320 с.
- Голиков В.Я., Коренков И.П. Радиационная защита при использовании ионизирующего излучения. Под ред. проф. Ф.Г. Кроткова. М.: Медицина. 1975. 257 с.
- Ставицкий Р.В., Вактурина В.П. Основы радиационной защиты в рентгенологической практике. М.: Медицина. 1969. 108 с.
- Иванов С.И., Базюкин А.Б., Кальницкий С.А. и др. Медицинское облучение населения России. 1980-97 гг. Справочник. М., 2000. 527 с.
- Ставицкий Р.В., Ермаков И.А., Лебедев Л.А., и др. Эквивалентные дозы в органах и тканях человека при рентгенологических исследованиях: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
- Лебедев Л.А. Теоретические и практические основы радиационной безопасности при рентгенологических исследованиях. Автореф. дис. докт. техн. наук. М., 2001. 34 с.
- Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988 Report to the General Assembly. UN. New York, 1988. 647 p.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR UN. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly. UN. New York, 1993.
- Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Vol. I. UN. New York, 2000. 654 p.

Поступила: 26.07.2021

Кальницкий Сергей Анатольевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: s.kalnitsky@niirg.ru

Целиков Николай Васильевич – кандидат медицинских наук, руководитель лаборатории радиационного контроля Ленинградской областной клинической больницы, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Кальницкий С.А., Целиков Н.В. Анализ медицинского облучения пациентов в рентгеновской диагностике России за пол века наблюдения (1970-2019гг) // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 60-75. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-60-75

Analysis of patient medical exposure in X-ray diagnostics in Russia for half a century (1970–2019)

Sergey A. Kalnitsky¹, Nikolay V. Tselikov²

¹ 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

² Leningrad regional clinical hospital, Saint-Petersburg, Russia

During last 50 years, firstly in the RSFSR in the USSR (1970-80), then in the Russian Federation - RF (1990-2019), the authors studied the radiation safety issues of patients from medical exposure. The reader is offered a complex radiation-hygienic analysis of the 50-year medical exposure of patients and of the population in Russia to inform and analyze the available data on the most common type of use of ionizing radiation sources in the national economy. For a half century, several generations of people have changed and medical diagnostic X-ray equipment and technologies have also radically changed. The information from this article was obtained on the basis of radiation-hygienic statistics, as well as considered our research. The data is presented at the federal level in the form of the volume of research carried out - determined by the number of X-ray procedures, as well as the level of medical exposure in the form of effective dose of patients in Russia - a huge region with a population of about 150 million people, where about 200 million X-Ray procedures were performed annually, i.e. about 10 billion X-Ray procedures for the entire observation period. During the study, a collective effective dose was - 6.5 million person-Sv at the rate of 100 thousand person-Sv and more per year. The paper presents the dynamics and the structure of the studied indicators depending on the type of medical exposure, as well as its localization. The contribution of the X-ray diagnostics to the total volume of radiation diagnostics, which is developing dynamically, is presented. It was found that throughout the study, there were two oppositely directed processes: an increase in the number of X-Ray procedures and a decrease in the effective doses of patients. At present, the minimum dose has been reached, after that it has been increasing began, associated with the use of new computer technologies. It was determined that, depending on the localization, the main radiation load during X-ray procedures falls on the skeleton and digestive organs. It is shown that during the study period (in 1986) there was an accident at the Chernobyl, which significantly affected on medical activities and, in particular, X-ray diagnostic indicators. The paper shows the consequences of these situations. In general, the data presented is huge in volume and significant in information content. The information obtained on the basis of such a unique data is representative and allows, firstly, to analytically study the issues of radiation protection of patients and, secondly, to plan the strategy and tactics of its development.

Key words: X-ray diagnostics, patients, X-ray procedure, medical exposure, effective dose, radiation protection.

References

1. Barkovsky AN, Akhmatdinov Ruslan R, Akhmatdinov Rustam R, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses of radiation exposure to the population of the Russian Federation in 2019. Information collection. Saint-Petersburg; 2020. 70 p.
2. UNSCEAR UN. Sources and Effects of Ionising Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I, Annex A. – New York, UN, 2010.
3. ICRP. Recommendations International Commission on Radiation Protection 2007. Publication ICRP No. 103. Transl. from English / Ed. M.F. Kiselev and N.K. Shandala. Moscow: Ed. LLC PKF «Alana»; 2009. 312 p.
4. Ramzaev PV, Kudritsky YuK, Krongauz AN, Milman NYa, Kuznetsov AI. Radiation-hygienic assessment of radiation exposure during X-ray diagnostic examinations. Materials of the symposium. Leningrad; 1972. 77 p.
5. Akulov KI, Lev MYa, Kudritsky YuK, Serebryannikov VD. Radiation safety of patients and the population of the RSFSR during X-ray examinations. Reference and information materials. Leningrad; 1979. 94 p.
6. Nikitin VV, Ermakov IA, Zherbin EA, Ivanov EV, Komarov EI, Masarsky LI et al. Estimation of population doses from X-ray diagnostic procedures in the USSR (1970-1980). Moscow: TsNIIatominform; 1986. 25 p.
7. Nikitin VV. Radiation-hygienic assessment of X-ray diagnostic procedures. Leningrad: LSGMI; 1990. 28 p.
8. Balonov MI, Golikov VYu, Vodovatov AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Kalnitsky SA et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. vol. 1. Radiation diagnostics. Ed. M.I. Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG; 2019. 320 p.
9. Golikov VYu, Korenkov IP. Radiation protection when using ionizing radiation. Ed. by Prof. F.G. Krotkov. Moscow: Medicine; 1975. 257 p.
10. Stavitsky RV, Vakturina VP. Fundamentals of radiation protection in X-ray practice. Moscow: Medicine; 1969. 108 p.
11. Ivanov SI, Yakubovskiy-Lipskiy YuO, Bazyukin AB, Kalnitsky SA, Ivanov EI Vlasova MM. Medical exposure of the Russian population. 1980-97. Guide. Moscow; 2000. 527 p.
12. Stavitsky RV, Ermakov IA, Lebedev LA, Masarsky LI, Nikitin VV, Postnikov VA, et al. Equivalent doses in human organs

Sergey A. Kalnitsky

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: s.kalnitsky@niirg.ru

- and tissues during X-ray examinations: Handbook. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 176 p.
13. Lebedev LA. Theoretical and practical foundations of radiation safety in X-ray examinations. Abstract of a thesis in engineering sciences. Moscow; 2001. 34 p.
 14. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988 Report to the General Assembly. UN. New York; 1988. 647 p.
 15. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR UN. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly. UN. New York; 1993.
 16. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Vol. I. UN. New York; 2000. 654 p.

Received: July 26, 2021

For correspondence: Sergey A. Kalnitsky – PhD, Leading 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 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: s.kalnitsky@niirg.ru)

Nikolay V. Tselikov – PhD, the Head of the Laboratory of Radiation Control, Leningrad Regional Clinical Hospital, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Kalnitsky S.A., Tselikov N.V. Analysis of patient medical exposure in X-ray diagnostics in Russia for half a century (1970-2019). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 60-75. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-60-75

Особенности применения средств радиационной защиты для персонала рентгенохирургических операционных

С.С. Сарычева

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

Обзорная работа посвящена вопросу радиационной защиты персонала рентгенохирургических операционных. Для безопасной работы персоналу необходимо регулярно и правильно использовать средства защиты, что, в свою очередь, должно обеспечиваться их доступностью, удобством и маневренностью при выполнении процедур. Стремительное развитие рентген-хирургических методов диагностики и лечения привело к тому, что персонал рентген-операционных имеет один из самых высоких уровней профессионального облучения, однако отечественная система обеспечения радиационной безопасности не успевает за столь бурным развитием данного направления медицины. В статье показаны основные закономерности распределения рассеянного излучения вокруг пациента в процессе проведения исследований и связанного с ним профессионального облучения. Показано распределение излучения при разных режимах работы ангиографического аппарата типа С-дуга и даны наглядные примеры распределения рассеянного излучения в рентген-операционных. Подробно рассмотрены коллективные и индивидуальные средства защиты, разработанные специально для радиационной защиты персонала рентген-операционных. Представлены обобщенные данные по степени защиты и особенностям использования наиболее перспективных средств защиты персонала. Большинство из рассмотренных средств защиты являются обязательными для использования в рентген-операционных ряда европейских стран, однако в отечественных нормативных документах пока не упомянуты. В работе внесены предложения по модернизации отечественной системы радиационной защиты персонала рентген-операционных, включая защиту хрусталика глаза, в части обеспечения рентген-операционной актуальными средствами радиационной защиты, согласно накопленному мировому опыту в данной области и опубликованным международным рекомендациям.

Ключевые слова: интервенционная радиология, радиационная защита персонала, средства радиационной защиты.

Введение

Интервенционная радиология (ИР) – одно из наиболее дозообразующих направлений в современной медицине, с одним из самых высоких рисков профессионального облучения [1, 2]. Данная специальность характеризуется постоянным развитием технологий и методик: появляются новые исследования, новые направления. Несмотря на развитие технологий, которые приводят к появлению более низкодозного оборудования, сами вмешательства, проводимые под рентгеновским контролем, становятся все более сложными и продолжительными. Общее количество выполняемых интервенционных рентгенологических исследований (ИРЛИ), их разновидности и сложность отдельно взятых процедур постоянно растут [3]. Пропорционально растут и нагрузки на персонал, выполняющий данный вид вмешательств [1].

Целью радиационной защиты персонала является недопущение детерминированных эффектов, поддержание риска стохастических эффектов на приемлемом уровне

и оптимизация защиты [4]. Согласно обзору эпидемиологических данных, представленных в отчете о тканевых реакциях МКРЗ [5], порог помутнения хрусталика может составлять всего 0,5 Гр для пролонгированного облучения (действующий годовой предел эквивалентной дозы на хрусталик в 150 мЗв установлен, исходя из 5 Гр). Не до конца исключена возможность стохастической природы данного процесса (ряд исследований демонстрируют, что зависимость доза – эффект для возникновения катаракты не характерна для детерминированных эффектов, поскольку не наблюдается сильного возрастания количества катаракт с увеличением дозы облучения) [6, 7]. В связи с вышеизложенным в радиационной защите персонала рентген-операционных первостепенное место стоит отводить не столько дозиметрии, сколько организации защиты – все дозы (и эффективная, и эквивалентные/поглощенные) не должны превышать соответствующие пределы дозы и должны поддерживаться на разумно достижимом низком уровне.

Сарычева Светлана Сергеевна

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: svetlana2003@mail.ru

В настоящий момент времени требования к средствам защиты персонала рентген-операционных не успевают за стремительным развитием процедур интервенционной радиологии. Для безопасной работы персоналу необходимо регулярно и правильно использовать средства защиты, что, в свою очередь, должно обеспечиваться их доступностью, удобством и маневренностью при выполнении процедур. Одним из основных физических способов защиты от ионизирующего излучения является экранирование. Например, подвесные рентгенозащитные экраны и подстольные экранирующие ширмы являются обязательными для рентгенооперационных в большинстве европейских стран, однако в наших нормативных документах пока даже не упомянуты.

В данной работе внесены предложения по модернизации отечественной системы радиационной защиты персонала рентген-операционных, включая защиту хрусталика глаза, в части обеспечения рентгенохирургических отделений актуальными средствами радиационной защиты, согласно накопленному мировому опыту в данной области, опубликованным литературным статьям и международным рекомендациям.

Распределение излучения в рентген-операционной и особенности формирования облучения персонала

В рентген-операционной в момент работы рентгеновской трубки облучению подвергается не только пациент, на которого направлен первичный пучок излучения, но и находящийся рядом с ним медицинский персонал, для которого основным источником излучения является уже не первичный пучок, а рассеянное излучение от пациента (исключая нежелательные ситуации попадания частей тела персонала в прямой пучок излучения).

В современных ангиографических системах доля излучения, необходимая для формирования изображения (а именно количество фотонов, достигающих приемника изображения без взаимодействий), составляет 1–5% от первоначального значения, в зависимости от чувствительности детектора [8]. Все остальные частицы испытывают взаимодействие в теле пациента и либо поглощаются (сразу или после нескольких актов рассеяния, в зависимости от первоначальной энергии частицы), либо «вылетят» из него в разные стороны в результате рассеяния. Схематично распределение излучения относительно тела пациента изображено на рисунке 1.



Рис. 1. Распределение излучения относительно пациента (адаптировано Hirshfeld [9])

[Fig. 1. Dose distribution around the patient [adapted from Hirshfeld [9]]

Наибольшее количество рассеянного излучения образуется со стороны входа первичного пучка излучения в тело пациента (кушетка ангиографической системы сделана из рентгенопрозрачного материала), это так называемое обратное рассеяние. Рассеяние со стороны выхода луча из пациента менее интенсивно, чем обратное рассеяние со стороны входа луча, поскольку тело пациента поглощает от 80% до 99% от первичного исходящего излучения (в зависимости от характеристик излучения, угла трубки и размера пациента) [8].

Для части интервенционных исследований, например, процедур интервенционной кардиологии, характерно использование разных наклонов трубки (краниально-каудальные, влево-право). В течение последних десятилетий разными авторами было выполнено большое количество измерений для оценки распределения рассеянного излучения в операционной и зависимости от используемых проекций – положений рентгеновской трубки [10–13]. На рисунке 2 продемонстрированы результаты одного из наиболее часто цитируемых исследований по изменению мощности дозы рассеянного излучения в зависимости от положения трубки и режимов работы аппарата [10]. Наибольшие уровни излучения (измерения мощности эквивалентной дозы излучения проводились на левом плече ангиохирурга без экранирования) демонстрирует левая краниальная проекция, когда обратное рассеянное излучение оказывается направленным в сторону оперирующего врача.

Также видна зависимость мощности дозы от режима работы рентгеновской трубки: режимы низкой и средней мощности рентгеноскопии, режим рентгеноскопии высокой мощности и режим снимков. Чем выше требуемое качество изображения (оно задается в терминах мощности дозы – количества фотонов, достигающих приемника изображения), тем выше исходящая мощность дозы аппарата и тем выше соответствующая мощность дозы рассеянного излучения.

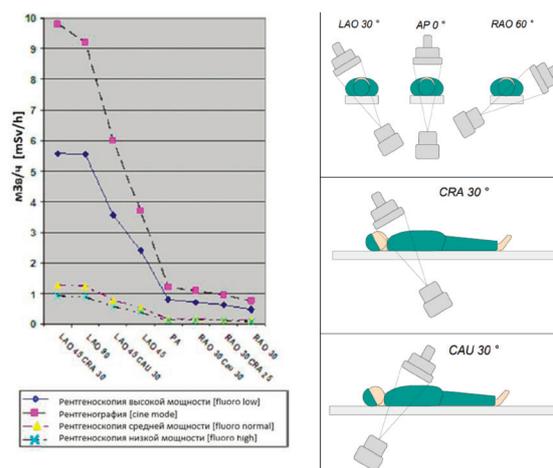


Рис. 2. Зависимость мощности эквивалентной дозы излучения (Hr(10)) на левом плече ангиохирурга (без защиты) от положения/наклона трубки и режима работы ангиографического аппарата [10] и схематичное изображение углов наклона трубки относительно пациента

[Fig 2. Dose rate equivalent (Hr (10)) on the surgeons left arm (without protection) depends on the C-arm position and the operation mode [10] and schematic representation of the C-arm angulation]

Пример распределения рассеянного излучения в рентген-операционной при боковом расположении рентгеновской трубки представлен на рисунке 3. Как видно из рисунка 3, наиболее опасным для персонала (с точки зрения мощности дозы рассеянного излучения) оказывается место входа первичного пучка излучения в тело пациента [13]. Для наглядности пациента можно сравнить с «живым щитом», который поглощает в себе большую часть радиации, однако часть радиации распространяется от него в разные стороны. Подобные карты изодоз содержатся в эксплуатационных документах на каждый ангиографический аппарат.

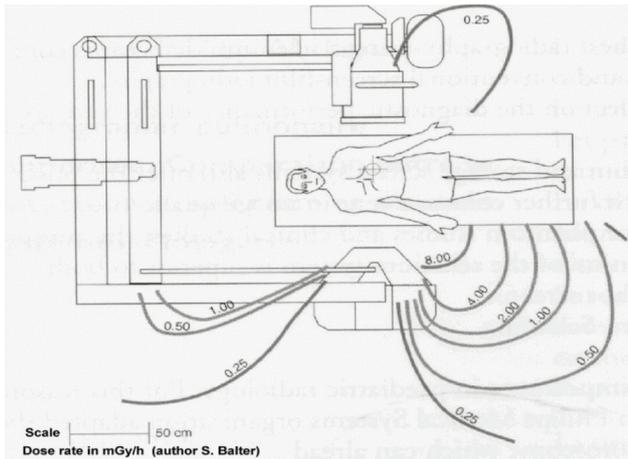


Рис. 3. Изодозы рассеянного излучения в рентген-операционной [13]

[Fig 3. Isodoses of scattered radiation in X-ray operating room [13]]

На рисунке 4 схематично изображено распределение изодоз в вертикальной плоскости при нижнем расположении рентгеновской трубки [14].

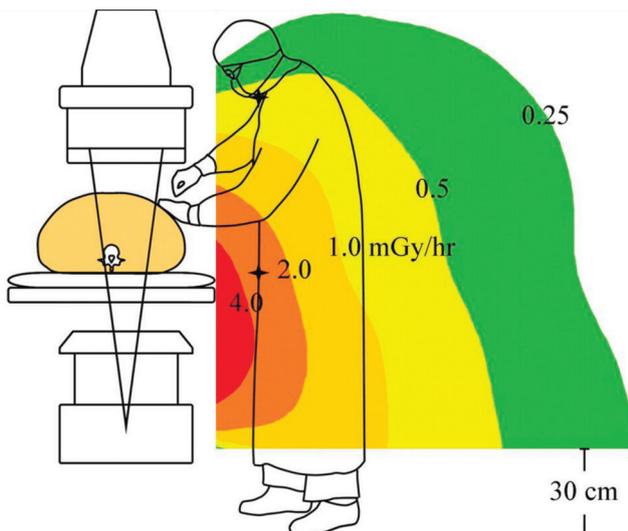


Рис. 4. Иллюстрация распределения изодоз при нижнем расположении рентгеновской трубки (без учета средств защиты) [14]

[Fig. 4. Isodose distribution for the under-coach X-ray tube (excluding protective equipment) [14]]

Коллективные средства защиты

Согласно данным статистической формы № 30 за 2018 г. [4], современный парк ангиографических аппаратов представлен преимущественно моноплановыми аппаратами типа С-дуга с нижним расположением рентгеновской трубки (под столом). Исходя из существующей геометрии распределения излучения, для наглядности представленной на рисунках 3 и 4, основную долю рассеянного излучения (обратное рассеяние) можно нивелировать путем экранирования подстольного пространства. Для этой цели успешно используются рентгенозащитные шторы стола, закрывающие подстольное пространство как для оперирующего хирурга, так и для его ассистента (часть операций проводится несколькими членами бригады) до уровня пола. Желательным является наличие боковой ширмы-стойки, экранирующей тело пациента, лежащего на столе. Закрывая бок пациента, они делают геометрию рассеянного излучения более благоприятной для персонала [1]. Согласно исследованиям уровней рассеянного излучения, дополнительное использование боковых ширм может привести к значительному (более 80%) снижению воздействия рассеянного излучения на оператора, особенно на нижнюю часть тела [15]. Согласно нашим собственным наблюдениям, в рамках группового дозиметрического контроля было также отмечено, что часть используемых подстольных ширм спроектирована для защиты лишь одного оперирующего врача и имеет недостаточную ширину для адекватной защиты второго рентгенохирурга. В литературных данных также встречается информация, что некоторые из используемых ширм могут оказаться слишком малы для защиты обоих членов бригады [1, 16].

Боковая защита и защитные занавески под столом оказывают существенный вклад в радиационную защиту нижней части тела персонала, однако демонстрируют лишь минимальный защитный эффект для глаз врача [16, 17]. Для защиты верхней части тела персонала рекомендованы подвесные рентгенозащитные экраны. Как правило, они имеют прямоугольную форму и полукруглую выемку на нижнем крае, чтобы иметь возможность располагаться вплотную к телу пациента. Согласно международным исследованиям, они являются наилучшим методом защиты и могут уменьшить рассеивание излучения на голову, шею и хрусталик глаза на 50–90%, в зависимости от своего расположения в момент проведения исследования [1, 16]. Экраны бывают разной толщины, рекомендуемый минимум для рентген-операционных составляет 0,5 мм свинцового эквивалента.

Уровень защиты, обеспечиваемый подвесным экраном, зависит от того, насколько эффективно он установлен и правильно ли используется. Его следует располагать между участком тела пациента, подвергающегося прямому облучению, и лицом оператора или другого персонала, находящегося поблизости [1, 18]. Экран следует размещать прямо над пациентом, чтобы оператор мог видеть облучаемую область тела пациента через экран. В связи с этим очень важно, чтобы в процессе эксплуатации (и регулярной антисептической обработки) особое внимание уделялось сохранению прозрачности экрана,

т.к. «затёртости» стекла не позволят использовать его по прямому назначению. Для защиты рук хирурга к нижнему краю прозрачного свинцового экрана рекомендуется крепить дополнительные свинцовые драпировки [1].

Эффективное использование экранов требует их перемещения по мере необходимости. И хотя трудности в их использовании могут ограничивать их применимость в повседневной практике, они все равно демонстрируют хороший уровень защиты [1, 18]. Исследования с фантомами показывают, что степень защиты подобных экранов, усредненная по всем используемым проекциям (отношение дозовых показателей, измеренных без использования средств защиты к этим же величинам, но с использованием защитного экрана) может варьировать от 4 до 33, имея сильную зависимость от правильности позиционирования [19–23]. Для обеспечения максимально эффективной защиты врач должен постоянно отслеживать и корректировать положение экрана, что происходит далеко не всегда [18]. Реалистичные оценки степени защиты от использования экранов в клинической практике (на основании реальных, а не смоделированных условий использования) при усреднении по всем используемым проекциям составляют от 2 до 7 [16, 24–27]. Графически литературные данные по степени защиты подвесных рентгенозащитных экранов представлены на рисунке 5.



Рис. 5. Степень защиты подвесных рентгенозащитных экранов. Литературные данные по фантомным [19–23] и клиническим измерениям [16, 24–27]

[Fig. 5. Dose reduction factor from X-ray protection suspended screens. Literature data on phantom studies [19–23] and clinical measurements [16, 24–27]]

Согласно международным рекомендациям, при работе в режиме серийной рентгено съемки, соответствующей самой высокой мощности дозы рентгеновского аппарата, персоналу рекомендуется выходить за пределы операционной [1]. Однако ввиду того, что это не всегда возможно или хирург по каким-либо причинам не хочет тратить время на подобные манипуляции, можно организовать «защищенное место» с помощью мобильной ширмы. В случае если рентгенохирург при серийной рентгено съемке не выходит за пределы операционной (что желательно), компромиссным вариантом будет отходить на момент съемки за большую мобильную ширму, специально установленную для этих целей рядом с операционным столом.

Индивидуальные средства защиты

Во время проведения интервенционных рентгеновских процедур весь персонал, находящийся в операционной, должен быть одет в специальную рентгенозащитную одежду – средства индивидуальной защиты (СИЗ). Как правило, свинцовый эквивалент СИЗ составляет от 0,25 мм до 0,5 мм Pb. Свинцовая защита 0,25 мм поглощает 97–98% излучения при энергии 60 кВ и 85–92% при 100 кВ; свинцовая защита 0,5 мм поглощает 99% излучения при напряжении 60 кВ и 93–97% при 100 кВ [28]. Вес является основным ограничивающим фактором, из-за чего более толстые свинцовые эквиваленты для СИЗ не используют. Проблема длительного нахождения в положении стоя в тяжелой защите для персонала рентгенооперационных стоит очень остро [29–31]. Есть ряд сообщений о травмах спины из-за веса свинцовых фартуков у лиц, которые носят их в течение многих лет [32, 33].

Рентгенозащитный костюм должен обеспечивать адекватную защиту от излучения и удовлетворять требованиям эргономики. Он должен состоять из хорошо спроектированного свинцового фартука, который распределяет вес по плечам и бедрам человека, или (что часто встречается в международных рекомендациях) комплекта юбка плюс жилет [1, 2, 34]. Также для снижения нагрузки на позвоночник существуют специальные поддерживающие пояса и различные системы распределения веса через ляжки и наплечники [32]. Часть научных работ показывают, что подгонка защитного фартука по фигуре может оказываться даже важнее, чем его свинцовый эквивалент [1, 35]. Негабаритные фартуки с глубоким вырезом и большими прорезыями под мышками обеспечивают плохую защиту, поскольку уязвимыми остаются внутренние рентгеночувствительные органы, такие как легкие и пищевод [36], а также молочные железы у персонала женского пола. Подмышечная впадина с ближайшей к источнику излучения стороны часто требует дополнительной защиты; слишком короткие фартуки, обнажающие верхнюю часть ног и бедра, могут оставить без защиты значительную часть красного костного мозга [1].

Свинец, безусловно, эффективен для защиты от радиации, но он тяжелый. Помимо традиционных свинцовых фартуков, на рынок постепенно выходят так называемые «легкие фартуки», изготовленные из металлических компонентов, не содержащих свинца. Они обещают обеспечить эквивалентную защиту при значительно меньшей нагрузке на опорно-двигательный аппарат, и их удобнее носить в течение длительных периодов времени. Однако данная защита иначе зависит от энергетического спектра фотонов, и характеристика в терминах свинцового эквивалента в данном случае малоинформативна. Более того, она может вводить в опасное заблуждение, о чем также имеется несколько работ [37–40]. Согласно 139 публикации МКРЗ, «пользователи и пациенты, которые используют бессвинцовую одежду для защиты от рентгеновских лучей, могут по незнанию подвергнуться воздействию большей дозы, чем принято считать». Для однозначной идентификации бессвинцового фартука настоятельно рекомендуется указывать характеристики защиты для всего спектра излучения от 50 до 120 кВ ввиду их неоднородности [1, 40].

Фартуки защищают туловище от рассеянного излучения, но шею, голову, руки и ноги они не защищают. Во избежание облучения сбоку через проемы фартука рекомендуется выбирать защиту с рукавами или использовать дополнительные плечевые накладки [1]. Дополнительно к фартуку обязательными для использования в рентген-операционной являются рентгенозащитные воротники, необходимые для защиты области шеи и щитовидной железы. Моделирование методом Монте-Карло [41] показало, что воротник с защитой 0,5 мм свинца позволяет уменьшить дозу на щитовидную железу в 12 раз, а воротник, содержащий 0,35 мм свинца, – в 7 раз. Однако в реальной жизни воротники не носят так плотно, как в условиях эксперимента, оставляя небольшие зазоры из соображений комфорта – возможно, поэтому практические эксперименты показали существенно меньшие результаты по степени защиты щитовидной железы у персонала – от 5 до 6 раз [42]. Согласно 139 публикации МКРЗ, общее снижение эквивалентной дозы на щитовидную железу в клинической практике, связанное с ношением защитного воротника, составляет от 5 до 10 раз [1].

Для персонала рентген-операционных важно учитывать возможное облучение и других радиочувствительных органов, защита которых представляет собой более трудную задачу. Ткани, которые могут подвергаться воздействию относительно высоких доз излучения, – это голова, особенно хрусталик глаза, верхние и нижние конечности. Для целей радиационной защиты эти органы даже имеют собственные пределы эквивалентных доз облучения в дополнение к пределу эффективной дозы. Ограничения по величине эквивалентной дозы считаются необходимыми для предотвращения детерминированных эффектов. На сегодняшний момент, согласно российским нормативным документам¹, данные пределы составляют 150 мЗв в год на хрусталик и 500 мЗв на кожу.

Для защиты хрусталика в связи с его возможно более высокой радиочувствительностью рекомендуется (в дополнение к подвесному рентгенозащитному экрану) использование таких СИЗ, как очки с плотным прилеганием или рентгенозащитные маски. Линзы с эквивалентом 0,5 мм свинца ослабляют 97% излучения [29], однако это не является показателем эффективности очков с подобными защитными линзами [32]. Эффект защитных очков зависит от дизайна очков, характера клинической процедуры и рабочих привычек пользователя. Ряд работ показывают, что даже правильно спроектированные и хорошо подогнанные по размеру очки со свинцовыми стеклами ослабляют рассеянное излучение всего в 2–7 раз [16, 29, 43, 44]. Рекомендуемый форм-фактор – очки с боковой защитой и плотным прилеганием по контуру лица владельца, особенно на нижней стороне. Еще более полную защиту глаз могут обеспечить рентгенозащитные маски или козырьки из просвинцованного стекла, т.к. закрывают все лицо, защищая не только глаза, но и близлежащие ткани, которые вносят существенный вклад в дозу облучения хрусталика за счет внутреннего рассеяния излучения [18]. Несмотря на, как правило, меньшую эквивалент-

ность свинца, маски признаются хорошей альтернативой защитным очкам [1].

Для защиты кожи рук рентгенохирургов существуют специальные хирургические стерильные рентгенозащитные перчатки. Считается, что при проведении интервенционных исследований нет необходимости помещать руки в прямой пучок в ходе работы [29, 45], поэтому использование подобных перчаток, разработанных с целью защиты от рассеянного излучения, может уменьшить уровни облучения пальцев рук оперирующего рентгенохирурга. Однако в последнее время различные ведомства (ICRP, NCRP) склоняются в сторону отказа от использования подобных перчаток. Показано, что их использование, наоборот, может приводить к более высокой дозе облучения рук [2], создавая иллюзию безопасности и значительно увеличивая исходящую мощность дозы при попадании в прямой пучок [46].

Заключение и рекомендации

Оптимальная радиационная защита персонала должна включать сочетание различных средств и методов защиты. Практическое использование средств радиационной защиты демонстрирует, что именно комбинация различных типов экранирования вместе (подстольные и боковые ширмы, подвесные рентгенозащитные экраны, фартуки, очки/маски и пр.) приводит к значительному снижению дозы на оператора [37, 40, 47].

На данный момент времени в отечественных нормативных документах не предусмотрено использование большинства из рассмотренных в данной работе средств защиты, в связи с чем настоятельно рекомендуется добавить наиболее важные из них в обязательный перечень средств радиационной защиты для рентгенохирургических отделений, а именно:

Передвижные средства защиты (с минимальным значением свинцового эквивалента в 0,5 мм):

- подвесная рентгенозащитная драпировка стола (ширма, крепящаяся к столу и спадающая вниз) – для защиты нижней части тела персонала рентгенооперационных (при расположении рентгеновской трубки под процедурным столом);

- боковая рентгенозащитная ширма стола (ширма-стойка, крепящаяся к столу);

- прозрачный подвесной рентгенозащитный экран с дополнительными просвинцованными ламелями снизу для защиты рук.

Индивидуальные средства защиты, относящиеся к одежде, подразделяют на легкие и тяжелые; для легких минимальное значение свинцового эквивалента составляет 0,25 мм, для тяжелых – 0,35 мм:

- халат рентгенозащитный (с запахом и без) – предназначен для защиты тела спереди и сзади от шеи до голени (на 10 см ниже колени), обеспечивает защиту подмышечной впадины;

- рентгенозащитный нарукавник / плечевая защита – предназначен для дополнительной защиты плеча и проемы рентгенохирурга (комбинируется с фартуком/жилетом);

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523-09) [Radiation safety standards (RSS 99/2009): (Sanitary regulations 2.6.1.2523-09) (In Russ.)]

– жилет рентгенозащитный (с запахом и без) – предназначен для защиты спереди и сзади органов грудной клетки от плеч до поясицы;

– юбка длинная рентгенозащитная (с запахом и без) – предназначена для защиты тела от талии до голеней (не выше колена);

– очки рентгенозащитные, плотно прилегающие с боковой защитой – предназначены для защиты глаз (мин. эквив. Pb – 0,25 мм);

– маска рентгенозащитная – предназначена для защиты глаз и передней части лица (мин. эквив. Pb – 0,1 мм).

Также рекомендуется учесть в требованиях для средств радиационной защиты следующие моменты:

1. Если персонал должен проводить в защите большую часть своего рабочего времени (для радиологических рабочих мест с длительным ношением защитной одежды), необходимо, чтобы защита была эргономичной и обеспечивала равномерное распределение веса.

2. СИЗ с запахом должны обеспечивать полное перекрытие передней половины тела до уровня подмышечной впадины.

3. При проведении исследований под рентгеновским контролем не допускается попадание рентгенозащитного материала (например, перчаток или защитных покрывал) между источником, визуализируемой областью и приемником, т.к. из-за этого сильно возрастает мощность дозы рассеянного излучения.

4. Для бессвинцовых средств защиты в документации должны быть указаны характеристики защиты для всего возможного спектра излучения от 50 до 120 кВ ввиду сильной зависимости защитных свойств материала от энергетического спектра фотонов.

Персонал рентгенооперационных выполняет крайне важные и нужные медицинские вмешательства, однако сам может подвергаться относительно высоким рискам профессионального облучения [1]. Для регулярного и правильного использования персоналом средств радиационной защиты, использование которых не затрудняло бы их основной деятельности, рентген-операционные должны быть оснащены удобными и маневренными средствами защиты с учетом накопленных за последние десятилетия знаний и практических навыков в этой области. В рамках данной статьи был дан обзор текущего международного опыта по обеспечению радиационной безопасности персонала рентген-операционных с помощью передвижных и индивидуальных средств радиационной защиты.

Литература

- ICRP Publication 139. Occupational radiological protection in interventional procedures ICRP Publication 139 // Ann ICRP. 2018. Vol. 47, No 2. P. 1–112.
- Miller D.L., Vano E., Bartal G., et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the cardiovascular and Interventional radiology society of Europe and the society of interventional radiology // CardioVascular and Interventional Radiology. 2010. Vol. 33, No 2. P. 230–239.
- Форма федерального статистического наблюдения N 30 «Сведения о медицинской организации» за 2018 год (приказ Росстата об утверждении формы № 483 от 03.08.2018). 2018. 13 с.
- Международная Комиссия по Радиационной защите (ICRP). 2007 Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной защите (ICRP 103) // Ann ICRP. 2007. Vol. 37, No 2–4. P. 1–332.
- ICRP publication 118. ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context // Ann ICRP. 2012. Vol. 41. P. 1–322.
- Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye /TecDoc-1731 // Vienna: International Atomic Energy Agency. 2013. P. 1-44.
- NCRP Report 168. Radiation dose management for fluoroscopically-guided interventional procedures // National Council on Radiological Protection. 2010. 314 p.
- Behrman R.H., Rees C.R. Radiation safety and protection systems. Vascular Imaging and Intervention. Jaypee Bros: New Delhi; 2020. Vol 1, Second Edition. P. 81-123.
- Hirshfeld Jr.J.W., Ferrari V.A., Bengel F.M., et al. 2018 ACC/HRS/NASCI/SCAI/SCCT Expert Consensus Document on Optimal Use of Ionizing Radiation in Cardiovascular Imaging: Best Practices for Safety and Effectiveness. A Report of the American College of Cardiology Task Force on Expert Consensus Decision Pathways // Journal of the American College of Cardiology. 2018. Vol. 71, No. 24. P. 283-351.
- Vano E., Gonzalez L., Fernández J.M., et al. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted // Radiology. 2008 Sep. Vol. 248, No 3. P. 945-953.
- Haqqani O.P., Agarwal P.K., Halin N.M., lafrati M.D. Defining the radiation “scatter cloud” in the interventional suite // Journal of Vascular Surgery. 2013 Nov. Vol. 58, No 5. P. 1339-1345.
- Vano E., Gonzalez L., Fernandez J.M., et al. Influence of patient thickness and operation modes on occupational and patient radiation doses in interventional cardiology // Radiation Protection Dosimetry. 2006. Vol. 118, No 3. P. 325-330.
- Balter S. Stray radiation in the cardiac catheterisation laboratory // Radiation Protection Dosimetry. 2001. Vol. 94, No 1-2. P. 183-188.
- Schueler B.A., Vrieze T.J., Bjarnason H., et al. An investigation of operator exposure in interventional radiology // Radiographics. 2006 Sep-Oct. Vol. 26, No 5. P. 1533-1541.
- Gonzales J.P., Moran C., Silberzweig J.E. Reduction of operator radiation dose by an extended lower body shield // Journal of Vascular and Interventional Radiology. 2014 Mar. Vol. 25, No 3. P. 462-468.
- Vanhavere F., Carinou E., Gualdrini G., et al. ORAMED: Optimization of Radiation Protection for Medical Staff. 7th EURADOS Report. EURADOS. 2012.
- Whitby M., Martin C.J. Radiation doses to the legs of radiologists performing interventional procedures: are they a cause for concern? // British Journal of Radiology. 2003. Vol. 76. P. 321–327.
- Martin C.J. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring // Radiation Protection Dosimetry. 2016 Jun. Vol. 169, No 1-4. P. 286–291.
- Koukorava C., Carinou E., Simantirakis G., et al. Doses to operators during interventional radiology procedures: focus on eye lens and extremity dosimetry // Radiation Protection Dosimetry. 2011 Mar. Vol. 144, No 1-4. P. 482-486.
- Kuon E., Schmitt M., Dahm J.B. Significant reduction of radiation exposure to operator and staff during cardiac interventions by analysis of radiation leakage and improved lead shielding // American Journal of Cardiology. 2002 Jan 1. Vol. 89, No 1. P. 44-49.
- Galster M., Guhl C., Uder M., et al. Exposition of the operator’s eye lens and efficacy of radiation shielding in fluoroscopically guided intervention // RöFo. 2013 May. Vol. 185, No 5. P. 474-481. (In German).
- Fetterly K.A., Magnuson D.J., Tannahill G.M., et al. Effective use of radiation shields to minimize operator dose during invasive cardiology procedures // JACC: Cardiovascular Interventions. 2011 Oct. Vol. 4, No 10. P. 1133-1139.
- Von Boetticher H., Lachmund J., Hoffmann W. Cardiac catheterization: impact of face and neck shielding on new estimates

- of effective dose // *Health Physics*. 2009 Dec. Vol. 97, No 6. P. 622-627.
24. Maeder M., Brunner-La Rocca H.P., Wolber T., et al. Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2006 Jan. Vol. 67, No 1. P. 18-23.
 25. Van Rooijen B.D., de Haan M.W., Das M., et al. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology // *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2014 Oct. Vol. 37, No 5. P. 1149-1155.
 26. Magee J.S., Martin C.J., Sandblom V., et al. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology // *Journal of Radiological Protection*. 2014 Dec. Vol. 34, No 4. P. 811-823.
 27. Jacob S., Donadille L., Maccia C., et al. Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses // *Radiation Protection Dosimetry*. 2013 Mar. Vol. 153, No 3. P. 282-293.
 28. IAEA, "Training Material on Radiation Protection in Cardiology: Occupational exposure and protective devices." URL: https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/Documents/TrainingCardiology/Lectures/CARD_L07_OccupationalExposure_and_ProtectiveDevices_WEB.ppt. (Дата обращения 09.08.2021).
 29. ICRP, 2012. Radiological protection in Cardiology. ICRP Publication 120 // *Ann. ICRP*. 2012. Vol. 42, No 1.
 30. Goldstein J.A., Balter S., Cowley M., et al., Occupational hazards of interventional cardiologists: prevalence of orthopedic health problems in contemporary practice // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2004. No 63. P. 407-411.
 31. Dixon R.G., Khiatani V., Statler J.D., et al. Society of interventional radiology: occupational back and neck pain and the interventional radiologist // *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2017. Vol. 28, No 2. P. 195-9.
 32. ICRP, 2010. Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department. ICRP Publication 117 // *Ann. ICRP*. 2010. Vol. 40, No 6.
 33. Klein L.W., Tra Y., Garratt K.N., et al., Occupational health hazards of interventional cardiologists in the current decade: results of the 2014 SCAI membership survey // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2015. No 86. P. 913-924.
 34. ICRP Publication 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures // *Ann ICRP*. 2000. Vol. 30, No 2. P. 7-67.
 35. Detorie N., Mahesh M., Schueler B.A., Reducing occupational exposure from Fluoroscopy // *Journal of the American College of Radiology*. 2007. No. 4. P. 335-337.
 36. Franken Y. Guidance on the use of protective lead aprons in medical radiology protection efficiency and correction factors for personal dosimetry. Proc. 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23-25 October 2002, Madrid: Spain; 2002. P. 135-139.
 37. Christodoulou E.G., Goodsitt M.M., Larson S.C., et al. Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter // *Medical Physics*. 2003 Jun. Vol. 30, No 6. P. 1033-1038.
 38. Finnerty M., Brennan P.C. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation // *European Journal of Radiology*. 2005 Jul. Vol. 15, No 7. P. 1477-84.
 39. Schlattl H., Zankl M., Eder H., et al. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses // *Medical Physics*. 2007 Nov. Vol. 34, No 11. P. 4270-80.
 40. Eder H., Schlattl H., Hoeschen C. X-Ray protective clothing: does DIN 6857-1 allow an objective comparison between lead-free and lead-composite materials? // *RoFo*. 2010 May. Vol. 182, No 5. P. 422-428.
 41. Marshall N.W., Faulkner K., Clarke P. An investigation into the effect of protective devices on the dose to radiosensitive organs in the head and neck // *British Journal of Radiology*. 1992 Sep. Vol. 65, No 777. P. 799-802.
 42. Kicken P.J.H., Kemerink G.J., Schultz F.W., et al. Dosimetry of occupationally exposed persons in diagnostic and interventional arteriography. Part II: Assessment of effective dose // *Radiation Protection Dosimetry*. 1999. Vol. 82. P. 105-114.
 43. Moore W.E., Ferguson G., Rohrman C., Physical factors determining the utility of radiation safety glasses // *Medical Physics*. 1980. No 7. P. 8-12.
 44. Thornton R.H., Dauer L.T., Altamirano J.P., et al., Comparing strategies for operator eye protection in the interventional radiology suite // *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2010. No 21. P. 1703-1707.
 45. Limacher M.C., Douglas P.S., Germano G., et al. ACC expert consensus document. Radiation safety in the practice of cardiology // *Journal of the American College of Cardiology*. 1998 Mar 15. Vol. 31, No 4. P. 892-913.
 46. Wagner L.K., Mulhern O.R. Radiation-attenuating surgical gloves: Effects of scatter and secondary electron production // *Radiology*. 1996. No 200. P. 45-48.
 47. Adamus R., Loose R., Wucherer M., Uder M., et al. Strahlenschutz in der interventionellen Radiologie // *Radiologie*. 2016 Mar. Vol. 56, No 3. P. 275-81. (In German).

Поступила: 09.08.2021 г.

Сарычева Светлана Сергеевна – кандидат биологических наук, 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: Svetlana2003@mail.ru

Для цитирования: Сарычева С.С. Особенности применения средств радиационной защиты для персонала рентгенохирургических операционных // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. – С. 76-84. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-76-84

Features of radiation protection equipment for the staff of X-ray operating rooms

Svetlana S. Sarycheva

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

This survey is devoted to the staff radiation protection in X-ray operating rooms. For self-safety staff must regularly and correctly use the protective equipment, which is ensured by their availability, convenience and manoeuvrability during procedures performing. The rapid development of interventional radiology led to the fact that the staff work in this area have one of the highest levels of occupational exposure. Unfortunately, domestic radiation protection system does not keep pace with such a rapid development of this branch of medicine. The article shows the basic principles of the distribution of scattered radiation in the X-ray operating room during the procedures performing. The distribution of scattered radiation around the patient for various modes of C-arm angiographic systems is shown. Graphical examples of scattered radiation distribution in X-ray operating rooms are given. Collective and individual protective equipment specifically designed for staff radiation protection in X-ray operating room are considered in detail. The common data on the protection features of the recommended staff protection equipment are presented. Most of the considered protection equipment is mandatory in many European countries, but not mentioned in domestic regulatory documents yet. The proposals for the modernization of the domestic radiation protection system for staff of X-ray operating rooms have been made. These recommendations focused on providing X-ray operating rooms with relevant radiation protection equipment, including eye protection, following the accumulated world experience and international regulations.

Key words: interventional radiology, staff protection, radiation protection equipment.

References

1. ICRP Publication 139. Occupational radiological protection in interventional procedures ICRP Publication 139. *Ann ICRP*. 2018;47(2): 1–112.
2. Miller DL, Vano E, Bartal G, Balter S, Dixon R, Padovani R, et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the cardiovascular and Interventional radiology society of Europe and the society of interventional radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2010;33(2): 230–239.
3. Federal statistic form N 30 "Information about the medical organization" for 2018. (Order No. 483 on the approval of Form by Rosstat dated 03.08.2018). 2018. 13 p. (in Russian).
4. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*. 2007;37 (2-4). (In Russian).
5. ICRP publication 118. ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP*. 2012;41: 1–322.
6. Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye /TecDoc-1731. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 1-44
7. NCRP Report 168. Radiation dose management for fluoroscopically-guided interventional procedures // National Council on Radiological Protection, 2010. 314 p.
8. Behrman RH, Rees CR. Radiation safety and protection systems. Vascular Imaging and Intervention. Jaypee Bros: New Delhi; 2020. Vol 1, Second Edition. P. 81-123.
9. Hirshfeld Jr. JW, Ferrari VA, Bengel FM, Bergersen L, Chambers CE, Einstein AJ, et al. 2018 ACC/HRS/NASCI/SCAI/SCCT Expert Consensus Document on Optimal Use of Ionizing Radiation in Cardiovascular Imaging: Best Practices for Safety and Effectiveness. A Report of the American College of Cardiology Task Force on Expert Consensus Decision Pathways. *Journal of the American College of Cardiology*. 2018;71(24): 283-351.
10. Vano E, Gonzalez L, Fernández JM, Haskal ZJ. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology*. 2008 Sep;248(3): 945-953.
11. Haqqani OP, Agarwal PK, Halin NM, lafrati MD. Defining the radiation "scatter cloud" in the interventional suite. *Journal of Vascular Surgery*. 2013 Nov;58(5): 1339-1345.
12. Vano E, Gonzalez L, Fernandez JM, Prieto C, Guibelalde E. Influence of patient thickness and operation modes on occupational and patient radiation doses in interventional cardiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2006;118(3): 325-330.
13. Balter S. Stray radiation in the cardiac catheterisation laboratory. *Radiation Protection Dosimetry*. 2001;94(1-2): 183-188.
14. Schueler BA, Vrieze TJ, Bjarnason H, Stanson AW. An investigation of operator exposure in interventional radiology. *Radiographics*. 2006 Sep-Oct;26(5): 1533-1541
15. Gonzales JP, Moran C, Silberzweig JE. Reduction of operator radiation dose by an extended lower body shield. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2014 Mar;25(3): 462-468
16. Vanhavere F, Carinou E, Gualdrini G, Clairand I, Sans Merce M, Ginjaume M, et al., ORAMED: Optimisation of Radiation Protection for Medical Staff. 7th EURADOS Report. EURADOS; 2012.
17. Whitby M, Martin CJ. Radiation doses to the legs of radiologists performing interventional procedures: are they a cause for concern? *British Journal of Radiology*. 2003;76: 321–327.

Svetlana S. Sarycheva

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Svetlana2003@mail.ru

18. Martin CJ. Eye lens dosimetry for fluoroscopically guided clinical procedures: practical approaches to protection and dose monitoring. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016 Jun;169(1-4):286–291.
19. Koukorava C, Carinou E, Simantirakis G, Vrachliotis TG, Archontakis E, Tierris C, et al. Doses to operators during interventional radiology procedures: focus on eye lens and extremity dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011 Mar;144(1-4):482–486.
20. Kuon E, Schmitt M, Dahm JB. Significant reduction of radiation exposure to operator and staff during cardiac interventions by analysis of radiation leakage and improved lead shielding. *American Journal of Cardiology*. 2002 Jan 1;89(1):44–49.
21. Galster M, Guhl C, Uder M, Adamus R. Exposition of the operator's eye lens and efficacy of radiation shielding in fluoroscopically guided interventions. *R Fo*. 2013 May;185(5):474–481. (In German).
22. Fetterly KA, Magnuson DJ, Tannahill GM, Hindal MD, Mathew V. Effective use of radiation shields to minimize operator dose during invasive cardiology procedures. *JACC: Cardiovascular Interventions*. 2011 Oct;4(10):1133–1139.
23. Von Boetticher H, Lachmund J, Hoffmann W. Cardiac catheterization: impact of face and neck shielding on new estimates of effective dose. *Health Physics*. 2009 Dec;97(6):622–627.
24. Maeder M, Brunner-La Rocca HP, Wolber T, Ammann P, Roelli H, Rohner F, et al. Impact of a lead glass screen on scatter radiation to eyes and hands in interventional cardiologists. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2006 Jan;67(1):18–23.
25. Van Rooijen BD, de Haan MW, Das M, Arnoldussen CW, de Graaf R, van Zwam WH, et al. Efficacy of radiation safety glasses in interventional radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2014 Oct;37(5):1149–1155.
26. Magee JS, Martin CJ, Sandblom V, Carter MJ, Almén A, Cederblad Å, et al. Derivation and application of dose reduction factors for protective eyewear worn in interventional radiology and cardiology. *Journal of Radiological Protection*. 2014 Dec;34(4):811–823.
27. Jacob S, Donadille L, Maccia C, Bar O, Boveda S, Laurier D, et al. Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses. *Radiation Protection Dosimetry*. 2013 Mar;153(3):282–293.
28. IAEA, "Training Material on Radiation Protection in Cardiology: Occupational exposure and protective devices." [Available on: https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/Documents/TrainingCardiology/Lectures/CARD_L07_OccupationalExposure_and_ProtectiveDevices_WEB.ppt (Accessed August 09, 2021).
29. ICRP, 2012. Radiological protection in Cardiology. ICRP Publication 120. *Ann. ICRP*. 2012; 42(1).
30. Goldstein JA, Balter S, Cowley M, et al. Occupational hazards of interventional cardiologists: prevalence of orthopedic health problems in contemporary practice. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2004;63:407–411.
31. Dixon RG, Khiatani V, Statler JD, et al. Society of interventional radiology: occupational back and neck pain and the interventional radiologist. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2017;28(2):195–9.
32. ICRP, 2010. Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department. ICRP Publication 117. *Ann. ICRP*. 2010; 40(6).
33. Klein LW, Tra Y, Garratt KN, et al. Occupational health hazards of interventional cardiologists in the current decade: results of the 2014 SCAI membership survey. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. 2015;86:913–924.
34. ICRP Publication 85. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. *Ann ICRP*. 2000;30(2):7–67.
35. Detorie N, Mahesh M, Schueler BA. Reducing occupational exposure from fluoroscopy. *Journal of the American College of Radiology*. 2007;4:335–337.
36. Franken Y. Guidance on the use of protective lead aprons in medical radiology protection efficiency and correction factors for personal dosimetry. Proc. 6th European ALARA Network Workshop on Occupational Exposure Optimisation in the Medical Field and Radiopharmaceutical Industry, 23–25 October 2002, Madrid: Spain; 2002. P. 135–139.
37. Christodoulou EG, Goodsitt MM, Larson SC, Darner KL, Satti J, Chan HP. Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter. *Medical Physics*. 2003 Jun;30(6):1033–1038.
38. Finnerty M, Brennan PC. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation. *European Journal of Radiology*. 2005 Jul;15(7):1477–84.
39. Schlattl H, Zankl M, Eder H, Hoeschen C. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses. *Medical Physics*. 2007 Nov;34(11):4270–80.
40. Eder H, Schlattl H, Hoeschen C. X-Ray protective clothing: does DIN 6857-1 allow an objective comparison between lead-free and lead-composite materials? *RöFo*. 2010 May;182(5):422–428.
41. Marshall NW, Faulkner K, Clarke P. An investigation into the effect of protective devices on the dose to radiosensitive organs in the head and neck. *British Journal of Radiology*. 1992 Sep;65(777):799–802.
42. Kicken PJH, Kemerink GJ, Schultz FW, Zoetelief J, Broerse JJ, van Engelshoven JMA. Dosimetry of occupationally exposed persons in diagnostic and interventional arteriography. Part II: Assessment of effective dose. *Radiation Protection Dosimetry*. 1999;82:105–114.
43. Moore WE, Ferguson G, Rohmann. Physical factors determining the utility of radiation safety glasses. *Medical Physics*. 1980;7:8–12.
44. Thornton RH, Dauer LT, Altamirano JP, et al. Comparing strategies for operator eye protection in the interventional radiology suite. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2010;21:1703–1707.
45. Limacher MC, Douglas PS, Germano G, Laskey WK, Lindsay BD, McKetty MH, et al. ACC expert consensus document. Radiation safety in the practice of cardiology. American College of Cardiology. *Journal of the American College of Cardiology*. 1998 Mar 15;31(4):892–913.
46. Wagner LK, Mulhern OR. Radiation-attenuating surgical gloves: Effects of scatter and secondary electron production. *Radiology*. 1996;200:45–48.
47. Adamus R, Loose R, Wucherer M, Uder M, Galster M. Strahlenschutz in der interventionellen Radiologie. *Radiologe*. 2016 Mar;56(3):275–81. (in German).

Received: August 09, 2021

For correspondence: Svetlana S. Sarycheva – candidate of biological sciences, 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 (Mira Str., 8, St. Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Svetlana2003@mail.ru)

For citation: Sarycheva S.S. Features of radiation protection equipment for the staff of X-ray operating rooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 4, P. 76-84. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-76-84.

Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг.

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский, А.А. Братилова

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 рассмотрены результаты применения метода полевой (in situ) гамма-спектрометрии при проведении массовых мониторинговых измерений мощности амбиентного эквивалента дозы и плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородных участках, расположенных в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС. В 2020–2021 гг. было обследовано 115 частных подворий в 46 населенных пунктах Брянской области. На время проведения этих обследований официально установленная средняя плотность загрязнения почвы ^{137}Cs в населенных пунктах находилась в диапазоне от 27 до 533 кБк/м². Измерение полевых спектров проводили с использованием портативного сцинтилляционного гамма-спектрометра-дозиметра. Полученные результаты натурных измерений и последующих вычислений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах хорошо соответствовали официальным данным о средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в обследованных населенных пунктах. Среднее значение соотношения экспериментальных и официальных данных было равно 1,04. Индивидуальные значения экспериментальных значений отклонялись от соответствующих официальных значений не более чем в 2 раза. Применение метода полевой гамма-спектрометрии позволило отдельно определить мощность амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs и от природных радионуклидов, а также оценить соответствующие эффективные дозы внешнего облучения человека в случае его пребывания на огородном участке. Значения мощности амбиентного эквивалента дозы варьировали от 13 до 53 нЗв/ч (средняя \pm стандартное отклонение = 35 ± 9 нЗв/ч) для природных радионуклидов и от 8 до 432 нЗв/ч (средняя \pm стандартное отклонение = 125 ± 91 нЗв/ч) для ^{137}Cs . Значение мощности амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs , определенное для конкретного огородного участка и нормализованное на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы того же самого участка, находилось в диапазоне от 0,41 до 0,84 (нЗв/ч)/(кБк/м²) при средней величине 0,55 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Вычисленные значения эффективной дозы внешнего облучения лежали в диапазоне от 0,008 до 0,025 мЗв/год для природных радионуклидов и от 0,004 до 0,20 мЗв/год для ^{137}Cs при условии нахождения человека на огороде 840 ч в год.

Ключевые слова: Чернобыльская авария, почва, огород, ^{137}Cs , плотность загрязнения, мощность амбиентного эквивалента дозы, in situ, гамма-спектрометрия.

Введение

Огороды (небольшие участки постоянно культивируемой земли, находящейся в индивидуальной собственности) весьма типичны для сельских населенных пунктов (НП) в зоне чернобыльского загрязнения в России и Беларуси. Огороды встречаются повсеместно также в местах одноэтажной частной жилой застройки в городах, подвергшихся радиоактивному загрязнению (например, г. Новозыбков и г. Клинцы в Брянской области в России; г. Ветка Гомельской области в Беларуси). Как правило, огороды расположены в непосредственной близости от жилых домов собственников приусадебных участков.

Огороды используются собственниками для выращивания разнообразных видов сельскохозяйственных растений, в основном, с целью последующего личного употребления в пищу и откорма домашних животных. Техногенные радионуклиды, присутствующие в продуктах из личных подсобных хозяйств, вносят определенный вклад в дозу внутреннего облучения местного населения [1–3]. Кроме того, в процессе выполнения работ на огородах владельцы участков неизбежно подвергаются воздействию гамма-излучения, исходящего от присутствующих в огородной почве техногенных (в настоящее время – ^{137}Cs) и природных радионуклидов [3–5]. Поэтому

Рамзаев Валерий Павлович

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: V.Ramzaev@mail.ru

при мониторинге доз облучения населения на радиоактивно загрязненных территориях огород является обязательной локацией для проведения измерений мощности дозы гамма-излучения в воздухе (МД)¹. При этом огород может также использоваться в качестве референтной локации для определения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs} , кБк/м²) в НП и вычисления нормализованной на A_{Cs} величины МД от ¹³⁷Cs в таких локациях, как сам огород, жилой дом, двор и улица [4]. В совокупности эти локации представляют собой жилую зону НП. Именно здесь человек проводит основную часть своей жизни [6].

Летом 2020 и 2021 гг. в ходе выполнения «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС (2019–2022)» [http://www.postkomsg.com/programs], ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева провел экспедиционные обследования НП Брянской области по оценке средних годовых эффективных доз облучения населения, проживающего на приграничных территориях радиоактивного загрязнения России и Беларуси.

Цель исследования – экспериментальное установление нормализованной (на A_{Cs}) мощности амбиентного эквивалента дозы для огородов, расположенных в жилой зоне НП.

Задачи исследования

1. Измерить общую мощность амбиентного эквивалента дозы ($ADER$, нЗв/ч).
2. Определить мощность амбиентного эквивалента дозы от терригенных (природных) радионуклидов ($ADER_{TRN}$, нЗв/ч).

3. Определить мощность амбиентного эквивалента дозы от ¹³⁷Cs ($ADER_{Cs-tot}$, нЗв/ч).

4. Определить плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs ($A_{Cs-in-situ}$, кБк/м²) и среднюю глубину миграции радионуклида в почве (Z_{Cs} , г/см²).

На основе экспериментальных данных, полученных с использованием портативного гамма-спектрометра-дозиметра *in situ*, была выполнена оценка эффективной дозы внешнего облучения (ED, мЗв/год) взрослого человека в случае его нахождения на огородном участке для проведения сельскохозяйственных работ и отдыха. Кроме того, путем сравнения с ранее опубликованными данными проверена устойчивость показателя нормализованной (на A_{Cs}) мощности дозы гамма-излучения в воздухе на огородах в Брянской области в отдаленном периоде после аварии.

Материалы и методы

Работы были проведены на территории 46 НП, расположенных в административных границах Гордеевского, Злынковского, Климовского, Клинцовского, Красногорского и Новозыбковского районов. Названия НП и официально установленная средняя плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs в каждом из этих НП приведены в таблице 1. На время проведения измерений *in situ* в августе 2020 г. и в июле – августе 2021 г. средние значения плотности загрязнения ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}) находились в достаточно широком диапазоне: от 27 до 533 кБк/м². Эти значения получены из официально установленных значений плотности загрязнения на 01.01.2017 [7] путем умножения на поправочный понижающий коэффициент, учитывающий только физический распад ¹³⁷Cs ($T_{1/2} = 30$ лет).

Таблица 1

Официально установленная средняя плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}) в населенных пунктах Брянской области и число огородных участков, обследованных в 2020–2021 гг. с использованием дозиметра-спектрометра MKS AT6101D

[Table 1

The officially established average value of soil contamination density with ¹³⁷Cs (A_{Cs-off}) in the settlements of the Bryansk region, and the number of kitchen garden plots surveyed in 2020–2021 using the dosimeter-spectrometer MKS AT6101D

Населенный пункт [Settlement]	A_{Cs-off} , Ки/км ² (на 01.01.2017 г.) [A_{Cs-off} , Ci/km ² (as of 01.01.2017)] *	A_{Cs-off} , кБк/м ² (на день измерений) [A_{Cs-off} , kBq/m ² (on the day of measurements)] **	Число участков [Number of plots]
Гордеевский район [Gordeevka district]			
Глинное [Glinnoe]	3,8	129	1
Гордеевка [Gordeevka]	12,5	426	6
Перетин [Peretin]	9,3	310	2
Поконь [Pokon']	6,2	211	1
Рудня-Воробьевка [Rudnya-Vorobyovka]	11,0	366	4
Смяльч [Smyalch]	10,1	336	2
Староновицкая [Staronovitskaya]	12,7	423	2
Стругова Буда [Strugova Buda]	4,9	167	6
Творишино [Tvorishino]	10,5	350	2
Ширяевка [Shiryayevka]	14,1	469	2

¹ ГОСТ Р 22.11.09-2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Безопасность жизнедеятельности населения на радиоактивно загрязненных территориях. Мониторинг доз облучения населения. Общие требования. [GOST P 22.11.09-2014. Safety in emergency. Human life safety of population on radioactive nuclide contaminated areas. Monitoring radiation doses. Basic requirements. (In Russ.)]

Радиационные измерения

Окончание таблицы 1

Населенный пункт [Settlement]	A_{Cs-off} , Ки/км ² (на 01.01.2017 г.) [A_{Cs-off} , Ci/км ² (as of 01.01.2017)] *	A_{Cs-off} , кБк/м ² (на день измерений) [A_{Cs-off} , kBq/m ² (on the day of measurements)]**	Число участков [Number of plots]
Злынковский район [Zlynka district]			
Большие Щербиничи [Bolshie Shcherbinichi]	8,5	283	2
Денисковичи [Deniskovichi]	9,5	324	2
Злынка [Zlynka]	13,8	470	4
Карпиловка [Karpilovka]	8,0	272	1
Кожановка [Kozhanovka]	1,0	33	2
Рогов [Rogov]	6,6	220	2
Софиевка [Sofiyivka]	9,3	310	2
Спиридонова Буда [Spiridonova Buda]	7,6	253	2
Климовский район [Klimovo district]			
Ивановка [Ivanovka]	1,6	53	2
Рудня-Цата [Rudnya-Tsata]	1,7	57	2
Старые Юрковичи [Starie Yurkovichi]	0,8	27	2
Фоевичи [Foevichi]	3,6	120	2
Чуровичи [Churovichi]	3,9	130	3
Клинцовский район [Klincy district]			
Великая Топаль [Velikaya Topal']	3,1	106	6
Вьюнка [V'yunka]	1,1	37	2
Гута-Корецкая [Guta-Koretskaya]	7,2	240	2
Дровосеки [Drovoseki]	4,5	153	1
Коржовка-Голубовка [Korzhovka-Golubovka]	1,1	37	2
Красный Мост [Krasnyy Most]	5,9	201	1
Лопатни [Lopatni]	3,3	110	2
Малая Топаль [Malaya Topal']	3,8	129	6
Мизиричи [Mizirichi]	0,9	30	2
Сосновка [Sosnovka]	1,2	40	2
Красногорский район [Krasnaya Gora district]			
Даниловка [Danilovka]	2,5	85	1
Дубенец [Dubenets]	8,7	296	2
Дубрежка [Dubrezhka]	3,2	109	2
Колюды [Kolyudy]	3,0	102	2
Красная Гора [Krasnaya Gora]	4,1	140	2
Кургановка [Kurganovka]	3,2	109	2
Ларневск [Larnevsk]	3,1	103	3
Лотаки [Lotaki]	3,3	110	2
Непобедимый [Nepobedimyy]	2,7	92	2
Селец [Selets]	7,1	242	2
Новозыбковский район [Novozybkov district]			
Деменка [Demenska]	16,0	533	3
Новозыбков [Novozybkov]	10,0	341	7
Перевоз [Perevoz]	13,7	456	3

* – по данным работы Г.Я. Брук и др. [7];

** – вычислено на основании данных работы Г.Я. Брук и др. [7] с учетом радиоактивного распада ¹³⁷Cs.

[* – according to Bruk et al. [7];

** – calculated on the basis of data by Bruk et al. [7] taking into account the radioactive decay of ¹³⁷Cs.]

Измерения были проведены на огородах 115 частных подворий. Хозяева огородов незадолго до наших обследований приступили к уборке урожая. Поэтому, наряду с пятнами оголенной почвы, на огородах присутствовали места, покрытые весьма толстым слоем биомассы (рис. 1). Количество обследованных подворий в НП варьировало от 1 до 7 (см. табл. 1), что в какой-то мере было связано с общим числом жилых подворий в конкретном НП. Как правило, в маленьких поселках мы обследовали 1 или 2 подворья.



Рис. 1. Гамма-спектрометрические измерения *in situ* на огородном участке Per-9 в НП Денисовичи. Прибор МКС АТ6101Д размещен на треножнике. Август 2020 г.

[Fig. 1. *In situ* gamma-ray spectrometric measurement in the kitchen garden plot Per-9 in the settlement Deniskovich. The MKS AT6101D device is placed on the tripod. August 2020]

Измерения полевых (*in situ*) спектров проводили с использованием портативного гамма-спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д (фирма АТОМТЕХ, Беларусь) [8]. Детектор спектрометра размещали на алюминиевом треножнике на высоте 1 м над поверхностью земли (см. рис. 1). Энергетическую калибровку спектрометра проводили с помощью точечного источника ^{137}Cs после каждого включения прибора. Детали описания спектрометра и его калибровки приведены в работах [9–11].

Продолжительность набора полевых спектров находилась в диапазоне от 246 до 1824 с (средняя = 780 с). Для обработки полученных спектров использовали программу АТАS-Lite (АТОМТЕХ). С помощью этой программы были вычислены значения удельной активности ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в почве, а также удельной эффективной активности [12] этих природных радионуклидов ($A_{\text{эфф}}$)². Кроме того, были определены значения АДЕР и вычислены значения скорости счета в фотопике с энергией 662 кэВ (PAR_{662} , имп./с). Величина АДЕР включала в себя вклады от природных (терригенных) радионуклидов, техногенных радионуклидов (в данном случае – ^{137}Cs) и космического излучения, а также собственный фон прибора. Раздельное

определение значений мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от природных радионуклидов (ADER_{TRN}) и от суммы первичных фотонов (энергия = 662 кэВ) и рассеянных фотонов (энергия <662 кэВ) от $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($\text{ADER}_{\text{Cs-tot}}$) проводили в соответствии с методом, изложенным в работе [9]. Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы от первичных фотонов с энергией 662 кэВ ($\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$) вычисляли посредством умножения PAR_{662} на коэффициент конверсии, равный 1,25 (нЗв/ч)/(имп./с) [10].

Результаты спектрометрических измерений, проведенных *in situ*, использовали для вычисления плотности загрязнения почвы огородов ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) в соответствии с методом BUFCs, предложенным Ramzaev et al. [11]. Данный метод был валидирован (т.е. была выполнена оценка его пригодности) с помощью лабораторного гамма-спектрометрического анализа (метод *ex situ*) содержания ^{137}Cs в почвенных пробах, отобранных послойно на 10 представительных огородных участках [13]. В этом исследовании было установлено, что вычисленные с помощью метода BUFCs значения A_{Cs} хорошо согласуются с результатами лабораторных анализов проб почвы. Среднее соотношение значений A_{Cs} , определенных *in situ* и *ex situ*, было равно 1,07 (диапазон 0,93–1,20).

Вычисления $A_{\text{Cs-in-situ}}$ проводили в 3 этапа [11]. Вначале был определен фактор накопления AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs (BUF_{Cs} , безразмерная величина), представляющий собой отношение $\text{ADER}_{\text{Cs-tot}}$ к $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$. На втором этапе вычисляли коэффициент перехода от $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$ к $A_{\text{Cs-in-situ}}$ с помощью эмпирической формулы, выведенной для открытых земельных участков [11]:

$$CC_{\text{BUF}} = a \times \exp(b \times \text{BUF}_{\text{Cs}}), \quad (1)$$

где CC_{BUF} – коэффициент преобразования $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$ в $A_{\text{Cs-in-situ}}$ ((кБк/м²)/(нЗв/ч)); a – эмпирический коэффициент (0,102 (кБк/м²)/(нЗв/ч)); b – эмпирический коэффициент, равный 1,425 (безразмерная величина); BUF_{Cs} – дозовый фактор накопления (безразмерная величина).

На третьем этапе, используя измеренное значение $\text{ADER}_{\text{Cs-prim}}$ и рассчитанное значение CC_{BUF} , вычисляли значение плотности загрязнения почвы ($A_{\text{Cs-in-situ}}$, кБк/м²) обследованного огорода:

$$A_{\text{Cs-in-situ}} = \text{ADER}_{\text{Cs-prim}} \times CC_{\text{BUF}}. \quad (2)$$

В дополнение к оценке A_{Cs} параметр BUF_{Cs} был использован для оценки средней глубины миграции ^{137}Cs в почве (параметр Z_{Cs} , г/см²). Зависимость между BUF_{Cs} и Z_{Cs} описывается эмпирически выведенным линейным уравнением [11]:

$$Z_{\text{Cs}} = c \times \text{BUF}_{\text{Cs}} - d, \quad (3)$$

где c – эмпирический коэффициент (12,9 г/см²); d – эмпирический коэффициент (21,0 г/см²).

Следует отметить, что метод BUFCs имеет два ограни-

² ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. Введен в действие с 1 января 1995 г. в качестве государственного стандарта Российской Федерации Постановлением Госстроя России от 30 июня 1994 г. № 18–48. [ГОСТ 30108-94. Building materials and elements. Determination of specific activity of natural radioactive nuclides. Gosstroy rossii; Moscow, 1995. (In Russ.)]

чения по условиям его разработки и валидации [11]. Во-первых, значение $BUFCs$ должно находиться в пределах диапазона 1,76–2,96. Во-вторых, оцененное или измеренное значение A_{Cs} должно превышать 37 кБк/м².

Результаты и обсуждение

Присутствие четко выраженного пика с энергией 662 кэВ (от ¹³⁷Cs–^{137m}Ba) было обнаружено на всех полевых спектрах на огородах (рис. 2). На спектрограммах также можно было идентифицировать характерные пики терригенных (природных) радионуклидов ²¹⁴Bi (семейство ²²⁶Ra), ²⁰⁸Tl (семейство ²³²Th) и ⁴⁰K.

Результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных приведены в таблице 2. Значения $ADER$ находились в диапазоне от 32 до 461 нЗв/ч при среднем значении 168 нЗв/ч. Статистическая неопределенность измерения $ADER$ во всех случаях не превышала 2% с 95% вероятностью. Значения $ADER_{TRN}$ варьировали от 17 до 53 нЗв/ч (средняя±стандартное отклонение = 35±9 нЗв/ч). Статистическая неопределенность вычисления $ADER_{TRN}$ находилась в диапазоне 9–23% и в среднем равнялась 13%.

Разброс значений $ADER_{Cs-tot}$ был достаточно широким: от 8 до 432 нЗв/ч (средняя±стандартное отклонение = 125±91 нЗв/ч). Вклад $ADER_{Cs-tot}$ в $ADER$ колебался от 17 до 94% при средней величине 66%. Чернобыльская компонента доминировала в общей мощности дозы гамма-излучения в воздухе из 115 в обследованных участков. В среднем вклад первичных (нерассеянных) гамма-квантов от источника ¹³⁷Cs в $ADER_{Cs-tot}$ составил 36% (диапазон 27–47%). Величина BUF_{Cs} находилась в диапазоне 2,12–3,75 (средняя = 2,77). На 13 участках значения BUF_{Cs} выходили за пределы диапазона, опробованного при разработке метода $BUFCs$ (1,76–2,96) [11, 13]. Кроме того, еще на 10 участках ожидаемая или/и оце-

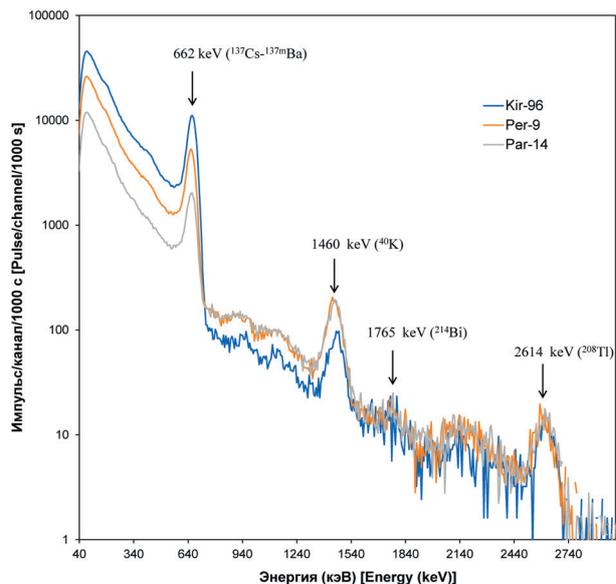


Рис. 2. Гамма-спектры, полученные *in situ* с помощью МКС АТ6101Д на огородах в населенных пунктах Злынка (участок Kir-96; $A_{Cs-in situ} = 506$ кБк/м²), Денисовичи (участок Per-9; $A_{Cs-in situ} = 282$ кБк/м²) и Красная Гора (участок Par-14; $A_{Cs-in situ} = 81$ кБк/м²) в августе 2020 г. Положения пиков антропогенного радионуклида ¹³⁷Cs и терригенных (природных) радионуклидов ²¹⁴Bi (семейство ²²⁶Ra), ²⁰⁸Tl (семейство ²³²Th) и ⁴⁰K обозначены стрелками [Fig. 2. *In situ* gamma-ray spectra recorded with MKS AT6101D in kitchen gardens in the settlements Zlynka (plot Kir-96; $A_{Cs-in situ} = 506$ kBq/m²), Deniskovichi (plot Per-9; $A_{Cs-in situ} = 282$ kBq/m²) and Krasnaya Gora (plot Par-14; $A_{Cs-in situ} = 81$ kBq/m²) in August 2020. The positions of peaks associated with the anthropogenic radionuclide ¹³⁷Cs and the terrigenous (natural) radionuclides ²¹⁴Bi (²²⁶Ra series), ²⁰⁸Tl (²³²Th series) and ⁴⁰K are indicated by arrows]

Таблица 2

Мощность Ambient dose equivalent rate from all sources ($ADER$), from terrestrial radionuclides ($ADER_{TRN}$), from non-scattered gamma-ray photons with energy 662 keV ($ADER_{Cs-prim}$), from the sum of the primary and scattered photons of ¹³⁷Cs+^{137m}Ba ($ADER_{Cs-tot}$), dose build up factor (BUF_{Cs}), average depth of ¹³⁷Cs migration in soil (Z_{Cs}), the soil contamination density with ¹³⁷Cs determined *in situ* ($A_{Cs-in situ}$) in kitchen garden plots that were surveyed in settlements of the Bryansk region in 2020–2021 гг.

[Table 2

Ambient dose equivalent rate from all sources ($ADER$), from terrestrial radionuclides ($ADER_{TRN}$), from the 662 keV primary photons ($ADER_{Cs-prim}$), from the sum of the primary and scattered photons of ¹³⁷Cs+^{137m}Ba ($ADER_{Cs-tot}$), dose build up factor (BUF_{Cs}), average depth of ¹³⁷Cs migration in soil (Z_{Cs}), the soil contamination density with ¹³⁷Cs determined *in situ* ($A_{Cs-in situ}$) in kitchen garden plots that were surveyed in settlements of the Bryansk region in 2020–2021]

Параметр [Parameter]	$ADER$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{TRN}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{Cs-tot}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	$ADER_{Cs-prim}$ (нЗв/ч) [(nSv/h)]	BUF_{Cs}	Z_{Cs} (г/см ²) [(g/cm ²)]	$A_{Cs-in situ}$ (кБк/м ²) [(kBq/m ²)]
Минимум [Minimum]	32.4	17	7.9	2.9	2.12	8.8	48
Максимум [Maximum]	461	53	432	159	3.75	17.5	779
Медиана [Median]	143	36	94	34	2.76	14.1	231
Средняя [Mean]	168	35	125	46	2.77	14.3	259
С.о. [SD]	87	9	91	34	0.21	1.9	153
КВ (%) [CV (%)]	52	25	73	75	8	13	59
Число участков [Number of plots]	115	115	115	115	115	92	92

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation]; КВ – коэффициент вариации (%) [CV – coefficient of variation (%)].

ненная плотность загрязнения почвы ^{137}Cs была меньше 37 кБк/м². Поэтому для этих 23 участков вычисленные значения Z_{Cs} и $A_{\text{Cs-in-situ}}$ были исключены из общей статистической обработки.

Вычисленные для 92 участков значения Z_{Cs} варьировали от 8,8 г/см² до 17,5 г/см². Двукратный разброс показателя глубины проникновения ^{137}Cs в почву в определенной мере может быть связан с методом культивации земли: перекопка с помощью лопаты или перепахивание плугом.

Значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$), определенные с помощью метода BUFCs на 92 огородах, лежали в диапазоне от 48 до 779 кБк/м². Столь широкий разброс значений $A_{\text{Cs-in-situ}}$ в нашей выборке был связан, в первую очередь, с существенными различиями между отдельными НП по показателю плотности чернобыльских выпадений (см. табл. 1). Вместе с тем, в некоторых НП отмечалась внутренняя пространственная неравномерность загрязнения. В частности, в НП Стругова Буда (число обследованных подворий = 6) была обнаружена более чем двукратная разница между максимальным (280 кБк/м²) и минимальным (132 кБк/м²) значением $A_{\text{Cs-in-situ}}$. В остальных НП различия между отдельными подворьями по показателю $A_{\text{Cs-in-situ}}$ не превышали 2 раз. Зарегистрированную нами неравномерность загрязнения территории НП следует признать незначительной. Например, по данным М.Ю. Орлова и др. [14], размах значений A_{Cs} в совокупности проб почвы, отобранных в пределах одного НП, мог превышать порядок величины. По данным, представленным Е.К. Ниловой и др. [3], максимальное и минимальное значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в городском поселке Брагин (Гомельская область, Беларусь) в 2018 г. различались более чем в пять раз.

Среднее значение отношения $A_{\text{Cs-in-situ}}$ к $A_{\text{Cs-off}}$ было равно 1,04 при медиане 1,02. Значения $A_{\text{Cs-in-situ}}$ отклонялись от соответствующих значений $A_{\text{Cs-off}}$ не более чем в 2 раза (табл. 3). На рисунке 3 это соотношение между двумя показателями представлено графически. В целом, полученные

нами результаты натуральных измерений и последующих вычислений хорошо соответствуют официальным данным о плотности загрязнения обследованных НП.

Значение $ADER_{\text{Cs-tot}}$, вычисленное для конкретного огорода и нормализованное на плотность загрязнения того же самого огорода ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-in-situ}}$), находилось в диапазоне от 0,41 до 0,84 (нЗв/ч)/(кБк/м²) (см. табл. 3). Средняя величина нормализованной $ADER_{\text{Cs-tot}}$ (по результатам анализа данных для 92 огородных участков) равнялась 0,55 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Практически такое же среднее значе-

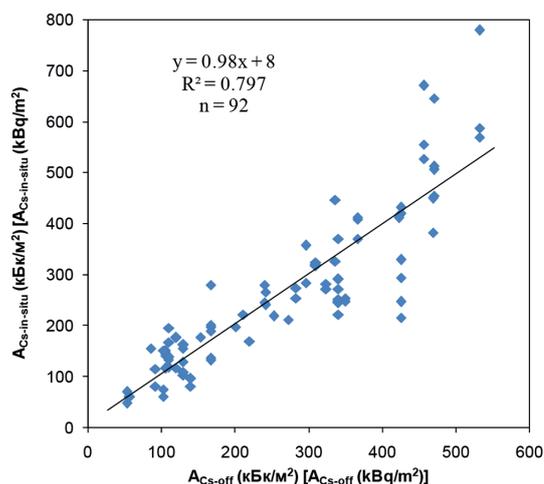


Рис. 3. Соотношение между измеренным *in situ* значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородном участке ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) и официально установленным средним значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в соответствующем населенном пункте ($A_{\text{Cs-off}}$). 39 населенных пунктов Брянской области, 2020–2021 гг.

Fig. 3. Relationship between the *in situ* measured value of the ^{137}Cs contamination density of soil in a kitchen garden plot ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) and the officially established average value of the ^{137}Cs contamination density of soil in the respective settlement ($A_{\text{Cs-off}}$). 39 settlements of the Bryansk region, 2020–2021]

Таблица 3

Соотношения между мощностью амбиентного эквивалента дозы от ^{137}Cs ($ADER_{\text{Cs-tot}}$) на огородном участке, значением плотности загрязнения почвы ^{137}Cs , измеренном *in situ* на том же участке ($A_{\text{Cs-in-situ}}$), и официально установленным средним значением плотности загрязнения территории ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-off}}$) того населенного пункта, где расположен огородный участок; Брянская область, 2020–2021 гг.

[Table 3

Relationships between ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs ($ADER_{\text{Cs-tot}}$) in a kitchen garden plot, *in situ* measured value of the ^{137}Cs inventory in soil ($A_{\text{Cs-in-situ}}$) in the same plot, and the officially established average value of the ^{137}Cs contamination density with ^{137}Cs ($A_{\text{Cs-off}}$) in the settlement where the plot is located; the Bryansk region, 2020–2021]

Параметр [Parameter]	$A_{\text{Cs-in-situ}}/A_{\text{Cs-off}}$	$ADER_{\text{Cs-tot}}/A_{\text{Cs-off}}$ (нЗв/ч)/(кБк/м ²) [(nSv/h)/(kBq/m ²)]	$ADER_{\text{Cs-tot}}/A_{\text{Cs-in-situ}}$ (нЗв/ч)/(кБк/м ²) [(nSv/h)/(kBq/m ²)]
Минимум [Minimum]	0.51	0.19	0.41
Максимум [Maximum]	1.82	1.45	0.84
Медиана [Median]	1.02	0.55	0.55
Средняя [Mean]	1.04	0.57	0.55
С.о. [SD]	0.27	0.19	0.09
КВ (%) [CV (%)]	26	34	16
Число участков [Number of plots]	92	115	92

С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation]; КВ – коэффициент вариации (%) [CV – coefficient of variation (%)].

ние – 0,57 (нЗв/ч)/(кБк/м²) – было получено при вычислении отношения $ADER_{Cs-tot}$ на огороде к официально установленной средней плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs в НП (A_{Cs-off}). Отношение $ADER_{Cs-tot}$ к A_{Cs-off} варьировало в пределах 0,19–1,45 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Т.е. распределение индивидуальных значений при вычислении отношения $ADER_{Cs-tot}$ к A_{Cs-off} было ожидаемо заметно шире, чем таковое для отношения $ADER_{Cs-tot}$ к $A_{Cs-in-situ}$. Эту разницу в широте распределений можно четко видеть на рисунке 4. Различия в широте распределения, что отражается также в различии между значениями коэффициента вариации (см. табл. 3), связаны с жесткой пространственной «привязкой» $ADER_{Cs-tot}$ к уровню загрязнения конкретного участка земли внутри НП ($A_{Cs-in-situ}$).

Представляет интерес сравнить вычисленные нами значения нормализованной $ADER_{Cs-tot}$ с оценкой нормализованной мощности поглощенной дозы в воздухе (МПД), приведенной в работе Ramzaev et al. [4]. По данным этого представительного обследования (число огородных участков = 261), проведенного в юго-западных районах Брянской области в 1996–2001 гг., среднее значение нормализованной МПД от ¹³⁷Cs в огородной почве было равно 0,41 ± 0,07 (нГр/ч)/(кБк/м²). Учитывая, что коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к AMBIENTному эквиваленту дозы для ¹³⁷Cs на огородных участках равен 1,31 Зв/Гр [15], среднее ожидаемое значение нормализованной $ADER_{Cs-tot}$ в работе [4] может быть оценено как 0,54 ± 0,09 (нЗв/ч)/(кБк/м²). Эта величина хорошо соответствует нашей оценке данного обобщенного дозиметрического показателя на 2020–2021 гг. (см. табл. 3). Приведенное сравнение указывает

на устойчивость нормализованной мощности дозы гамма-излучения в воздухе на огородах в отдаленном периоде после аварии. По-видимому, через 10–15 лет после радиоактивных выпадений, в результате постоянной культивации уже формируется сравнительно стабильное вертикальное распределение ¹³⁷Cs в огородной почве. Последующая культивация не приводит к существенным изменениям этого распределения, а соответственно, и величины нормализованной $ADER_{Cs-tot}$. Об отсутствии значительной вертикальной миграции в огородной почве в отдаленном периоде после аварии на ЧАЭС может свидетельствовать весьма длинный экологический период (99 лет) полууменьшения мощности поглощенной дозы в воздухе от ¹³⁷Cs на огородах в Брянской области в 1998–2012 гг. [16].

На основе полученных экспериментальных данных представляется возможным выполнить оценку годовой эффективной дозы внешнего облучения (ED) взрослого человека за время пребывания на огороде. Для вычислений используем следующую формулу [5]:

$$ED_i = ADER_i \times a_i \times b_i \times t \times 10^{-6}, \quad (4)$$

где ED_i – эффективная годовая доза от i -го радионуклида, мЗв/год; $ADER_i$ – мощность AMBIENTного эквивалента дозы от i -го радионуклида, нЗв/ч; a_i – коэффициент перехода от AMBIENTного эквивалента дозы к керме в воздухе для i -го радионуклида, Гр/Зв; b_i – коэффициент перехода от кермы в воздухе к ED для i -го радионуклида, Зв/Гр; t – время нахождения на огородном участке, ч/год; 10^{-6} – коэффициент конверсии нЗв в мЗв.

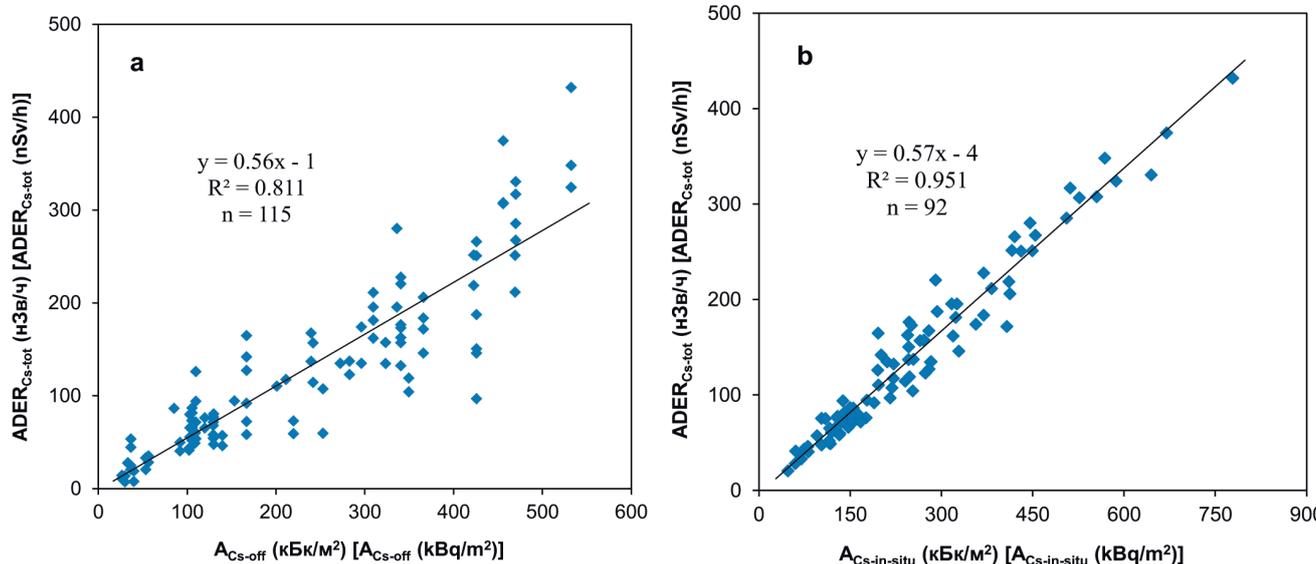


Рис. 4. Соотношение между мощностью AMBIENTного эквивалента дозы от ¹³⁷Cs на огородном участке ($ADER_{Cs-tot}$) и плотностью загрязнения почвы ¹³⁷Cs. Соотношение показано для: (а) официально установленного среднего значения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs соответствующего населенного пункта (A_{Cs-off}) и (б) измеренного *in situ* значения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs на соответствующем огородном участке ($A_{Cs-in-situ}$). 46 населенных пунктов (а) и 39 населенных пунктов (б) Брянской области, 2020–2021 гг.

[Fig. 4.] Relationship between the ambient dose equivalent rate from ¹³⁷Cs in a kitchen garden plot ($ADER_{Cs-tot}$) and the density of soil contamination with ¹³⁷Cs. The ratio is shown for: (a) the officially established average value of the density of soil contamination with ¹³⁷Cs in the respective settlement (A_{Cs-off}), and (b) the *in situ* measured value of the density of soil contamination with ¹³⁷Cs at the respective kitchen garden plot ($A_{Cs-in-situ}$). 46 settlements (a) and 39 settlements (b) in the Bryansk region, 2020–2021

Применительно к культивируемой почве значения коэффициентов a_i и b_i равны соответственно: для ^{137}Cs – 0,75 Гр/Зв и 0,71 Зв/Гр; для природных радионуклидов – 0,8 Гр/Зв и 0,7 Зв/Гр [15, 17, 18]. Оценок продолжительности времени, которое проводит взрослый человек, работая на огороде в зоне радиоактивного загрязнения в Брянской области в настоящее время, нам не встретилось. Поэтому для получения значения t мы использовали результаты опроса жителей, проживающих в зоне чернобыльского загрязнения Гомельской области [3]. Эти территории весьма схожи с юго-западными районами Брянской области по климатическим условиям и укладу жизни сельского населения. По данным [3], сельский житель проводит 4 ч в день на приусадебном участке; предполагается, что такой режим работ применим к 7 месяцам в году, что в сумме дает значение t , равное 840 часов в год.

Вычисленные с использованием выражения (4) значения ED, формирующейся за счет нахождения на огородных участках, которые были обследованы нами в 2020–2021 гг. в Брянской области, находились в диапазоне от 0,008 до 0,025 мЗв/год для природных радионуклидов и от 0,004 до 0,20 мЗв/год для ^{137}Cs .

Отметим, что полученные в настоящем исследовании средние значения $ADER_{TRN}$ и нормализованной $ADER_{Cs-tot}$ потенциально можно использовать для вычисления ED, формирующейся при выполнении взрослым человеком работ на огородных участках во всех тех НП, которые относятся в настоящее время к зоне радиоактивного загрязнения в Брянской области. Для вычисления годовой дозы от природных радионуклидов (ED_{TRN} , мЗв/год) используем выражение (4) и величину $ADER_{TRN}$, равную среднему значению $ADER_{TRN}$, которое было определено в нашей работе (35 нЗв/ч). Для вычисления годовой дозы от ^{137}Cs (ED_{Cs} , мЗв/год) применяем формулу, учитывающую официально установленную среднюю плотность загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs-off} КБк/м²) в НП:

$$ED_{Cs} = ADER_{Cs-norm} \times a_{Cs} \times b_{Cs} \times t \times 10^{-6} \times A_{Cs-off}, \quad (5)$$

где $ADER_{Cs-norm}$ – среднее значение $ADER_{Cs-tot}$ нормализованной на A_{Cs-off} (0,57 (нЗв/ч)/(КБк/м²)); a_{Cs} – коэффициент перехода от AMBIENTНОГО эквивалента дозы к керме в воздухе для ^{137}Cs (0,75 Гр/Зв) [15]; b_{Cs} – коэффициент перехода от кермы в воздухе к мощности эффективной дозы для ^{137}Cs (0,71 Зв/Гр) [18]; t – время пребывания на огородном участке (840 ч/год); 10^{-6} – коэффициент конверсии нЗв в мЗв.

В качестве примера приведем результаты оценки ED для взрослого человека за время его пребывания на огородном участке в селе Заборье. Этот НП характеризуется максимальной средней плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs на территории Брянской области: 55,5 Ки/км² в 2017 г. [7] или 1890 КБк/м² в 2020 г. Значения ED_{TRN} и ED_{Cs} в Заборье в 2020 г. могли составить 0,016 мЗв и 0,48 мЗв соответственно.

Заключение

Анализ результатов выполненного исследования позволяет сделать вывод о том, что метод полевой (*in situ*) гамма-спектрометрии может быть использован для проведения массовых мониторинговых измерений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородных участках НП, расположенных в Брянской области в зоне радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС. Полученные нами результаты натуральных измерений и последующих вычислений плотности загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{Cs-in-situ}$) хорошо соответствуют официальным данным о средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs-off}) в обследованных НП. Среднее значение отношения $A_{Cs-in-situ}/A_{Cs-off}$ было равно 1,04 при медиане 1,02. Индивидуальные значения $A_{Cs-in-situ}$ отклонялись от соответствующих значений A_{Cs-off} не более чем в два раза. Применение метода полевой гамма-спектрометрии позволяет оперативно отдельно определить значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы от ^{137}Cs и природных радионуклидов, а также оценить эффективную дозу внешнего облучения взрослого человека в случае его пребывания на огородном участке. Для предварительной оценки мощности эффективной дозы от природных радионуклидов в НП загрязненных районов Брянской области может быть рекомендована фиксированная величина мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы, равная 35 нЗв/ч. Для оценки мощности эффективной дозы от ^{137}Cs может быть рекомендовано текущее значение A_{Cs-off} выраженное в терминах КБк/м², и фиксированное значение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы $ADER_{Cs-tot}$ нормализованной на A_{Cs-off} – 0,57 (нЗв/ч)/(КБк/м²).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Благодарность

Авторы благодарят А. Братилову за помощь при проведении полевых исследований. Финансирование работы осуществлялось по контракту № 0173100001419000019 с Роспотребнадзором.

Персональное участие авторов

В.П. Рамзаев выполнил часть полевых исследований, написал черновик статьи и оформил рукопись для представления в редакцию журнала. А.Н. Барковский сформулировал цель и задачи исследования, провел анализ экспериментальных данных и отредактировал окончательный вариант статьи. А.А. Братилова организовала проведение полевых исследований, выполнила часть измерений и отредактировала промежуточный вариант статьи.

Литература

1. Травникова И.Г., Брук Г.Я., Шутов В.Н., и др. Пути формирования доз внутреннего облучения сельских жителей Брянской области после аварии на ЧАЭС (Часть первая) // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 2. С. 11–20.
2. Травникова И.Г. Динамика изменений рационов питания населения Брянской области, живущего на территориях,

- загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 28–32.
3. Нилова Е.К., Бортновский В.Н., Тагай С.А., и др. Оценка современных уровней ^{241}Am и ^{137}Cs в почве, продуктах питания, доз внутреннего облучения жителей населенных пунктов, прилегающих к зоне отселения Чернобыльской АЭС (на примере Брагинского района Гомельской области Беларуси) // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 25–37.
 4. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 205–227.
 5. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 214–215. P. 106168.
 6. Golikov V., Balonov M.I., Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2002. Vol. 41. P. 185–193.
 7. Брук Г.Я., Романович И.К., Базюкин А.Б., и др. 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) // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 73–78.
 8. АТОМТЕХ. Спектрометр МКС-АТ6101Д. URL: <https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/mks-at6101d.pdf> (Дата обращения: 12.09.2020).
 9. Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson C., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29.
 10. Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A., et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $\text{H}^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation // *Radiation Measurements*. 2017. Vol. 107. P. 14–22.
 11. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A., et al. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 231. P. 106562.
 12. Крисюк Э.М. Ядерно-физические характеристики естественных радионуклидов // *Атомная энергия*. 1986. Т. 61, № 1. С. 59–60.
 13. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д *in situ* // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 56–65.
 14. Орлов М.Ю., Сныков В.П., Бочков Л.П. Определение средней плотности загрязнения почвы ^{137}Cs // *Атомная энергия*. 1994. Т. 76, № 3. С. 212–217.
 15. Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium // *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015. Vol. 8, No. 3. P. 6–20.
 16. Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 38–46.
 17. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. 2000. United Nations, New York.
 18. Golikov V., Wallström E., Wöhni T., et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2007. Vol. 46. P. 375–382.

Поступила: 15.04.2021 г.

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения 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: V.Ramzaev@mail.ru

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный 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

Братилова Анжелика Анатольевна – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения 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: Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95

Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky, Anzhelika A. Bratilova

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 results of application of the field (*in situ*) gamma spectrometry method for carrying out mass monitoring measurements of ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen garden plots located in the zone of radioactive contamination after the Chernobyl accident. In 2020 and 2021, 115 private farmsteads in 46 settlements of the Bryansk region were surveyed. At the time of the survey, the officially established average density of soil contamination with ^{137}Cs in the settlements ranged from 27 to 533 kBq/m². The field spectra were measured using a portable scintillation gamma-spectrometer-dosimeter. Results of the field measurements and subsequent calculations of soil contamination density with ^{137}Cs in the kitchen gardens were in good agreement with official data on the average soil contamination density with ^{137}Cs in the surveyed settlements. The mean value of the ratio of the experimental data to the official data was 1.04. Individual values of experimental data deviated from corresponding official values by no more than two times. The use of the gamma spectrometry method *in situ* made it possible: 1) to determine separately values of the ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs and from natural radionuclides in the soil, and 2) to estimate the effective external doses to a person who worked in the kitchen gardens. The measured values of ambient dose equivalent rate varied from 17 to 53 nSv/h (mean \pm standard deviation = 35 \pm 9 nSv/h) for natural radionuclides and from 8 to 432 nSv/h (mean \pm standard deviation = 125 \pm 91 nSv/h) for ^{137}Cs . The ambient dose equivalent rate from ^{137}Cs normalized to the soil contamination density with ^{137}Cs in the same kitchen garden was in the range of 0.41–0.84 (nSv/h)/(kBq/m²) with a mean value of 0.55 (nSv/h)/(kBq/m²). If a person stayed in kitchen garden for 840 hours per year, the estimated effective external doses from natural radionuclides and ^{137}Cs were respectively in the range of 0.008–0.025 mSv/year and 0.004–0.20 mSv/year.

Key words: the Chernobyl accident, soil, kitchen garden, ^{137}Cs , contamination density, ambient dose equivalent rate, *in situ*, gamma spectrometry.

References

1. Travnikova IG, Bruk GY, Shutov VN, Bazyukin AB. Contribution of different foodstuffs to the internal exposure of the rural inhabitants of the Bryansk region in Russia after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(2): 11–20. (In Russian).
2. Travnikova IG. The dynamics of food rations of Bryansk region population living in the territories contaminated after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 26–32. (In Russian).
3. Nilova EK, Bortnovsky VN, Tagai SA, Dudareva NV, Nikitin AN. Assessment of the current levels of ^{241}Am and ^{137}Cs in soils and foodstuff, as well as of public internal exposure to ionizing radiation in populated areas adjacent to the Chernobyl NPP exclusion zone (case study: the Bragin district of the Gomel region, Belarus). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 25–37. (In Russian).
4. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227.
5. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214–215: 106168.
6. Golikov V, Balonov MI, Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2002;41: 185–193.
7. Bruk GY, Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AYu, Gromov AV, et al. The average annual effective doses for the population in the settlements of the Russian Federation attributed to zones of radioactive contamination due to the Chernobyl accident (for zonation purposes), 2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 73–78. (In Russian).
8. ATOMTEX, 2020. AT6101D spectrometer. Available on: <https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/mks-at6101d.pdf>. (Accessed 12 September 2020). (In Russian).
9. Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and ^{137}Cs contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18–29.
10. Ramzaev V, Bernhardsson C, Barkovsky A, Romanovich I, Jarneborn J, Mattsson S, et al. A backpack γ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate, $\text{H}^*(10)$, from ^{137}Cs and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22.
11. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M. *In situ* determination of ^{137}Cs inventory in soil using a field-portable scintillation gamma spectrometer-dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;231: 106562.
12. Krisyuk EM. Nuclear and physical characteristics of naturally occurring radionuclides. *Atomnaya Energija = Atomic Energy*. 1986;61(1): 59–60. (In Russian).

Valery P. Ramzaev

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

13. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Validation of a method for *in situ* determination of ^{137}Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 56–65. (In Russian).
14. Orlov MY, Snykov VP, Bochkov LP. Determination of average ground ^{137}Cs contamination. *Atomnaya Energia = Atomic Energy*. 1994;76(3): 212–217. (In Russian).
15. Ramzaev VP, Barkovsky AN. On the relationship between ambient dose equivalent and absorbed dose in air in the case of large-scale contamination of the environment by radioactive cesium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 6–20.
16. Ramzaev VP, Barkovsky AN. Dynamics of decrease of the gamma dose rate in air in rural settlements of the Bryansk region (Russia) in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 38–46. (In Russian).
17. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. 2000. United Nations, New York.
18. Golikov V, Wallström E, Wöhni T, Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2007;46: 375–382.

Received: April 15, 2021

For correspondence: Valery P. Ramzaev – Candidate of Medical Sciences, Leading 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: V.Ramzaev@mail.ru)

Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Centre, 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

Anzhelika A. Bratilova – Research Fellow of Internal Radiation Laboratory 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 citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N., Bratilova A.A. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with ^{137}Cs in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 85-95. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95

Универсальная градуировка сцинтилляционного спектрометра с детектором NaI(Tl) при измерении активности ^{137}Cs в счетных образцах произвольной плотности и объема

К.А. Седнев, В.А. Некрасов, В.С. Репин

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 описан эмпирический метод построения универсальной градуировки для сцинтилляционного гамма-спектрометра, позволяющей с точностью не более 15% определять активность и удельную активность ^{137}Cs в счетных образцах произвольной плотности и объема в контейнерах цилиндрической формы объемом 250 мл и 500 мл. Для построения градуировочных соотношений выполнены измерения образцовых сред ^{137}Cs , приготовленных на основе материалов различной плотности: кварцевого песка, пластмассовых гранул и древесных опилок. Градуировка проводилась путем подготовки из перечисленных материалов проб объемом от 50 до 250 мл с шагом 50 мл для контейнера 250 мл и 100–500 мл с шагом 100 мл для контейнера 500 мл. Наряду с учетом объема счетного образца, проводилось также его взвешивание. Итогом измерений, выполненных для каждого материала, стали соотношения активности счетного образца к интенсивности счета в окне ^{137}Cs в зависимости от объема. Универсальный градуировочный коэффициент получен посредством учета интенсивности счета от массы и объема образца для соответствующей измерительной емкости.

Ключевые слова: сцинтилляционная гамма-спектрометрия, градуировочный коэффициент, счетный образец, масса, объем, цезий-137.

Введение

При исследовании проб окружающей среды (почвы, растительности, природных пищевых продуктов и пр.) и их использованием гамма-спектрометрии не всегда удается отобрать такой объем или массу, которые достаточны для приготовления стандартного счетного образца, для которого получен градуировочный коэффициент, необходимый для определения активности или удельной активности. Поскольку эффективность счета (количество регистрируемых импульсов) зависит от объема и плотности материала счетного образца и энергии гамма-излучения, корректная оценка активности или удельной активности может быть произведена только с учетом этих двух параметров [1, 2].

В большинстве современных гамма-спектрометров, например, «Прогресс-гамма» производства НПП «Доза», МКГБ-01 производства НТЦ «РАДЭК», «МУЛЬТИРАД-гамма» производства НТЦ Амплитуда», учет этих параметров заложен в программном обеспечении [3–5]. Стандартная комплектация таких приборов включает градуировку прибора для 4 радионуклидов, измерение которых является наиболее распространенным в настоящее время: ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K и ^{137}Cs . Градуировка таких приборов выполнена для 2 стандартных геометрий измерения:

сосуд Маринелли и чашка Петри. В некоторых случаях заказчику предоставляется возможность произвести градуировку для иных вариантов геометрии измерений, приобрести объемные меры активности в нестандартной геометрии [3].

Наиболее распространенными методами градуировки являются методы, основанные на использовании объемных мер [6], однако в литературе приводятся и иные методы градуировки прибора, например, с использованием точечных образцовых спектрометрических гамма-источников – ОСГИ [7]. Данный вариант градуировки позволяет не только учесть объем источника и его плотность, но и построить зависимость эффективности регистрации от энергии. Такая зависимость необходима при определении активности радионуклидов по пикам полного поглощения. В упрощенном варианте, когда нет необходимости измерять активности нескольких радионуклидов, калибровку прибора достаточно произвести только с учетом объема и плотности образца для соответствующей геометрии измерений (измерительной емкости).

Цель исследования – разработка универсального калибровочного соотношения для сцинтилляционного гамма-спектрометра, позволяющего установить связь между активностью пробы и скоростью счета для произ-

Репин Виктор Степанович

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

вольного объема и плотности счетного образца, содержащего ¹³⁷Cs.

Материалы и методы

Для градуировки использован сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI(Tl) размером 63×63 мм. Диапазон регистрируемых энергий: от 50 до 3000 кэВ. Энергетическое разрешение по гамма-линии 661,7 кэВ ¹³⁷Cs – 8,5%. Блок детектирования размещен в свинцовой защите толщиной 75 мм. Градуировка выполнена для двух цилиндрических измерительных емкостей: 250 мл, диаметром 70 мм и 500 мл, диаметром 90 мм. В качестве градуировочных смесей использованы песок плотностью 1,64 г/см³ и удельной активностью 3860 Бк/кг, пластмассовые гранулы плотностью 0,92 г/см³ и удельной активностью 3180 Бк/кг и сухие опилки плотностью 0,18 г/см³ с удельной активностью 11 700 Бк/кг. Все значения удельных активностей приведены на дату измерений.

Процедуру градуировки производили путем последовательной засыпки в измерительную емкость градуировочных сред с шагом 50 мл для емкости 250 мл и 100 мл для емкости 500 мл. После каждой очередной засыпки пробу взвешивали и производили ее измерение в течение 30 мин. Индекс пробы, объем, масса, название спектра и число зарегистрированных импульсов под пиком полного поглощения ¹³⁷Cs заносились в журнал регистрации. Процедура градуировки для каждой измерительной емкости повторялась 3 раза. Обработка полученных результатов производилась средствами Excel. Расчет площади пика полного поглощения (фотопика) производился методом вычитания пьедестала (рис. 1).

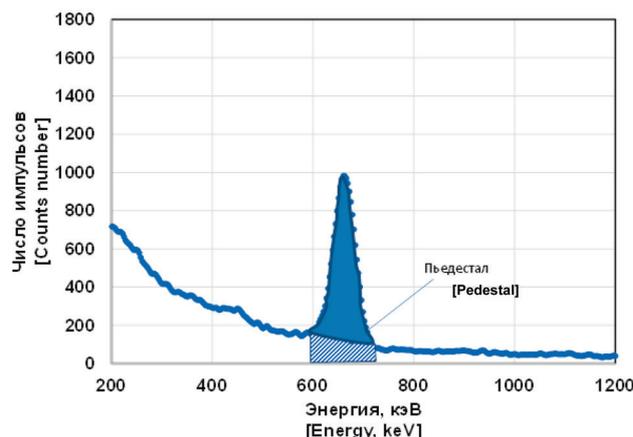


Рис. 1. Иллюстрация метода расчета площади фотопика путем вычитания пьедестала
[Fig. 1. The illustration method of the photopeak area calculation by subtracting of the pedestal]

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты измерений счетных образцов, приготовленных из объемных градуировочных сред на основе опилок, пластмассовых гранул и кварцевого песка. Измерения выполнены в измерительной емкости объемом 250 мл, диаметром 70 мм.

Сопоставляя результаты, приведенные в таблице 1, можно видеть, что с увеличением объема проб вне зависимости от плотности образцов скорость счета возрастает, но темп прироста скорости счета с увеличением

Результаты измерений счетных образцов и расчета средних значений градуировочных соотношений для проб различной плотности и объема

Таблица 1

Results of measurements of counting samples and calculation of average calibration ratios for samples of different density and volume]

[Table 1

Материал пробы [Sample material]	Объем, мл [Volume, ml]	Активность (A), Бк [Activity (A), Bq]	Скорость счета (N), имп/с [Counting rate (N), imp / s]	Стандартное отклонение N, имп/с [St/ dev N, cps]	Отношение A/N Бк на имп/с [Ratio A / N, Bq on cps]	Стандартное отклонение A/N, имп/с [St/ dev A/N, cps]
Опилки [Sawdus]	50	105	5,99	0,13	17,61	0,38
	100	211	9,62	0,08	21,92	0,18
	150	312	12,30	0,36	25,39	0,43
	200	418	14,37	0,85	29,16	2,11
	250	527	16,07	0,31	32,42	1,21
Пластмассовые гранулы [Plastic granules]	50	157	8,24	0,31	19,08	0,92
	100	312	12,80	0,17	24,38	0,81
	150	452	15,63	0,25	28,85	0,88
	200	587	17,47	0,25	33,60	0,27
Кварцевый песок [Quartz sand]	250	741	18,97	0,06	39,06	0,42
	50	357	16,27	0,15	21,97	0,31
	100	652	23,20	0,72	28,10	0,21
	150	963	27,80	0,87	34,65	0,43
	200	1273	31,33	0,50	40,62	0,31
	250	1616	33,37	0,65	48,45	1,77

объема замедляется, что естественно, поскольку эффективность регистрации активности, находящейся в верхней части измерительной емкости в силу отдаленности от детектора меньше. В то же время отношение активности к скорости счета возрастает линейно с объемом, во всяком случае, до объема счетного образца 250 мл и высоты 6,5 см (рис. 2). Аналогичные по форме зависимости имеют место и для измерительной емкости 500 мл.

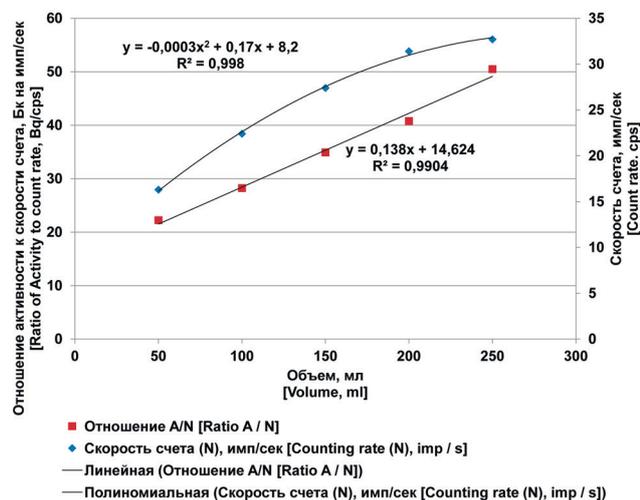


Рис. 2. Зависимости от объема счетного образца скорости счета (вертикальная ось справа) от объема и отношения активности к скорости счета (вертикальная ось слева)

[Fig. 2. Dependences of the counting rate on the volume (vertical axis on the right) on the volume and the ratio of activity to the counting rate on the volume (vertical axis on the left)]

Графики отношения активности опилок, пластмассовых гранул и кварцевого песка к скорости счета в зависимости от объема показаны на рисунке 3. Тренды отношений на всех представленных на рисунке 3 графиках описываются линейными зависимостями с коэффициентами корреляции, близкими к 1.

Представленные на рисунке 3 уравнения линий тренда характеризуются примерно одинаковыми величинами

свободных членов (14,24; 14,24 и 15,11) и определяют значения градуировочных коэффициентов при нулевом объеме пробы (бесконечно тонкий плоский источник). Небольшие расхождения этих значений могут быть связаны с неопределенностями удельной активности используемых для градуировки объемных образцовых сред и коэффициентов наклона линий тренда, обусловленных ошибками измерения объема и массы при подготовке счетного образца. Теоретически свободные члены всех 3 уравнений должны совпадать, поскольку при нулевом объеме отсутствует самопоглощение гамма-излучения в веществе пробы.

В основу универсального градуировочного соотношения положено соотношение для гранул, уравнение линии тренда которого показано на рисунке 3 в центре. Перепишем его в несколько ином виде:

$$\frac{A}{N} = 0,1 \cdot V + 14,24 \quad (1)$$

где $\frac{A}{N}$ – соотношение между активностью пробы в Бк и скоростью счета в имп/с;

V – объем пробы, мл.

Активность пробы в соответствии с соотношением 1 определяется следующим образом:

$$A = N \cdot (0,1 \cdot V + 14,24); \quad (2)$$

Поскольку при измерении пробы плотность образца может отличаться от плотности гранул, необходимо сделать поправку на коэффициент наклона, соответствующего фактической плотности измеряемого образца. Такой учет выполнен на основе данных, представленных в таблице 2.

Величина поправочного коэффициента рассчитана путем нормирования коэффициентов наклона для опилок и песка на коэффициент наклона для гранул. Поправочный коэффициент для гранул принят при этом за 1.

На рисунке 4 построена линия тренда, характеризующая зависимость поправочного коэффициента от плотности измеряемого образца.

Уравнение линии тренда на рисунке 4 определяет величину поправки к коэффициенту наклона для проб раз-

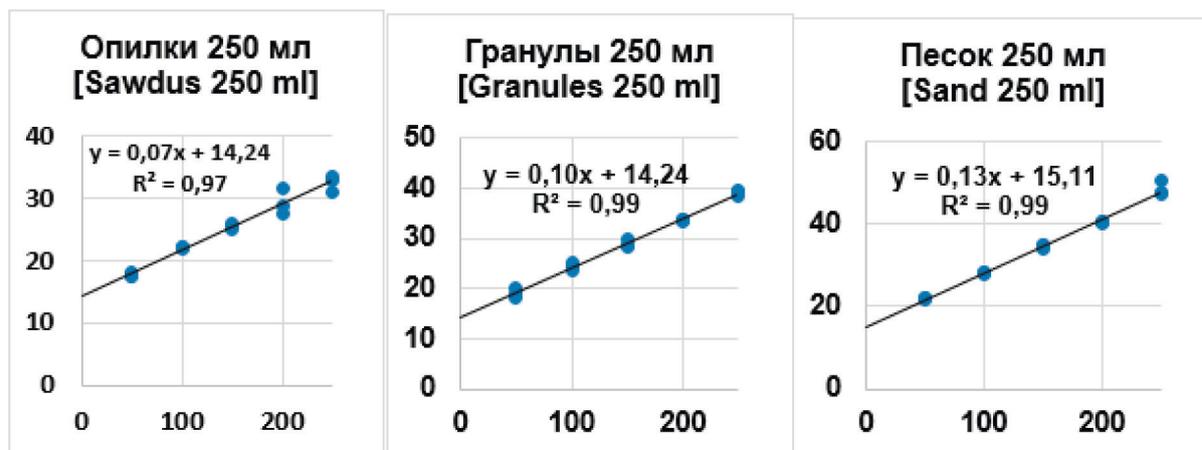


Рис. 3. Зависимость соотношения между активностью (Бк) и скоростью счета образца (имп/с) от объема пробы (по оси X – объем пробы, мл; по оси Y – скорость счета, имп/с)

[Fig. 2. Dependence of the ratio between the activity (Bq) and the sample count rate (counts / sec) from volume (X-axis – sample volume, ml; Y-axis – count rate, counts / sec)]

Таблица 2

Значения поправочных коэффициентов наклона для опилок и песка при использовании градуировочного графика для гранул

[Table2

Slope correction values for sawdust and sand when using the calibration curve for granules]

Материал пробы [Sample material]	Плотность, г/см ³ [Density, g / cm ³]	Коэффициент наклона [Slope coefficient]	Поправочный коэффициент [Correction factor]
Опилки [Sawdust]	0,18	0,07	0,7
Гранулы [Granules]	0,92	0,10	1,0
Песок [Sand]	1,65	0,13	1,3

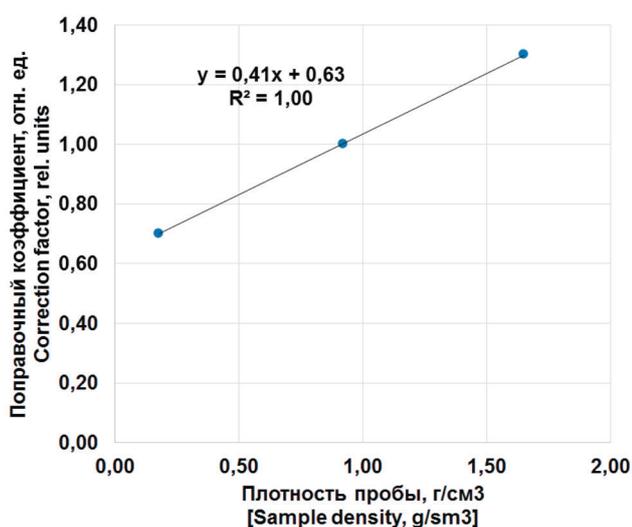


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента от плотности измеряемого образца
[Fig. 4. Dependence of the correction factor from a density of samples]

личной плотности при использовании градуировочного коэффициента для гранул (уравнение 2), плотность которых равна 0,92 г/см³.

Перепишем это уравнение для определения поправочного коэффициента K_{slope} в очевидном виде, где вместо переменной «x» – плотности счетного образца поставим отношение массы к объему счетного образца

$$K_{slope} = 0,41 \cdot \frac{M}{V} + 0,63, \quad (3)$$

где M – масса счетного образца, г;
V – объем счетного образца, см³.

После подстановки в уравнение 2 поправочного коэффициента окончательная форма универсального градуировочного соотношения для определения активности пробы произвольного объема и плотности для измерительной емкости 250 мл будет выглядеть следующим образом:

$$A = N \cdot (0,1 \cdot K_{slope} \cdot V + 14,24) \text{ или}$$

$$A = N \cdot (0,1 \cdot (0,41 \cdot \frac{M}{V} + 0,63) \cdot V + 14,24) \quad (4)$$

В окончательном виде после перемножения и округления коэффициентов до одной значащей цифры после запятой получим:

$$A = N \cdot (0,04 \cdot M + 0,06 \cdot V + 14,2) \quad (5)$$

Для тестирования приведенного соотношения (5) была проведена серия независимых измерений проб, приготовленных из опилок, гранул и песка. Результаты тестирования показали, что ошибка расхождений расчетных и фактических результатов не превышает 10% (рис. 5).

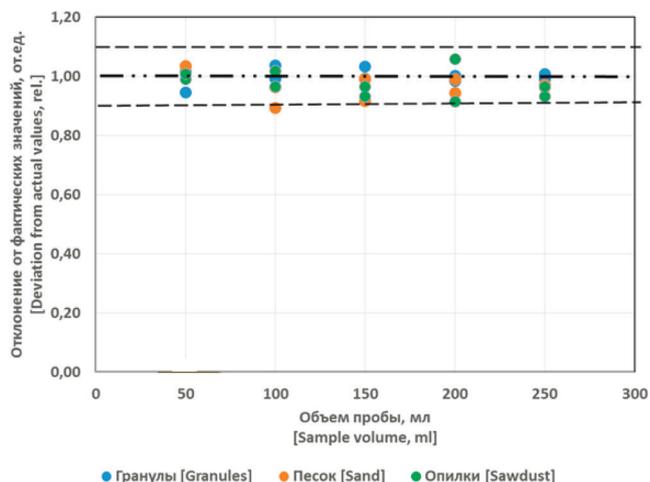


Рис. 5. Отношение активности счетных образцов, рассчитанной с помощью соотношения (5) к фактическим значениям их активности

[Fig. 5. The ratio of the activity of counting samples, calculated using the ratio (5) to the actual values of their activity]

Таким образом, на основе тестирования полученного универсального градуировочного соотношения, как это видно из рисунка 5, величина ошибки для проб разного объема и плотности не превысит 10%.

Из таблицы 1 видно, что верхние слои счетных образцов, приготовленных в измерительной емкости диамет-

ром 70 мм, дают незначительную добавку к интенсивности счета по сравнению с нижними слоями, поэтому при увеличении диаметра измерительной емкости эффективность счета активности, находящейся в верхних слоях, должна быть выше. Для получения возможности измерять пробы объемом более 250 мл была проведена аналогичная серия градуировочных измерений для емкости 500 мл с диаметром 90 мм. В результате произведенных измерений было получено новое универсальное градуировочное соотношение (6):

$$A = N \cdot (0,025 \cdot M + 0,032 \cdot V + 14,5) \quad (6)$$

Для сравнения калибровочных соотношений 5 и 6 были произведены расчеты значений активности A от объема пробы для гранул плотностью 1 г/см^3 и песка плотностью $1,7 \text{ г/см}^3$. Расчеты произведены при условии, что интенсивность счета цезия-137 в пробах вне зависимости от объема составляет 1 имп/с . Масса измеряемого образца рассчитывалась путем умножения объема пробы на плотность вещества (гранул и песка соответственно).

На рисунке 6 приведены графики зависимости активности пробы от объема для 2 вариантов измерений: в измерительной емкости диаметром 70 мм и в измерительной емкости диаметром 90 мм.

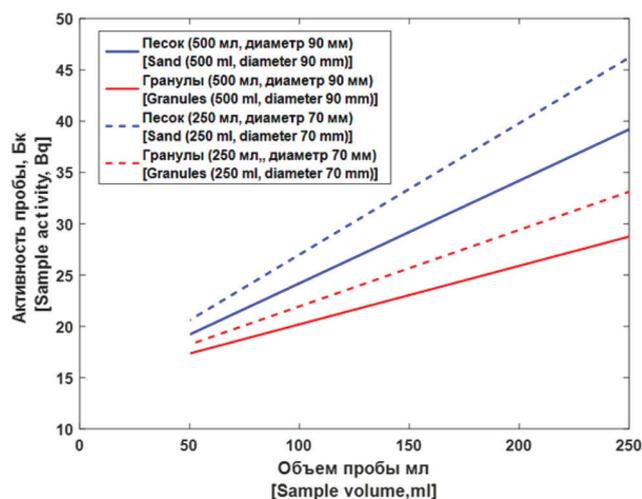


Рис. 6. Зависимость расчетных значений активности ^{137}Cs от объема пробы при скорости счета 1 имп/с для вариантов измерений в емкостях диаметром 70 мм и 90 мм

[Fig. 6. Dependence of the calculated values of ^{137}Cs activity on the sample volume at a counting rate of 1 cps for measurement options in containers with a diameter of 70 and 90 mm]

Из рисунка 6 видно, что при измерениях, выполняемых в измерительной емкости 90 мм, на 1 имп/с приходится меньшее количество Беккерелей, чем в емкости 70 мм, то есть при одной и той же активности в емкости 70 мм и в емкости 90 мм емкость с диаметром 90 мм позволяет получить в единицу времени большее количество импульсов счета, то есть эффективность

регистрации, выражаемая в имп/с на Бк, становится выше.

Результаты исследования и сопоставление градуировочных соотношений, полученных в процессе калибровки, показали, что при измерении проб нестандартного объема в диапазоне до 500 мл 2 измерительные емкости разного диаметра позволяют выбрать оптимальный вариант измерений для широкого диапазона плотностей выпадений.

Заключение

Результаты выполненной работы показывают, что при гамма-спектрометрическом измерении ^{137}Cs с детектором NaI(Tl) в пробах нестандартного объема с различной плотностью можно получить универсальное градуировочное соотношение, позволяющее произвести оперативный расчет активности счетного образца или удельной активности, используя 3 параметра: интенсивность счета под пиком полного поглощения, массу счетного образца и объем.

Для детектора NaI(Tl) размером $63 \times 63 \text{ мм}$ получены 2 градуировочных соотношения:

$A = N \cdot (0,04 \cdot M + 0,06 \cdot V + 14,2)$ – для измерительной емкости с диаметром 70 мм (объем 250 мл) и

$A = N \cdot (0,025 \cdot M + 0,032 \cdot V + 14,5)$ – для измерительной емкости с диаметром 90 мм (объем 500 мл).

Тестирование полученных соотношений для проб плотностью от $0,12$ до $1,64 \text{ г/см}^3$ показало, что ошибка в определении активности не превышает 10% .

Использование универсальных градуировочных соотношений позволяет расширить измерительные возможности спектрометра для проб объемом до 500 мл при плотности от $0,12$ до $1,6 \text{ г/см}^3$.

Литература

1. Вартанов Н.А., Самойлов П.С. Прикладная сцинтилляционная гамма-спектрометрия. Москва.: Атомиздат, 1969. 463 с.
2. Трошин В.С. Характеристики радионуклидов для градуировки гамма-спектрометров: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений. Москва.: НИЯУ МИФИ, 2011. 101 с.
3. Характеристика прибора «Прогресс-гамма» URL: <https://www.doza.ru/catalog/spectrometers/3/> (дата обращения: 30.09.2021).
4. Характеристика прибора МКГБ-01. URL: <https://www.radek.ru/product/Spektrometry--radiometry-gamma---beta--i-alfa-izlucheniya/23/> (дата обращения: 25.09.2021).
5. Характеристика прибора «МУЛЬТИРАД-гамма». URL: <https://amplituda.ru/catalog/radiatsionnyy-kontrol/oborudovanie-radiatsionnogo-kontrolya-2/spektrometry-i-radiometry/>. (дата обращения: 30.09.2021).
6. Гаврин В.Н. Низкофоновый полупроводниковый гамма-спектрометр для измерения сверхнизких концентраций ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th . М.: ИЯИ, 1986. 28 с.
7. Добрынин Ю.Л., Кузьмич В.В. Метод полевой полупроводниковой гамма-спектрометрии для радиоэкологических исследований (реализация расчетных моделей). М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. 20 с.

Поступила: 14.10.2021 г.

Седнев Константин Андреевич – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории аварийного реагирования 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

Некрасов Владислав Аркадьевич – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника лаборатории внешнего облучения 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 Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией 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, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Repin@mail.ru

Для цитирования: Седнев К.А., Некрасов В.А., Репин В.С. Универсальная градуировка сцинтилляционного спектрометра-детектора NaI(Tl) при измерении активности ^{137}Cs в светящихся образцах произвольной плотности и объема // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. – С. 96-102. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-96-102

Universal calibration of a scintillation spectrometer with a NaI(Tl) detector when measuring ^{137}Cs activity in counting samples of arbitrary density and volume

Konstantin A. Sednev, Vladislav A. Nekrasov, Victor S. Repin

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 proposes an empirical method for constructing a universal calibration for a scintillation gamma spectrometer, which allows determining the activity and specific activity of ^{137}Cs with an accuracy of no more than 15% in counting samples of arbitrary density and volume in cylindrical containers with a volume of 250 ml and 500 ml. To construct calibration ratios, measurements of ^{137}Cs sample media prepared on the basis of materials of different densities (quartz sand, plastic granules and sawdust) were performed. The calibration was carried out by preparing samples from the listed materials with a volume of 50 to 250 ml in increments of 50 ml for a 250 ml container and 100-500 ml in increments of 100 ml for a 500 ml container. Along with taking into account the volume of the counting sample, its weighing was also carried out. The result of the measurements performed for each material was the ratio of the activity of the counting sample to the counting intensity in the ^{137}Cs window, depending on the volume. The universal calibration factor is obtained by taking into account the counting rate from the mass and volume of the sample for the corresponding measuring vessel.

Key words: scintillation gamma spectrometry, calibration coefficient, counting sample, mass, volume.

References

1. Vartanov NA., Samoilov PS. Applied scintillation gamma spectrometry. Moscow: Atomizdat; 1969. 463 p. (In Russian).
2. Troshin VS Characteristics of radionuclides for the calibration of gamma spectrometers: study guide for university students. Moscow: NRNU MEPhI; 2011. 101 p. (In Russian).
3. Characteristics of the «Progress-gamma» device. Available on: <https://www.doza.ru/catalog/spectrometers/3/> (Accessed: 30.09.2021).
4. Characteristics of the device MKGB-01. Available on: <https://www.radek.ru/product/Spektrometry---radiometry-gamma--beta--i-alfa-izlucheniya/23/> (Accessed: 25.09.2021).
5. Characteristics of the device MULTIRAD-gamma. Available on: <https://amplituda.ru/catalog/radiatsionny-control/oborudovanie-radiatsionnogo-kontrolya-2/spektrometry-i-radiometry/> (Accessed: 30.09.2021).
6. Gavrin VN. Low background semiconductor gamma spectrometer for measuring ultra-low concentrations ^{238}I , ^{226}Ra , ^{232}Th . INR; 1986. 28 p. (In Russian).
7. Dobrynin YL, Kuzmich VV. Field semiconductor gamma spectrometry method for radioecological research (implementation of computational models). Moscow: TsNIatominform; 1989. 20 p. (In Russian).

Received: October 14, 2021

Viktor S. Repin

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru

Konstantin A. Sednev – Acting junior 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, Saint-Petersburg, Russia

Vladislav A. Nekrasov – Acting junior 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, Saint-Petersburg, Russia

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory 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: v.repin@mail.ru)

For citation: Sednev K.A., Nekrasov V.A., Repin V.S. Universal calibration of a scintillation spectrometer with a NaI(Tl) detector when measuring ¹³⁷Cs activity in counting samples of arbitrary density and volume. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 96-102. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-96-102.

Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г.

А.Н. Барковский¹, Руслан Р. Ахматдинов¹, Рустам Р. Ахматдинов¹, Н.К. Барышков¹, А.М. Библин¹,
А.А. Братилова¹, В.Е. Журавлева³, Т.А. Кормановская¹, С.И. Кувшинников², А.Г. Сивенков³,
О.Е. Тутельян², А.Г. Цовьянов³

¹ 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

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

³ Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна, Москва, Россия

В статье представлены дозы техногенного облучения персонала и населения за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов, облучения населения за счет природных источников и медицинского облучения пациентов, полученные на основе анализа данных Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации за 2020 г. Анализировались данные, содержащиеся в формах федерального статистического наблюдения № 1-ДОЗ, № 2-ДОЗ, № 3-ДОЗ и № 4-ДОЗ за 2020 г. организаций и территорий, государственный санитарно-эпидемиологический надзор за которыми осуществляется Роспотребнадзором и органами госсанэпиднадзора Федерального медико-биологического агентства России. В статье использованы также данные, полученные в рамках радиационно-гигиенической паспортизации. В 2020 г. 19 737 организаций, осуществляющие обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения, представили формы № 1-ДОЗ, содержащие сведения о дозах облучения персонала общей численностью 251 621 человек, из которых 230 318 человек – персонал группы А и 21 303 человека – персонал группы Б, для которого дозы получены по результатам индивидуального дозиметрического контроля. По данным Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации, средняя индивидуальная годовая эффективная доза техногенного облучения персонала группы А в 2020 г. составила 1,11 мЗв, а персонала группы Б – 0,63 мЗв. В 2020 г. имели место 6 случаев превышения среднегодового предела эффективной дозы (20 мЗв) для персонала группы А и 18 случаев превышения среднегодового предела эффективной дозы (5 мЗв) для персонала группы Б. Общее число рентгенорадиологических диагностических процедур, проведенных в Российской Федерации в 2020 г., составило более 275,4 млн, или 1,83 процедуры на 1 жителя. Средняя годовая эффективная доза медицинского облучения в расчете на 1 жителя России в 2020 г. составила 0,81 мЗв, причем 73,8% этой дозы – за счет компьютерной томографии. Средняя доза на одну процедуру составила 0,44 мЗв. Средняя годовая эффективная доза облучения жителей Российской Федерации за счет природных источников, по данным всех измерений, за период с 2001 по 2020 г. составила 3,36 мЗв в год, из которых более 59% определяются ингаляционным поступлением изотопов радона и их долгоживущих продуктов распада. Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения жителей субъектов Российской Федерации в 2020 г. находилась в диапазоне от 2,47 мЗв (Камчатский край) до 9,06 мЗв (Республика Алтай) при среднем значении для Российской Федерации 4,18 мЗв. Для 8 субъектов Российской Федерации средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения жителей в 2020 г. превысила 5 мЗв: Республики Бурятия (5,31 мЗв), Алтай (9,06 мЗв), Тыва (6,31 мЗв), Магаданская (5,07 мЗв) и Иркутская (6,13 мЗв) области, Ставропольский (6,31 мЗв) и Забайкальский (8,19 мЗв) края и Еврейская автономная область (6,77 мЗв).

Ключевые слова: годовые эффективные дозы облучения, природное облучение, медицинское облучение, техногенное облучение, персонал, пациенты, население, Единая государственная система контроля индивидуальных доз.

Барковский Анатолий Николаевич

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

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

Введение

Информация о дозах техногенного, медицинского и природного облучения населения ежегодно публикуется в информационных сборниках «Дозы облучения населения Российской Федерации» [1–19]. В настоящей статье приводятся дозы облучения населения Российской Федерации, полученные в результате проведенного анализа данных ЕСКИД за 2020 г., с учетом данных радиационно-гигиенических паспортов субъектов Российской Федерации и радиационно-гигиенического паспорта России за 2020 г. [20]. Подробные данные о дозах облучения населения Российской Федерации за 2020 г. опубликованы в информационном сборнике «Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г.» [21].

Дозы персонала

Общее количество радиационных объектов, представивших форму № 1-ДОЗ за 2020 г., составило 19 737, из которых 15 433 (78%) – медицинские учреждения. Необходимо отметить, что при анализе данных учитывались данные, представленные не только радиационными объектами, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, но и радиационными объектами, обслуживаемыми ФМБА России. На рисунке 1 приведены данные о количестве радиационных объектов, представленные которыми формы № 1-ДОЗ использовались для подготовки информационных сборников в различные годы. Как видно из рисунка, число таких радиационных объектов постоянно увеличивается.

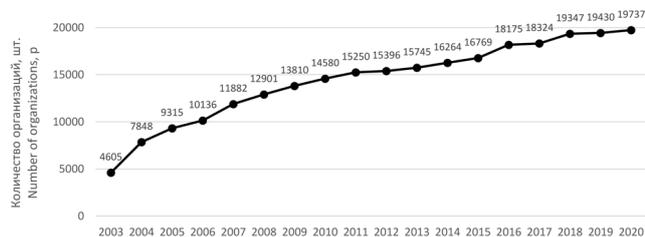


Рис. 1. Динамика количества радиационных объектов, формы федерального государственного статистического наблюдения № 1-ДОЗ которых использовались при подготовке информационных сборников за 2003–2020 гг.

[Fig. 1. Dynamics of number of organizations submitted form № 1-DOZ in the Federal Data base of Rosпотребнадзор from 2003 to 2020]

Численность персонала радиационных объектов, отчеты по форме № 1-ДОЗ за 2020 г. которых включены в Федеральный банк данных Роспотребнадзора, составила 162 056 человек, из которых 148 822 человека – персонал группы А и 13 234 человека – персонал группы Б, дозы облучения которого получены по данным инструментального контроля. С учетом данных о 591 радиационном объекте, обслуживаемом ФМБА России, общая численность персонала, сведения о дозах облучения которого включены в федеральные банки данных, составляет 251 621 человек, из которых 230 318 человек – персонал группы А и 21 303 человека – персонал группы Б.

На рисунке 2 приведены данные по динамике численности персонала, данные о котором были включены в информационные сборники за период с 2003 по 2020 г.

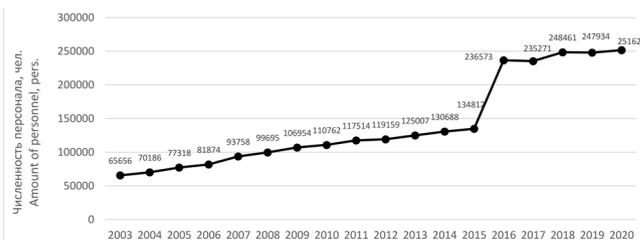


Рис. 2. Динамика численности персонала, данные о котором были включены в информационные сборники с 2003 по 2020 г. [Fig. 2. The amount of personnel, for which the annual individual doses are submitted in Federal Data Base of personnel exposure doses from 2003 to 2020]

Как видно, по сравнению с данными за 2019 г., численность персонала, включенного в информационный сборник в 2020 г., увеличилась на 3687 чел. за счет увеличения на 303 количества радиационных объектов, представивших формы № 1-ДОЗ.

Фактическая численность персонала, индивидуальные дозы облучения которого отражены в формах № 1-ДОЗ, несколько меньше, поскольку лица, совмещающие свою работу в нескольких организациях, учитываются в этих формах несколько раз. Количество работников, осуществляющих работу с техногенными источниками ионизирующего излучения по совместительству на нескольких радиационных объектах, в 2020 г. составило 9353 человека. Средняя индивидуальная доза в этой группе персонала, с учетом всех мест их работы, составила 1,83 мЗв/г, что в 1,6 раза превышает среднюю индивидуальную дозу всего персонала группы А Российской Федерации за 2020 г. – 1,11 мЗв.

На рисунке 3 представлены данные о динамике численности персонала, совмещающего работу на нескольких радиационных объектах.

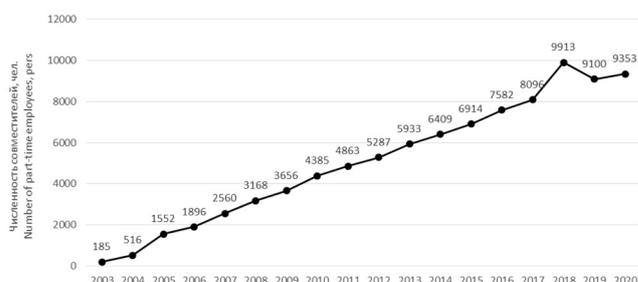


Рис. 3. Численность персонала, работающего по совместительству на нескольких радиационных объектах [Fig. 3. The amount of personnel working part-time at several radiation facilities]

Коллективная эффективная доза техногенного облучения персонала за счет нормальной эксплуатации радиационных объектов составила в 2020 г. 269,7 чел.-Зв, из которых 256,4 чел.-Зв приходится на персонал группы А. Это составляет менее 0,3% от коллективной дозы населения Российской Федерации за счет всех источников ионизирующего излучения.

Средняя годовая индивидуальная эффективная доза техногенного облучения персонала в 2020 г. составила 1,11 мЗв для персонала группы А и 0,63 мЗв для персонала группы Б.

В 2020 г. не зарегистрировано ни одного случая превышения предела дозы для персонала, но зарегистрировано 6 случаев превышения среднегодового предела эффективной дозы (20 мЗв/год) для персонала группы А и 18 случаев превышения среднегодового предела эффективной дозы (5 мЗв/год) для персонала группы Б.

На рисунке 4 представлена динамика количества превышений предела дозы и среднегодового предела дозы для персонала группы А и группы Б за период 2003–2020 гг. Как видно из рисунка 4, общее количество зарегистрированных превышений среднегодового предела дозы за период с 2010 по 2020 г. для персонала группы Б (150) превышает соответствующую величину для персонала группы А (145), причем абсолютное большинство превышений для персонала группы Б регистрируются в медучреждениях. Это говорит об актуальности проблемы определения категорий медработников из числа персонала группы Б, для которых необходим индивидуальный дозиметрический контроль.

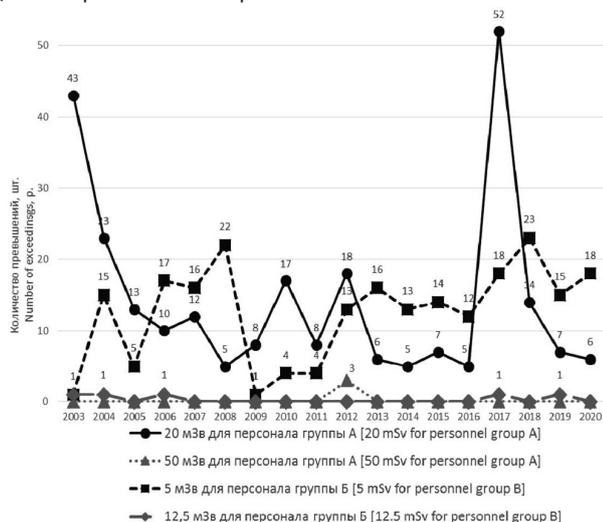


Рис. 4. Количество персонала с годовой индивидуальной эффективной дозой производственного облучения более 20/50 мЗв/год для персонала группы А и более 5/12,5 мЗв/год для персонала группы Б

[Fig. 4. The number of personnel with an annual individual effective dose of technogenic exposure of more than 20/50 mSv/year for Group A personnel and more than 5/12.5 mSv/year for Group B personnel]

Средние индивидуальные годовые эффективные дозы облучения персонала всех субъектов Российской Федерации в 2020 г. были существенно ниже основных пределов дозы, регламентированных Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009. Максимальные значения средней по субъекту Российской Федерации индивидуальной годовой эффективной дозы техногенного облучения персонала группы А в 2020 г. имели место в Чукотском АО (2,45 мЗв), Пермском крае (2,36 мЗв), Республике Бурятия (2,17 мЗв) и Ульяновской области (2,06 мЗв) при средней дозе по России 1,11 мЗв/год.

Максимальная годовая индивидуальная доза персонала группы А в 2020 г. составила 26,4 мЗв и была получена на ОАО «ПО «Севмаш» в Архангельской области.

Структура индивидуальных доз техногенного облучения персонала группы А в 2020 г. приведена в таблице 1.

На территории Российской Федерации действуют радиационные объекты, надзор за которыми осуществляют органы госсанэпиднадзора МО России, МВД России, ФСБ России, ФСИН России, УДП России и Росгвардии. Данные об индивидуальных дозах работающего на них персонала не поступают в Федеральный банк данных. Но обобщенные данные о дозах облучения этих категорий персонала представляются в радиационно-гигиенический паспорт России. В таблице 2 представлены данные о численности персонала группы А и Б радиационных объектов МО России, МВД России, ФСБ России, ФСИН России, УДП России и Росгвардии, которые отражены в радиационно-гигиеническом паспорте Российской Федерации за 2020 г. [20].

С учетом этих данных, общая численность персонала группы А в Российской Федерации составит 270 741 человек, а коллективная доза персонала – 287,9 чел.-Зв.

Дозы медицинского облучения пациентов

При проведении оценки доз медицинского облучения населения Российской Федерации были учтены данные, представленные медучреждениями, надзор за которыми осуществляет Роспотребнадзор, а также органы госсанэпиднадзора ФМБА России, МО России, МВД России, ФСБ России, УДП России, ФСИН России и Росгвардии. Суммарное количество диагностических рентгенорадиологических процедур, проведенных в медучреждениях Российской Федерации в 2020 г., составило 275,4 млн, что на 10% меньше соответствующих данных за 2019 г. (306,5 млн). При этом коллективная

Структура индивидуальных доз персонала группы А и группы Б в 2020 г.

Таблица 1

Structure of individual doses to the group A and group B personnel in 2020

[Table 1

Диапазон доз, мЗв [Dose range, mSv]	Персонал группы А [Amount of A personnel]		Персонал группы Б [Amount of B personnel]	
	чел.	%	чел.	%
0–1	146 198	63,5	16 540	77,6
1–2	61 585	26,7	4 391	20,6
2–5	16 408	7,1	354	1,7
5–12,5	5 286	2,3	18	0,07
12,5–20	8355	0,4	–	–
20–50	6	0,003	–	–
Всего [Total]	230 318		21 303	

Таблица 2

Дозы персонала радиационных объектов МО России, МВД России, ФСБ России, ФСИН России, УДП России и Росгвардии
[Table 2]

Doses to the radiation facilities personnel of the Russian Defense Ministry, the Ministry of Internal Affairs of Russia, the FSB of Russia, the FSIN of Russia, the Administrative Directorate of the President of the Russian Federation and the Rosgvardiya]

п/п [No]	Ведомство [authority]	Персонал группы А [Amount of A personnel]			Персонал группы Б [Amount of B personnel]		
		Числ. [Amount of personnel] чел.	КД [Collective dose] чел.-Зв [manSv/ year]	СИД [Average individ- ual dose] мЗв/чел. [mSv/ year]	Числ. [Amount of personnel] чел.	КД [Collective dose] чел.-Зв [manSv/year]	СИД [Average indi- vidual dose] мЗв/чел. [mSv/year]
1.	МО России [Russian Defense Ministry]	14 420	12,8*	0,89*	4 073	-	-
2.	МВД России [Ministry of Internal Affairs of Russia]	1 133	0,86	0,76	137	0,096	0,70
3.	ФСБ России [FSB of Russia]	1 326	1,34	1,01	167	0,05	0,93
4.	ФСИН России [FSIN of Russia]	1 385	1,03	0,74	5	0,003	0,74
5.	УДП России [Administrative Directorate of the President of the Russian Federation]	660	0,97	1,46	111	0,18	1,48
6.	Росгвардия [Rosgvardiya]	196	1,08	1,08	9	-	-
	ВСЕГО [Total]	19 120	18,1	0,95	4 502	0,07	0,69

* – суммарные данные для персонала группы А и группы Б [* – summary data for group A and group B personnel.]

доза медицинского облучения возросла на 33% и составила 119,9 тыс. чел.-Зв. за счет резкого роста (на 59%) количества проведенных в 2020 г. компьютерных томографий, связанного с пандемией коронавирусной инфекции. Средняя годовая доза медицинского облучения в расчете на одного жителя Российской Федерации также возросла с 0,60 мЗв в 2019 г. до 0,81 мЗв в 2020 г.

На рисунке 5 представлена динамика количества проведенных рентгенорадиологических процедур, а на рисунке 6 –



Рис. 5. Годовое количество рентгенорадиологических процедур, проводимых в Российской Федерации с 2015 по 2020 г.

[Fig. 5. Amount of X-ray examinations, for which the data are submitted in the Federal Data Base of medical exposure doses in the period from 2015 to 2020]

динамика коллективной дозы медицинского облучения за период с 2015 по 2020 г. Как видно, общее количество рентгенорадиологических процедур по сравнению с 2019 г. уменьшилось на 10%, а коллективная доза медицинского облучения увеличилась на 33%. При этом количество проведенных компьютерных томографий в 2020 г. по сравнению с 2019 г. возросло на 55% и вклад компью-

Коллективная доза облучения, чел.-Зв
Collective dose, manSv/year

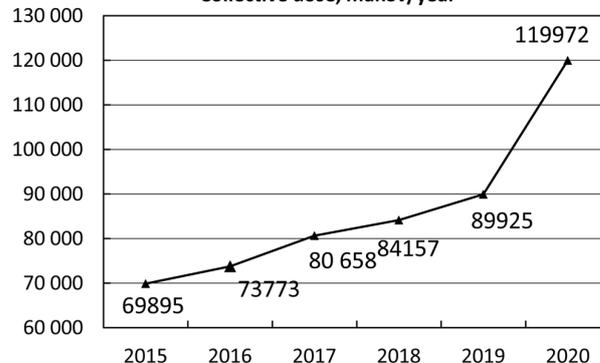


Рис. 6. Годовая коллективная доза медицинского облучения за счет рентгенорадиологических процедур в период с 2015 по 2020 г.

[Fig. 6. Collective dose of medical exposure due to X-ray procedures for which the data are submitted in the Federal Data Base of medical exposure doses in the period from 2015 to 2020]

терной томографии в дозу медицинского облучения в 2020 г. составил 73,8%, при том что их количество составило всего 7,9%.

С ростом количества проведенных компьютерных томографий в значительной мере связан и рост средних доз медицинского облучения в расчете на одну процедуру и в расчете на одного жителя. В таблице 3 представлены данные по динамике средних доз медицинского облучения за период 2015–2020 гг.

Дозы за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона

Всего в Российской Федерации в 2020 г. было выполнено 132 697 измерений мощности амбиентной дозы (МАД) гамма-излучения на открытой местности на территории населенных пунктов и 101 543 измерения МАД гамма-излучения в жилых и общественных зданиях различных типов, из которых 5044 измерения МАД гамма-излучения было проведено в деревянных (Д) зданиях, 7418 – в каменных малоэтажных (1К) домах и 89 081 – в каменных многоэтажных (МК).

Диапазон средних по регионам значений МАД гамма-излучения на открытой местности на территории населенных пунктов в 2020 г. составил 0,05–0,17 мкЗв/ч, в деревянных зданиях – 0,06–0,21 мкЗв/ч, в каменных малоэтажных и многоэтажных зданиях – 0,06–0,20 мкЗв/ч и 0,04–0,20 мкЗв/ч соответственно.

Уровни воздействия природных источников излучения на конкретной территории достаточно стабильны, поэтому наиболее объективными оценками средних индивидуальных годовых эффективных доз природного облучения населения являются оценки, выполненные на основе всех

имеющихся данных измерений в течение всего времени исследований – с 2001 по 2020 г. С учетом всех данных, значения средних годовых эффективных доз внешнего терригенного облучения жителей субъектов Российской Федерации в 2020 г. лежат в диапазоне от 0,46 мЗв (Костромская область) до 1,05 мЗв (Забайкальский край)

В 2020 г. на территории России было выполнено 46 204 измерения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона и объемной активности (ОА) радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий, в том числе 2842 измерения было проведено в деревянных зданиях, 3665 – в каменных малоэтажных домах и 39 697 – в каменных многоэтажных. По сравнению с предыдущим годом (55 897 измерений) снижение объема выполненных измерений ЭРОА изотопов радона и ОА радона в жилых и общественных зданиях составило приблизительно 1,5 раза, что связано с пандемией.

Средние по регионам значения измерений ЭРОА изотопов радона за 2020 г. находятся в диапазоне: 6–172 Бк/м³ – для деревянных домов; 6–111 Бк/м³ – для одноэтажных каменных домов; 6–164 Бк/м³ – для многоэтажных каменных домов. Значения средних годовых эффективных доз внутреннего облучения жителей субъектов Российской Федерации за счет ингаляции изотопов радона в 2020 г. (по всем измерениям 2001–2020 гг.) лежат в диапазоне от 0,77 мЗв/год (Ненецкий АО) до 7,24 мЗв/год (Республика Алтай). Вариабельность средних по регионам доз облучения жителей за счет радона в 2020 г. составила почти 10 раз.

В 2020 г. на территории Российской Федерации было проведено 18 004 исследования уровней содержания природных радионуклидов (ПРН) в питьевой воде (табл. 4), основную часть которых – 13 357 – составляют

Таблица 3

Средние годовые эффективные дозы медицинского облучения в расчете на одного жителя и на одну рентгенорадиологическую процедуру

[Table 3

Average annual effective doses of medical exposure per capita and for one X-ray examination]

Год [Year]	2015	2016	2017	2018	2019	2020
СИД*, мЗв на жителя [AAED*, mSv per capita]	0,47	0,49	0,55	0,57	0,61	0,81
СИД, мЗв на процедуру [AAED*, mSv per examination]	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31	0,44

* – средняя годовая эффективная доза медицинского облучения [* – average annual effective doses of medical exposure]

Таблица 4

Информация о проведенных в 2020 г. исследованиях питьевой воды

[Table 4

Information on drinking water research carried out in 2020]

Радионуклид [Radionuclide]	Количество исследований [Number of studies]	Диапазон удельной активности, мБк/кг [Specific activity range, mBq / kg]
²²⁶ Ra	989	0,5–337,9
²²⁸ Ra	931	0,5–195,3
²¹⁰ Pb	919	2,0–90,0
²¹⁰ Po	997	0,9–37,8
²³⁸ U+ ²³⁴ U	811	2,0–1022
²²² Rn	13 357	1 000–92 300

анализы содержания в питьевой воде ^{222}Rn . По сравнению с предыдущим годом объем выполненных исследований радиационных показателей питьевой воды снизился в меньшей мере, чем для значений МАД гамма-излучения и ЭРОА изотопов радона (в 2019 г. всего было проведено 19 444 анализа на содержание природных радионуклидов, в том числе 15 172 исследования на содержание радона). Это закономерно, поскольку эпидемиологическая ситуация в стране, в первую очередь, отразилась на исследованиях, связанных с местами пребывания людей, а допуск к источникам водоснабжения и контроль радиационных характеристик воды не ограничивался. В таблице 4 представлены количество проведенных в 2020 г. исследований и диапазон средних по субъектам Российской Федерации значений удельной активности в питьевой воде различных природных радионуклидов.

Только для Челябинской области средний показатель содержания ^{222}Rn в питьевой воде превышает уровень вмешательства (60 Бк/кг) и составляет 92 Бк/кг. К значению уровня вмешательства близок даже показатель содержания ^{222}Rn в питьевой воде в г. Челябинске (59 Бк/кг), а для отдельных районов области зафиксировано более чем двукратное превышение. В таблице 5 представлены данные о средних значениях УА ^{222}Rn в питьевой воде отдельных районов и населенных пунктов Челябинской области, превышающие установленный уровень вмешательства.

Средняя удельная активность ^{222}Rn в воде подземных источников питьевого водоснабжения Муезерского района Республики Карелия составляет 72 Бк/кг. В отдельных населенных пунктах Прионежского района региона уровни вмешательства по содержанию ^{222}Rn также превышены: п. Рыбрека – 105 Бк/кг; п. Ладва – 78 Бк/кг.

Превышения уровней вмешательства по содержанию ^{222}Rn в питьевой воде в 2020 г. фиксировались также в Республике Тыва (с. Ак-Довурак; Пии-Хемский район), Республике Хакасия (г. Черногорск; Бейский и

Орджоникидзевский районы), Новосибирской области (Болотнинский район).

С учетом всех имеющихся данных за период с 2001 по 2020 г., средняя индивидуальная годовая эффективная доза природного облучения на 1 жителя Российской Федерации составляет 3,36 мЗв/год. Средние по субъектам Российской Федерации годовые индивидуальные эффективные дозы природного облучения населения лежат в диапазоне от 2,10 мЗв (Камчатский край) до 8,60 мЗв (Республика Алтай). Доза внутреннего облучения населения за счет ингаляции изотопов радона (^{222}Rn и ^{220}Rn) и их короткоживущих дочерних продуктов распада составляет 1,99 мЗв/год (более 59% суммарной дозы за счет всех природных источников излучения).

Структура средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения природными источниками населения Российской Федерации приведена в таблице 6.

По данным исследований 2001–2020 гг., значение средней годовой эффективной дозы облучения на 1 жителя Республики Алтай природными источниками ионизирующего излучения составляет 8,60 мЗв/год и является наибольшим в Российской Федерации. Также повышенные (в интервале от 5,0 до 10,0 мЗв/год) средние дозы облучения населения природными источниками ионизирующего облучения имеют место для жителей Республики Тыва (5,63 мЗв/год), Ставропольского (5,70 мЗв/год) и Забайкальского (7,81 мЗв/год) краев, Еврейской автономной области (6,35 мЗв/год) и Иркутской области (5,23 мЗв/год). По данным объединенных измерений за период 2001–2020 гг., средняя годовая эффективная доза облучения населения природными источниками ионизирующего излучения ни для одного субъекта Российской Федерации не превысила 10,0 мЗв/год.

С учетом всех представленных данных, средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения Российской Федерации в 2020 г. оценивается ве-

Таблица 5

Средние значения удельной активности (УА) ^{222}Rn в питьевой воде отдельных районов и населенных пунктов Челябинской области

[Table 5]

Average values of volume activity (VA) of ^{222}Rn in drinking water in certain districts and settlements of the Chelyabinsk region

Район, населенный пункт [District, settlement]	Средняя УА ^{222}Rn в воде, Бк/кг [Average ^{222}Rn VA in water]
г. Миасс [Miass town]	84
Чибаркульский район [Chebarkulsky district]	96
Карталинский район [Kartalinsky district]	128
Брединский район [Bredinsky district]	79
Красноармейский район [Krasnoarmeysky district]	126
Агаповский район [Agapovsky district]	76
Верхнеуральский район [Verkhneuralsky district]	167
Кизильский район [Kizilsky district]	98
Нагайбакский район [Nagaibaksky district]	130
Варненский район [Varnensky district]	106
Пластовский район [Plastovsky district]	126

Таблица 6

Уровни и структура средней индивидуальной годовой эффективной дозы природного облучения населения Российской Федерации по данным исследований за период 2001–2020 гг.

[Table 6

Levels and structure of the average individual annual effective doses due to the natural exposure of the population of the Russian Federation according to the data for the period 2001–2020]

Компонент дозы [Source of radiation]	Средняя годовая индивидуальная доза, мЗв [Average individual annual dose, mSv]	Вклад в дозу природного облучения, % [Contribution to the dose of natural exposure, %]
⁴⁰ K	0,17	5,1
Космическое излучение [Cosmic radiation]	0,34	10,1
Внешнее терригенное излучение [External terrigenous radiation]	0,68	20,3
²²² Rn, ²²⁰ Rn и их ДПР [²²² Rn, ²²⁰ Rn and its progenies]	2,0	59,3
Пищевые продукты [Food stuff]	0,13	3,9
Питьевая вода [Drinking water]	0,038	1,1
Атмосферный воздух [Atmospheric air]	0,006	0,2
Суммарная доза [Total dose]	3,36	100

личиною 4,18 мЗв/год. При этом 80,1% суммарной дозы облучения обусловлены природными источниками излучения и 19,7% медицинскими рентгенорадиологическими диагностическими исследованиями. На долю всех остальных источников приходится менее 0,3%.

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения жителей субъектов Российской Федерации в 2020 г. находилась в диапазоне от 2,47 мЗв (Камчатский край) до 9,06 мЗв (Республика Алтай). Для 8 субъектов Российской Федерации средняя индивидуальная годовая доза облучения жителей в 2020 г. превысила 5 мЗв: Республики Бурятия (5,31 мЗв, Алтай (9,06 мЗв), Тыва (6,31 мЗв), Магаданская (5,07 мЗв), Иркутская (6,13 мЗв) области, Ставропольский (6,31 мЗв) и Забайкальский (8,19 мЗв) края и Еврейская автономная область (6,77 мЗв).

Заключение

В настоящей статье представлены годовые эффективные дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г. за счет всех основных источников ионизирующего излучения, полученные в результате анализа информации, содержащейся в федеральных банках данных ЕСКИД и данных, полученных в рамках радиационно-гигиенической паспортизации.

Средние по субъектам Российской Федерации годовые индивидуальные эффективные дозы природного облучения населения в 2020 г. лежат в диапазоне от 2,10 мЗв (Камчатский край) до 8,60 мЗв (Республика Алтай) при среднем значении для Российской Федерации 3,36 мЗв. При этом 59% этой дозы формируется за счет ингаляции изотопов радона и их ДПР.

В 2020 г. отмечен заметный рост средней дозы медицинского облучения населения Российской Федерации, который объясняется значительным, на 55%, увеличением количества проведенных исследований методом компьютерной томографии при снижении на 10% общего количества проведенных рентгенорадиологических диагностических процедур. В 2020 г. средняя годовая

доза медицинского облучения в расчете на 1 жителя Российской Федерации составила 0,81 мЗв, из которых 73,8% приходится на компьютерную томографию.

Средние годовые индивидуальные дозы техногенного производственного облучения персонала в 2020 г. составили 1,11 мЗв для персонала группы А и 0,63 мЗв для персонала группы Б.

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения жителей субъектов Российской Федерации в 2020 г. находилась в диапазоне от 2,47 мЗв (Камчатский край) до 9,06 мЗв (Республика Алтай) при среднем значении для Российской Федерации 4,18 мЗв. Для 8 субъектов Российской Федерации средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения жителей в 2020 г. превысила 5 мЗв: Республики Бурятия (5,31 мЗв), Алтай (9,06 мЗв), Тыва (6,31 мЗв), Магаданская (5,07 мЗв) и Иркутская (6,13 мЗв) области, Ставропольский (6,31 мЗв) и Забайкальский (8,19 мЗв) края и Еврейская автономная область (6,77 мЗв).

Литература

1. Рамзаев П.В., Барковский А.Н., Барышков Н.К., и др. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 1999 году: справочник. СПб, 2001. 29 с.
2. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Брук Г.Я., и др. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2002 году: справочник. СПб, 2004. 61 с.
3. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения у населения Российской Федерации в 2003 году: справочник. СПб, 2004. 59 с.
4. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы ионизирующего излучения у населения Российской Федерации в 2004 году: справочник. СПб, 2005. 61 с.
5. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Горский А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2005 году: справочник. СПб, 2006. 39 с.
6. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Голиков В.Ю., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2006 году: справочник. СПб, 2007. 61 с.

7. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2007 году: информационный сборник. СПб, 2008. 66 с.
8. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2008 году: информационный сборник. СПб, 2009. 69 с.
9. Барышков Н.К., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2009 году: информационный сборник. СПб, 2010. 67 с.
10. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2010 году: информационный сборник. СПб, 2011. 62 с.
11. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2011 году: информационный сборник. СПб, 2012. 63 с.
12. Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2012 году: информационный сборник. СПб, 2013. 67 с.
13. Репин В.С., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2013 году: информационный сборник. СПб, 2014. 60 с.
14. Репин В.С., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002 – 2015 гг.: информационный сборник. СПб, 2015. 40 с.
15. Барковский А.Н., Н.К. Барышков, А.А. Братилова, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб, 2016. 72 с.
16. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб, 2017. 78 с.
17. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб, 2018. 69 с.
18. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб, 2019. 71 с.
19. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб, 2020. 70 с.
20. Шевкун И.Г., Степанов В.С., И.К. Романович, и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год. Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 138 с.
21. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб, 2021. 80 с.

Поступила: 22.11.2021 г.

Барковский Анатолий Николаевич – главный научный сотрудник, руководитель Федерального радиологического 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. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

Ахматдинов Руслан Расимович – 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

Ахматдинов Рустам Расимович – ведущий инженер-исследователь 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

Барышков Николай Константинович – ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения 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 Артем Михайлович – старший научный сотрудник, руководитель 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

Братилова Анжелика Анатольевна – научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения 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

Журавлева Валентина Егоровна – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

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

Кувшинников Сергей Иванович – врач по радиационной гигиене лаборатории радиационного контроля и физических факторов Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Сивенков Александр Геннадьевич – инженер Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Тутельян Ольга Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационного контроля и физических факторов отдела лабораторного дела Федерального центра гигиены и эпидемиологии Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

Цовьянов Александр Георгиевич – заведующий лабораторией Федерального медицинского биофизического центра имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., Барышков Н.К., Библин А.М., Братилова А.А., Журавлева В.Е., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., Сивенков А.Г., Тутельян О.Е., Цовьянов А.Г. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. – С. 103-113. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113

Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020

Anatoly N. Barkovsky¹, Ruslan R. Akhmatdinov¹, Rustam R. Akhmatdinov¹, Nikolay K. Baryshkov¹, Artem M. Biblin¹, Anzhelika A. Bratilova¹, Valentina E. Zhuravleva³, Tatyana A. Kormanovskaya¹, Sergey I. Kuvshinnikov², Aleksandr G. Sivenkov³, Olga E. Tutelyan², Aleksandr G. Tsovyanov³

¹Saint-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

² Federal Center of Hygiene and Epidemiology, Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

³ State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

The article presents estimates of radiation doses of technogenic exposure to personnel and the public due to the normal operation of radiation facilities, exposure to the public due to natural sources and technogenically altered radiation environment, and medical exposure of patients. The doses values were obtained using the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens for 2020. The authors have analyzed the data contained in the forms of state statistical observation No. 1-DOZ, No. 2-DOZ, No. 3-DOZ and No. 4-DOZ for 2020 submitted by the organizations and territories, the state sanitary and epidemiological supervision of which was carried out by Rospotrebnadzor and Federal Medical Biological Agency of Russia. In the article also were used data obtained within the framework of Radiation-Hygiene Passportization. In 2020, 19 737 organizations dealing with technogenic sources of ionizing radiation submitted forms No. 1-DOZ with the information on the doses to personnel with a total number of 230 318 persons, of which 230 318 persons belonged to the personnel group A and 21 303 persons belonged to the personnel group B. For these groups, the doses were assessed based on results of individual dosimetric control. In 2020, according to Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens data, the average individual annual effective dose of technogenic exposure to the personnel group A was 1.11 mSv, and for the personnel group B it was 0.63 mSv. In 2020, 6 cases of exceeding the average annual effective dose limit (20 mSv) for Group A personnel and 18 cases of exceeding the average annual effective dose limit (5 mSv) for Group B personnel were registered. The total number of X-ray and radiological diagnostic procedures performed in the Russian Federation in 2020 exceeded 275.4 million, or 1.83 procedures per a citizen. The average annual effective dose of medical radiation exposure per one resident of Russia in 2020 was 0.81 mSv, and per procedure – 0.44 mSv. The average annual effective dose of radiation to residents of the Russian Federation from natural sources, according to all measurements for the period from 2001 to 2020, was 3.36 mSv. More than 59% of this dose is associated with the inhalation of radon and its progenies. The average individual annual effective radiation dose to residents the Russian Federation subjects in 2020 ranged from 2.47 mSv (Kamchatka Krai) to 9.06 mSv (Altai Republic) with an average value for the Russian Federation of 4.18 mSv. For eight subjects of the Russian Federation, the average individual annual effective dose to public in 2020 exceeded 5 mSv: the Republics of Buryatia (5.31 mSv), Altai (9.06 mSv), Tyva (6.31 mSv), Magadan (5.07 mSv) and Irkutsk (6.13 mSv) regions, Stavropol (6.31 mSv) and Zabaykalsky (8.19 mSv) krai and the Evreiskaya Autonomous oblast (6.77 mSv).

Anatoly N. Barkovsky

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

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

Key words: *annual effective radiation doses, natural exposure, medical exposure, technogenic exposure, personnel, patients, population, the Unified System of Individual Dose Control.*

References

- Ramzaev PV, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bruk GYa, Titova TN. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 1999. Saint-Petersburg; 2001. 29 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bruk GYa, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, et al. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2002. Saint-Petersburg; 2004. 61 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Perminova GS, et al. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2003. Saint-Petersburg; 2004. 59 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Perminova GS, et al. Guide: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2004. Saint-Petersburg; 2005. 61 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Gorsky AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, et al. Guide: Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2005. Saint-Petersburg; 2006. 39 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Golikov VYu, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Repin VS, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2006. Saint-Petersburg; 2007. 61 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2007. Saint-Petersburg; 2008. 66 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2008. Saint-Petersburg; 2009. 69 p. (In Russian).
- Baryshkov NK, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Medvedev AYU, Perminova GS, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2009. Saint-Petersburg; 2010. 67 p. (In Russian).
- Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2010. Saint-Petersburg; 2011. 62 p. (In Russian).
- Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2011. Saint-Petersburg; 2012. 63 p. (In Russian).
- Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Lipatova OV, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2012. Saint-Petersburg; 2013. 67 p. (In Russian).
- Repin VS, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Kuvshinnikov SI, Matyukhin SV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2013. Saint-Petersburg; 2014. 60 p. (In Russian).
- Repin VS, Baryshkov NK, Bratilova AA, Varfolomeeva KV, Goncharova YuN, Kononenko DV, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation according to the results of the USIDC in 2002-2015. Saint-Petersburg; 2015. 40 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Repin LV, Romanovich IK, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2015. Saint-Petersburg; 2016. 72 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Bruk GYa, Vorobyev BF, Kormanovskaya TA, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016. Saint-Petersburg; 2017. 78 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016. Saint-Petersburg; 2018. 69 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AN, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2016. Saint-Petersburg; 2019. 71 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AN, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2019. Saint-Petersburg; 2019. 70 p. (In Russian).
- Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, et al. The results of radiation-hygiene passportization in the subjects of the Russian Federation for 2020. Radiation-hygiene passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-being; 2021. 138 p. (In Russian).
- Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information packet: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2020. Saint-Petersburg; 2021. 80 p. (In Russian).

Received: November 22, 2021

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – The head of Federal Radiological Centre, 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: ANBarkovski@yandex.ru)

Ruslan R. Akhmatdinov – Junior research fellow, Information-analytical center 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

Rustam R. Akhmatdinov – Leading research engineer, Information-analytical center of the Saint-Petersburg Institute of Radiation Hygiene after P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

Nikolay K. Baryshkov – Candidate of Technical Sciences, Leading research fellow of St. 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 – Information Analytical Center Head, 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

Anzhelika A. Bratilova – Research fellow of Internal radiation laboratory 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

Valentina E. Zhuravleva – Engineer, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Senior Research Scientist, natural sources dosimetry laboratory 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

Sergey I. Kuvshinnikov – Radiation Control and Physical Factors Laboratory physicist expert, Laboratory Studies Department of Federal Hygiene and Epidemiology Center of Federal Service for Surveillance on Consumer rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

Aleksandr G. Sivenkov – Engineer, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Olga E. Tutelyan – Candidate of Medical Sciences, Radiation Control and Physical Factors Laboratory Head, Federal Hygiene and Epidemiology Center Laboratory Studies, Moscow, Russia

Aleksandr G. Tsovyanov – Laboratory Head, State Research Center – A. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

For citation: 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., Sivenkov A.G., Tutelyan O.E., Tsovyanov A.G. Radiation doses to the population of the Russian Federation in 2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14 No. 4. P. 103-113 (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-103-113

Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий

Р.Р. Ахматдинов, А.М. Библин, Л.В. Репин

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

Оценка радиационного риска по данным радиационно-гигиенических паспортов территорий позволяет дать краткую количественную характеристику негативного воздействия источников ионизирующих излучений на здоровье населения различных субъектов Российской Федерации на популяционном уровне. Учитывая, что расчет отдельных показателей радиационного риска для населения конкретных субъектов Российской Федерации является трудоемкой задачей, требующей обращения к радиационно-гигиеническим паспортам территорий за отдельные годы, целью выполненной работы стала разработка специализированного программного обеспечения, предназначенного для оценки показателей радиационного риска населения Российской Федерации по данным системы радиационно-гигиенической паспортизации территорий. Автоматизация расчета показателей риска позволяет не только упростить процедуру расчета, но и осуществлять пространственно-временной анализ показателей риска в динамике для различных регионов Российской Федерации за длительные периоды времени. В качестве методической основы при разработке программного обеспечения были выбраны Методические рекомендации 2.6.1.0145-19 «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации». Для достижения поставленной цели были разработаны 2 компьютерные программы: 1) для автоматизации процесса расчета показателей радиационного риска на основе сведений, содержащихся в радиационно-гигиенических паспортах территорий – компьютерная программа «Расчет показателей радиационного риска по данным РГПТ»; 2) для пространственной визуализации произведенных расчетов – специализированная геоинформационная система «Радиационные риски населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации». Разработанные в ходе выполнения работы компьютерные программы позволяют осуществлять автоматизированный расчет показателей радиационного риска по данным радиационно-гигиенических паспортов территорий, визуализировать пространственно-распределенные результаты расчета показателей радиационного риска, осуществлять предварительную оценку состояния радиационной безопасности на основании данных, содержащихся в радиационно-гигиенических паспортах территорий с использованием показателей радиационного риска.

Ключевые слова: *средний индивидуальный пожизненный радиационный риск, радиационно-гигиенический паспорт территории, программа для ЭВМ, ГИС, медицинское облучение, природное облучение, техногенное облучение, профессиональное облучение.*

Введение

Вот уже 25 лет с принятием 9 января 1996 г. Федерального закона «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ в Российской Федерации (РФ) действует система радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий. В соответствии с данным федеральным законом результаты оценки состояния радиационной безопасности должны ежегодно заноситься в радиационно-гигиенические паспорта. Радиационно-гигиенический паспорт является источником наиболее

полной и объективной информации о состоянии радиационной безопасности населения РФ [1].

В области обеспечения радиационной безопасности населения в качестве интегрального количественного показателя негативного воздействия радиационного фактора на здоровье населения используется величина радиационного ущерба, а мерой радиационного риска в соответствии с законом «О радиационной безопасности населения» является эффективная доза.

Ахматдинов Руслан Расимович

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: rusl.akh@niir.ru

Оценка радиационного риска по данным радиационно-гигиенических паспортов территорий (РГПт) является инструментом, позволяющим дать краткую количественную характеристику негативного воздействия источников ионизирующих излучений на здоровье населения различных субъектов РФ на популяционном уровне. До недавнего времени в РФ отсутствовало методическое обеспечение оценки рисков в РГПт, поэтому в большинстве случаев такая оценка носила чисто формальный характер и осуществлялась путем умножения коллективной дозы за счет воздействия того или иного источника излучения на соответствующий коэффициент риска, представленный в СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009)¹. Такой подход обладает рядом недостатков при оценке рисков, связанных с медицинским облучением пациентов и облучением за счет воздействия радона и дочерних продуктов его распада.

Утверждение методических рекомендаций (МР) МР 2.6.1.0145-19 «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации» позволило сделать оценку рисков в РГПт более корректной, но и более сложной для ручного расчета.

Автоматизация расчета показателей риска в соответствии с названными МР позволяет не только упростить процедуру расчета, но и осуществлять пространственно-временной анализ показателей риска в динамике для различных регионов РФ за длительные периоды времени.

Цель исследования – разработка специализированного программного обеспечения для автоматизации расчета и пространственно-временной визуализации показателей радиационного риска населения РФ по данным системы РГПт.

Материалы и методы

В качестве методической основы при разработке программного обеспечения были выбраны МР 2.6.1.0145-19 «Расчет показателей радиационного риска по данным, содержащимся в радиационно-гигиенических паспортах территорий, для обеспечения комплексной сравнительной оценки состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации», утвержденные Главным государственным санитарным врачом 23 апреля 2019 г. Данные МР были разработаны с целью повышения эффективности комплексной сравнительной оценки воздействия радиационного фактора на население РФ для планирования и проведения мероприятий по совершенствованию радиационной безопасности. Методические подходы к расчету показателей радиационного риска в МР 2.6.1.0145-19 были ранее опубликованы в ряде научных статей [2, 3].

Источником данных для расчета показателей радиационного риска послужил Федеральный банк данных радиационно-гигиенической паспортизации территории (ФБД-РГПт) за 2010–2019 гг.

Программа автоматизации расчета показателей радиационного риска написана на языке программирова-

ния С# с интерфейсом программирования приложений Windows Forms в интегрированной среде разработки Visual Studio Community 2019.

Для пространственной визуализации произведённых расчетов использована специализированная геоинформационная система (ГИС), написанная на языке разметки HTML с использованием JavaScript-библиотеки Leaflet. Данные расчетов вносятся в формате JSON. Субъекты РФ представляют собой полигональные объекты векторного типа. Система поддерживает браузеры Chrome, Firefox, Safari 5+, Opera 12+, Internet Explorer 7–11 для настольных систем и браузеры Safari, Android, Chrome, Firefox для мобильных устройств.

Результаты и обсуждение

Для достижения поставленной цели в рамках создания автоматизированной системы анализа состояния радиационной безопасности по данным РГПт были разработаны две компьютерные программы:

1. «Расчет показателей радиационного риска по данным РГПт» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667215 от 21.12.2020).

2. ГИС «Радиационные риски населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации». ГИС разработана как подсистема Автоматизированной системы контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора (АСКРВ Роспотребнадзора) [4] и в настоящий момент проходит государственную регистрацию в Роспатенте.

Интерфейс главного меню программы «Расчет показателей радиационного риска по данным РГПт» и блок-схема ее алгоритма представлены на рисунках 1 и 2 соответственно. Для проведения расчетов показателей радиационного риска для различных ситуаций облучения и категорий облучаемых лиц в компьютерную программу был внедрен математический аппарат, представленный в МР 2.6.1.0145-19. Информационной основой программы являются файлы common_t.dbf, met_dsf.dbf, chernob.dbf с массивами данных из программы ФБД-РГПт. Данные файлы подгружаются в программу в ходе ежегодных обновлений. При нажатии кнопки «Импорт данных» в память программы загружаются и вычисляются показатели для выбранного субъекта РФ и отчетного года. Во вкладках «Медицинское облучение», «Природное облучение», «Техногенное облучение» отображаются показатели данных ФБД-РГПт и детальный расчет средних индивидуальных пожизненных радиационных рисков. Значения радиационных рисков автоматически вносятся в таблицу в главном меню программы. При нажатии кнопки «Сформировать в файл» формируется текстовый файл с вычисленными показателями в формате .doc.

Интерфейс программы «Радиационные риски населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации» представляет собой карту РФ с административным делением на уровне субъектов, в которой каждому субъекту присваивается цвет в зависимости от рассчитанного ранга радиационного риска. При выборе категории радиационного риска и отчетного года каждому субъекту присваивается цвет в

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009" (In Russ.)].



Рис. 1. Интерфейс главного меню программы «Расчет показателей радиационного риска по данным РГПТ»
[Fig. 1. Interface of the main menu of the program “Calculation of radiation risk indicators according to the RGPT data”]

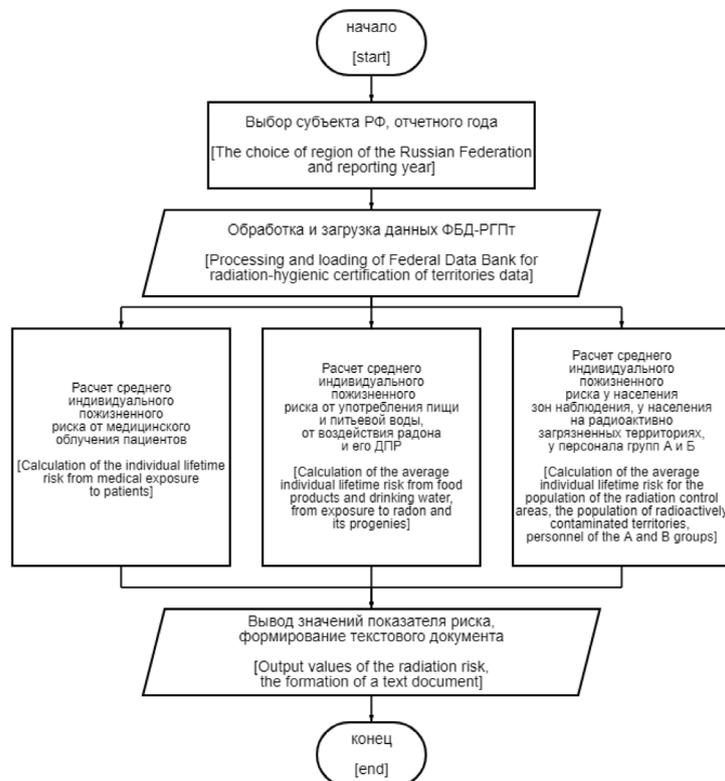


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета показателей индивидуального среднего пожизненного радиационного риска по данным РГПТ
[Fig. 2. Flowchart of the algorithm for calculating the indicators of individual average lifetime radiation risk according to the Federal Data Bank for radiation-hygienic certification of territories data]

зависимости от рассчитанного ранга. При наведении на субъект автоматически формируется график динамики выбранных показателей риска за 10 лет. Блок-схема алгоритма программы представлена на рисунке 3.

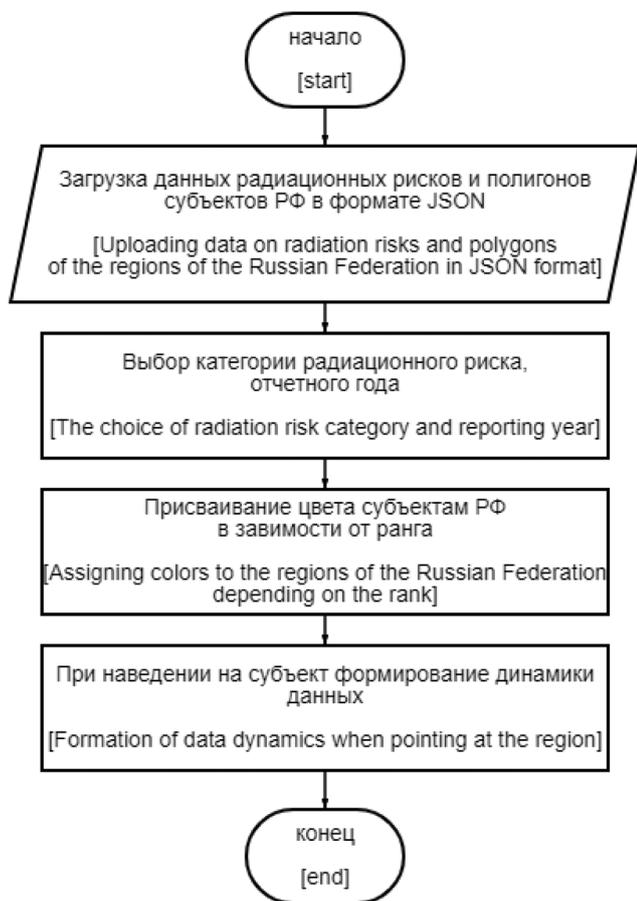


Рис. 3. Блок-схема алгоритма пространственной визуализации данных
[Fig. 3. Flowchart of the spatial data visualization algorithm]

Работоспособность программы обеспечивается подгрузкой JavaScript библиотеки Leaflet.js (для создания интерактивных карт) и Chart.js (для создания графиков динамики), координат точек для создания объектов векторного типа Polygon, которые отображают границы субъектов РФ. В текущей версии программы массив данных со значениями среднего индивидуального пожизненного риска от различных источников ионизирующих излучений требуется вручную вносить в файл формата JSON. Дальнейшее развитие программы «Расчет показателей радиационного риска по данным РГПТ» предполагает автоматическое формирование выходного файла в формате JSON с массивом данных для подгрузки в программу «Радиационные риски населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации».

Система позволяет пространственно визуализировать результаты количественной оценки средних индивидуальных пожизненных радиационных рисков у населения субъектов РФ для следующих ситуаций облучения в соответствии с разделами радиационно-гигиенического паспорта:

- медицинское облучение пациентов;
- природное облучение от пищи и питьевой воды;
- природное облучение от радона;
- техногенное облучение – деятельность предприятий;
- техногенное облучение – радиоактивное загрязнение территорий;
- техногенное облучение – персонал радиационных объектов.

Примеры применения автоматизированной системы для анализа состояния радиационной безопасности

Практическое применение автоматизированной системы анализа состояния радиационной безопасности по данным РГПТ на уровне субъектов РФ с использованием показателей радиационного риска за счет воздействия различных источников ионизирующих излучений предполагает ранжирование результатов оценки риска в соответствии с различными шкалами риска. Использование различных шкал для оценки рисков от различных источников обусловлено особенностями нормирования радиационного фактора для различных ситуаций и сценариев облучения. Так, например, медицинское облучение пациентов является, как правило, добровольным и направлено на получение диагностической информации или терапевтического эффекта, поэтому по отношению к нему не применяются установленные для других источников пределы дозы, риски за счет природного облучения не имеют отдельных диапазонов для разных групп населения, а риски за счет техногенного облучения оцениваются для нескольких сценариев облучения с выделением особой группы (персонал радиационных объектов), для которой риски оцениваются как профессиональные. В разработанной ГИС также реализована возможность ранжирования рассчитанных показателей радиационного риска по выбранному пользователем критериям.

Медицинское облучение пациентов

Для ранжирования пожизненного риска для здоровья пациентов, связанного с медицинским вмешательством в форме диагностических исследований или лечебных процедур в программном обеспечении используется шкала риска, рекомендуемая к применению для оценки радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований [5, 6] и внедренная в практику Роспотребнадзора²:

- пренебрежимо малый – $< 10^{-6}$;
- минимальный – $10^{-6} - 10^{-5}$;
- очень низкий – $10^{-5} - 10^{-4}$;
- низкий – $10^{-4} - 10^{-3}$;
- умеренный – $10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$.

² Методические рекомендации МР 2.6.1.0215-20. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21.09.2020 г.). [Guidelines MR 2.6.1.0098-15. Assessment of radiation risk in patients during radiological examinations. Approved by the acting Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 21.09.2021 (In Russ.)]

На рисунке 4 представлен интерфейс ГИС при выборе среднего индивидуального пожизненного риска на одного жителя от медицинского облучения на примере Санкт-Петербурга.

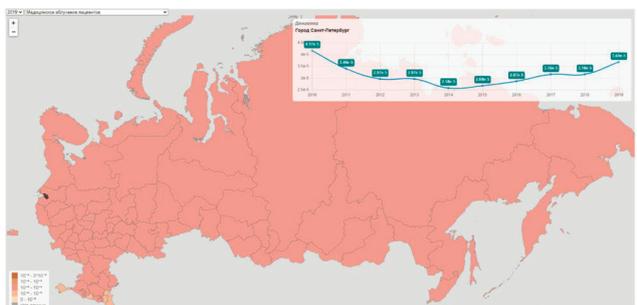


Рис. 4. Интерфейс ГИС. Средний индивидуальный пожизненный риск на одного жителя от медицинского облучения на примере Санкт-Петербурга
[Fig. 4. GIS interface. Average individual lifetime risk per resident from medical radiation exposure on the example of St. Petersburg]

Облучение населения от природных источников

В системе реализовано ранжирование среднего индивидуального пожизненного радиационного риска от природного облучения [7]. Выделены 4 диапазона риска используемые в практике Роспотребнадзора [8]:

- приемлемый – $< 10^{-6}$;
- предельно допустимый – $10^{-6} - 10^{-4}$;
- приемлемый для профессиональных групп и неприемлемый для населения в целом – $10^{-4} - 10^{-3}$;
- неприемлемый ни для населения, ни для профессиональных групп – $> 10^{-3}$.

Средний индивидуальный пожизненный риск у населения от воздействия радона и его дочерних продуктов распада в большинстве субъектов Российской Федерации за 2019 г. представлен на рисунке 5.

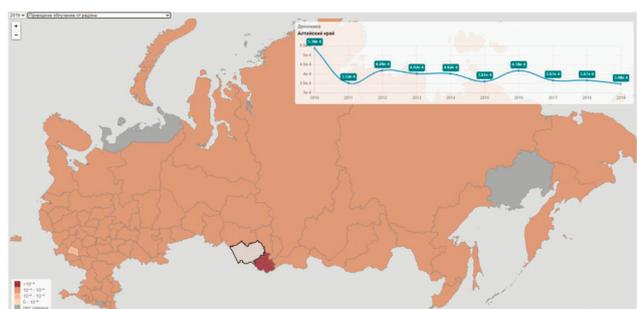


Рис. 5. Интерфейс ГИС. Средний индивидуальный пожизненный риск у населения от воздействия радона и его дочерних продуктов распада на примере Алтайского края
[Fig. 5. GIS interface. The average individual lifetime risk to the population from exposure to radon and its daughter decay products on the example of the Altai krai]

Техногенное облучение населения и персонала радиационных объектов

В соответствии с п. 2.3 СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009)³ «пределы доз облучения в течение года устанавливаются, исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска: для персонала – $1 \cdot 10^{-3}$, для населения – $5 \cdot 10^{-5}$ ». Уровень пренебрежимо малого риска составляет 10^{-6} . В разработанной ГИС данное ранжирование используется для техногенного облучения населения от деятельности радиационных объектов, от радиоактивного загрязнения территорий и для техногенного облучения персонала радиационных объектов (рис. 6, 7).

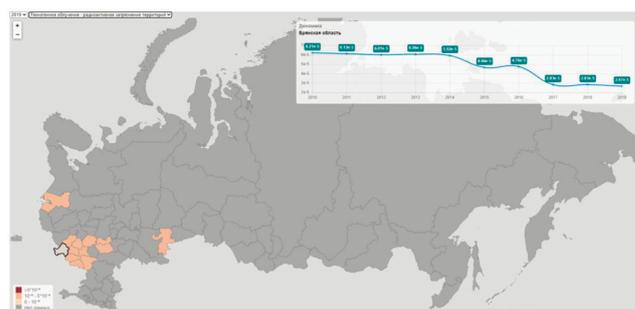


Рис. 6. Интерфейс ГИС. Средний индивидуальный пожизненный риск у населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях на примере Брянской области
[Fig. 6. GIS interface. The average individual lifetime risk to the population living in radioactively contaminated territories on the example of the Bryansk region]

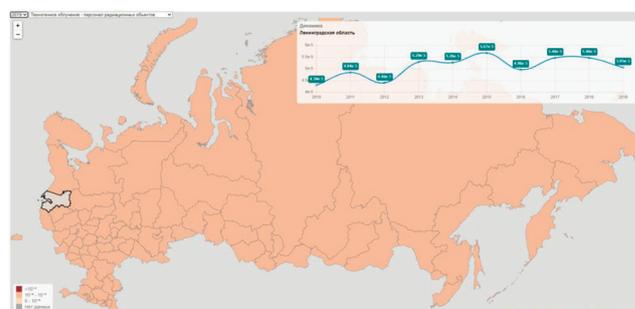


Рис. 7. Интерфейс ГИС. Средний индивидуальный риск у персонала групп А и Б на примере Ленинградской области
[Fig. 7. GIS interface. The average individual risk to the personnel of groups A and B on the example of the Leningrad region]

Заключение

Автоматизация рутинных расчетов, связанных с развитием прикладных методов оценки радиационных рисков, и визуализация представления результатов расчетов, распределенных во времени и пространстве,

³ СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009" (In Russ.)].

способствуют снижению количества ошибок в расчетах и определению приоритетных направлений деятельности по обеспечению радиационной безопасности населения на уровне субъектов территориального деления РФ. Разработка специального программного обеспечения является одним из способов повышения скорости, точности оценок и информативности результатов оценки и, в конечном счете, достижения целей радиационно-гигиенической паспортизации территорий в части оценки влияния основных источников ионизирующего излучения.

Компьютерные программы, разработанные в рамках представленной на VI Всероссийском конкурсе молодых ученых и специалистов по специальности «Радиационная гигиена» работы, обладают потенциалом к автоматизации различных видов анализа, связанных с развитием методологии радиационных рисков: внедрением поло- и возраст-зависимых показателей риска, использованием отечественных медико-демографических данных при оценке риска, внедрением и гармонизацией показателей сравнительной оценки риска, связанного с воздействием различных вредных факторов среды обитания.

Литература

1. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 7-17.
2. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А. Оценка риска при облучении радоном для населения субъектов Российской Федерации на основе данных радиационно-гигиенического паспорта территории // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 15-22.
3. Голиков В.Ю. Оценка рисков медицинского облучения на основе данных радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 6-14.
4. Репин Л.В., Библин А.М., Ковалев П.Г., и др. Автоматизированная система контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора: история создания, назначение и развитие // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 44-53.
5. Department of Health. On the State of the Public Health 1995. In Introduction to the Annual Report of the Chief Medical Officer of the Department of Health for the year 1995. London, HMSO; 1995.
6. Calman K. Cancer: science and society and the communication of risk. British Medical Journal, 1996. No 313. P 799-802.
7. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
8. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: Монография / под общей редакцией Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2014. 738 с.

Поступила: 09.08.2021 г.

Ахматдинов Руслан Расимович – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра 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, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: rusl.akh@niirg.ru

Библин Артем 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: Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин Л.В. Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 114-121. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-114-121

Development of the automated system for assessing radiation risks to the population of the Russian Federation based on the data of radiation-hygienic certification of territories

Ruslan R. Akhmatdinov, Artem M. Biblin, Leonid V. Repin

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

The assessment of the radiation risk based on the data of the radiation-hygienic passports of the territories makes it possible to give a brief quantitative characteristic of the negative impact of sources of ionizing radiation on the health of the population of various regions of the Russian Federation at the population level. The calculation of individual indicators of radiation risk for the population of particular regions of the Russian Federation is a time-consuming task that requires referring to radiation-hygienic passports of territories for particular years. Therefore, the purpose of the performed work was to develop specialized software designed to assess the indicators of radiation risk to the population of the Russian Federation according to the data of the radiation-hygienic certification system of territories. Automation of the calculation of radiation risk allows not only to simplify the calculation procedure but also to carry out a spatial-temporal analysis of risk in dynamics for different regions of the Russian Federation over long periods. The methodological basis for the software development is guideline MR 2.6.1.0145-19 "Calculation of radiation risk according to the data contained in the radiation-hygienic passports of the territories to provide a comprehensive comparative assessment of the radiation safety status of the population of the subjects of the Russian Federation". To achieve the set goal, two computer programs were developed: 1) to automate the process of calculating radiation risk based on the information contained in the radiation-hygienic passports of territories, a computer program "Calculation of radiation risk indicators according to RGPT data"; 2) for the spatial visualization of the calculations, a specialized geographic information system "Radiation risks of the population of the Russian Federation according to radiation-hygienic certification data". The computer programs developed in the course of the work allow an automated calculation of radiation risk based on the data of radiation-hygienic passports of territories, visualize the spatially distributed results of calculating radiation risk, carry out a preliminary assessment of the state of radiation safety, based on the data contained in radiation-hygienic passports of territories using radiation risk indicators.

Key words: average individual lifetime radiation risk, radiation-hygienic passport of the territory, computer program, GIS, medical exposure, natural exposure, technogenic exposure, occupational exposure.

References

1. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1: Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7-17 (In Russian).
2. Kononenko DV, Kormanovskaya TA. Risk assessment for the population of regions of the Russian Federation from exposure to radon based on data from radiation-hygienic passports of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 15-22. (In Russian).
3. Golikov VYu. Medical irradiation risk assessment based on the data of radiation-hygienic passportization in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 6-14. (In Russian).
4. Repin LV, Biblin AM, Kovalev PG, Nikolaevich MS, Repin VS. The Automated system of radiation exposure control (ASCRE) for Rospotrebnadzor: creation history, applicability and development. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3):44-53. (In Russian).
5. Department of Health. On the State of the Public Health 1995. In Introduction to the Annual Report of the Chief Medical Officer of the Department of Health for the year 1995. London: HMSO; 1995.
6. Calman K. Cancer: science and society and the communication of risk. *British Medical Journal*. 1996;313. 799-802.
7. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Ed. by academic of RAS Onischenko GG and prof. Popova AYu. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG after P.V. Ramzaev; 2018: 432 p. (In Russian).
8. Health risk analysis in the strategy of state social and economical development. monograph. Under the general ed. of Onischenko GG and Zaitseva NV. Perm: Publishing house of the Perm National Research Polytechnic University, 2014: 738 p. (In Russian).

Received: August 09, 2021

Ruslan R. Akhmatdinov

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: rusl.akh@niirg.ru

For correspondence: Ruslan R. Akhmatdinov – Junior Researcher, 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 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: rusl.akh@niirg.ru)

Artem M. Biblin – Head of the information-analytical center, senior research scientist, 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, 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: Akhmatdinov R.R., Biblin A.M., Repin L.V. Development of the automated system for assessing radiation risks to the population of the Russian Federation based on the data of radiation-hygienic certification of territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 4. P. 114-121. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-114-121

Учёт вклада природного фона при контроле индивидуальных доз персонала

С.Ю. Бажин, Г.Н. Кайдановский

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

При обеспечении радиационной безопасности в Российской Федерации существует принцип раздельной независимой оценки доз природного, медицинского, аварийного и контролируемого техногенного облучения. На практике не всегда удаётся соблюсти данный принципиальный подход. Установленные пределы доз имеют отношение только к техногенному облучению при нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения. Однако при формировании региональных и федеральных баз данных по индивидуальным дозам облучения персонала сведения вносятся не по техногенному облучению, а по производственному, то есть без вычитания природного радиационного фона. Природная компонента индивидуальной дозы при малых дозах облучения достаточно существенна. Невычитание её приводит к завышению индивидуальной дозы внешнего облучения персонала. При реализации вычитания природного радиационного фона возникают трудности: в каких случаях необходимо производить вычитание фона, какое значение выбрать за вычитаемый фон, каким методом проводить измерения фона, на каком этапе обработки измерительной информации производить вычитание фона. В настоящей статье предложен способ решения вопроса о вычитании природного радиационного фона из значений индивидуальных доз внешнего облучения персонала по результатам индивидуального дозиметрического контроля. На примере города Санкт-Петербурга термолюминесцентным методом индивидуальной дозиметрии измерен природный радиационный фон в течение 3 последовательных лет (2018–2020 гг.) в 50 контрольных точках. Для измерений природного фона были использованы индивидуальные термолюминесцентные дозиметры, однотипные с теми, которыми производятся измерения индивидуальных эквивалентов доз внешнего облучения персонала. Обоснован выбор использования термолюминесцентного метода в качестве преимущественного для корректировки средних доз внешнего облучения от техногенных источников ионизирующего излучения при вычитании природной компоненты дозы. Произведено сравнение официальных данных по дозам облучения персонала с данными, полученными в результате собственных измерений. Дана рекомендация об использовании полученных значений среднего природного радиационного фона при формировании региональных и федеральных баз данных по индивидуальным дозам облучения персонала.

Ключевые слова: ЕСКИД, вычитание природного радиационного фона, индивидуальный дозиметрический контроль, индивидуальный термолюминесцентный дозиметр, производственное облучение, техногенное облучение.

Введение

В системе обеспечения радиационной безопасности Российской Федерации в соответствии с п. 3.1.3. СанПиН 2.6.1.2523–09 (НРБ-99/2009)¹ действует принцип четкой раздельной независимой оценки доз медицинского, природного, аварийного и техногенного облучения в условиях контролируемой эксплуатации источников ионизирующего излучения (ИИИ). Таким образом, установленные основ-

ные пределы доз отнесены только к техногенному облучению при нормальной эксплуатации ИИИ. Эффективная доза является одной из нормируемых величин, определяющих величину ущерба здоровью от воздействия техногенного облучения. Как развитие основных положений НРБ-99/2009 в форме требований к методам контроля внешнего облучения персонала медицинских организаций, в том числе с позиций индивидуального дозиметри-

¹ Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534. [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. (In Russ.)]

Бажин Степан Юрьевич

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: s.bazhin@niir.ru

ческого контроля (ИДК), в 2012 г. были утверждены МУ 2.6.1.3015–12 «Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций»². В данном документе указано, что вычитание доз, полученных от воздействия природного фона, из значений доз, зарегистрированных индивидуальными дозиметрами, не производится. Таким образом, оформленный результат измерения индивидуального дозиметра включает сумму значений доз природного фона и техногенного излучения (производственное облучение), что представляет собой явное противоречие с вышестоящими НРБ-99/2009. Согласно п. 6.5. МУ 2.6.1.3015–12, учёт фонового излучения должен производиться путем использования дополнительного фонового дозиметра, с занесением результатов измерений в протоколы ИДК. Отказ от вычитания природного фона из показаний индивидуальных дозиметров объяснен тем, что при высоких значениях индивидуальных эквивалентов доз персонала значения фоновых доз будут меньше погрешности измерений и не окажут существенного влияния на конечное значение; при малых значениях индивидуальных эквивалентов доз вычитание доз от природного фона приведёт к значительным ошибкам, вплоть до отрицательных значений. Другими словами, в документе указано, что целью текущего радиационного контроля является подтверждение фактов должного обеспечения радиационной безопасности персонала и нахождения техногенного ИИИ под контролем, поэтому точное определение техногенной компоненты доз облучения персонала при данном контроле не требуется. Такой подход, с точки зрения авторов настоящей статьи, является обоснованным. Однако в дальнейшем данные по дозам облучения персонала из протоколов ИДК переносятся в региональные и федеральные базы данных по индивидуальным дозам облучения персонала (РБД и ФБД ДОП ЕСКИД)^{3,4} без внесения соответствующих коррективов и без должной обработки первичной измерительной информации. Таким образом, создаётся искаженное представление о состоянии радиационной безопасности в стране. Необходимо отметить, что такое впечатление имеет место лишь при оперировании данными о чрезвычайно малых дозах облучения персонала. В 2020 г. при проведении сравнения среднегодовых эффективных доз облучения на примере медицинского персонала России и некоторых зарубежных стран было показано, что существенный вклад в значения первичной измерительной информации с последующим её перенесением в формы статистического наблюдения вносит природный радиационный фон [1]. В 2011 г. в работе А.И. Григорьева [2] отмечено, что примерно 40–60% от зарегистрированной дозы персонала,

измеренной термолюминесцентным методом, приходится именно на вклад природной компоненты дозы. Это приводит к соответствующему завышению коллективных доз облучения персонала, фиксируемых в РБД и ФБД ДОП ЕСКИД [3–7]. Это завышение несущественно и не приводит к значимому влиянию на общую оценку состояния радиационной безопасности в Российской Федерации. Однако для понимания величины техногенной компоненты производственной дозы внешнего облучения персонала и сравнения этой величины со значением предела необходимо производить вычитание значения природного радиационного фона.

При проведении вычитания природной компоненты дозы внешнего облучения необходимо определить ту величину, которая будет принята за природный фон. В зарубежной практике для стран, в которых значения природного радиационного фона в различных регионах имеют незначительные отличия, используют единое вычитаемое значение фона [8].

Цель исследования – оценка вклада природной компоненты в индивидуальные дозы внешнего облучения персонала.

В настоящей работе предлагается способ учёта доз облучения персонала, предусматривающий вычитание дозы природного радиационного фона, усреднённой по региону, из значений средних годовых доз персонала данного региона, измеренных индивидуальными термолюминесцентными дозиметрами. Вместе с тем, практическое применение такого способа наталкивается на существенные трудности, связанные с определением адекватной для вычитания усреднённой величины дозы естественного фона.

Материалы и методы

В настоящей работе проведено сопоставление информации, взятой из открытых источников [6, 7], с базой данных собственных натуральных измерений, выполненных методом термолюминесцентной дозиметрии. В качестве контрольных точек экспонирования для сбора первичной измерительной информации были выбраны 130 организаций Санкт-Петербурга. Измеряемой величиной служил индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения $H_p(10)$ – операционная величина, соотносящаяся с эффективной дозой. Измерения проводились с помощью индивидуальных термолюминесцентных дозиметров типа DTU-1, содержащих по 2 детектора ДТГ-4 (LiF, Mg, Ti) в корпусе дозиметра. Непрерывное экспонирование дозиметров производилось в течение 3 месяцев с после-

² МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Радиационная гигиена. 2012;5(3):77-86. [Methodical guidelines 2.6.1.3015-12. "Organization and management of individual dosimetry of medical staff". Radiation Hygiene. 2012;5(3):77-86. (In Russ.)]

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.97 г. № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Decree of the government of the Russian Federation #718, 16.06.1997 "On the order of the development of the joint governmental system of control and accounting on the individual doses of the citizens" (In Russ.)]

⁴ Приказ Минздрава Российской Федерации от 31 июля 2000 г. № 298 «Об утверждении Положения о единой государственной системе контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан» [Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation #298, 31.07.2000, 13.10. "On the establishment of the Provision on the joint governmental system of control and accounting on the individual doses of the citizens" (In Russ.)]

дующей заменой дозиметров и считыванием показаний детекторов. Показания детекторов были считаны на термолюминесцентной дозиметрической системе Harshaw 2000 D (США). Основная погрешность результатов измерений $H_p(10)$ составляла 20% ($P=0,95$); дополнительная погрешность за счёт энергетической чувствительности детекторов в полях рентгеновского излучения не превышала 30%.

Дозиметр для учёта вклада природного радиационного фона в величину индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ персонала был также откалиброван в терминах $H_p(10)$ и являлся однотипным с индивидуальными дозиметрами персонала. Экспонировались фоновые дозиметры в помещениях медицинских учреждений, удалённых от любых источников техногенного излучения. Обмен и считывание показаний фоновых дозиметров и индивидуальных дозиметров персонала производились одновременно.

Исходя из того, что фоновые дозы сформированы в результате воздействия относительно однородного радиационного поля, в МУ 2.6.1.3015–12 рекомендовано использовать следующее соотношение:

$$E = H_p(10), \text{ в мЗв}, \quad (1)$$

где $H_p(10)$ – показания индивидуального дозиметра, откалиброванного в терминах индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения, мЗв.

Результаты и обсуждение

До сих пор не существует единого алгоритма и правил вычитания фоновых значений, как нет и представления о величине этого вычитаемого значения. Значения природного фона по регионам Российской Федерации встречаются в информационных сборниках [3–7], в монографии [9] и отчётных формах федерального государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ⁵, в протоколах группового и индивидуального дозиметрического контроля, но все эти данные разнятся даже для одних и тех же подконтрольных организаций. Обусловлено это наличием у средств измерения различного собственного фона прибора (нулевого фона) – показаний прибора при отсутствии измеряемой величины, что связано с регистрацией детектором излучения окружающих предметов, радионуклидов в материалах самого прибора и его откликом на космическое излучение и посторонние электрические и магнитные сигналы [10]. В исследовании [2] указан диапазон значений нулевого фона от 0,011 до 0,083 мкЗв/ч для 10 различных типов электронных дозиметров. По данным формы № 4-ДОЗ (данные собраны по результатам измерений мощности дозы электронными дозиметрами различных типов), в городе Санкт-Петербурге в 2018 и в 2019 гг. средняя мощность дозы гамма-излучения в зданиях была 0,13 мкЗв/ч (что соответствует 1,14 мЗв в год). В связи с этим предпочтение следовало бы отдать результатам измерения фона дозиметрами того же типа, что и при измерении индивидуаль-

ных доз. Однако реализация такого подхода наталкивается на определенные трудности. Многолетняя практика проведения индивидуального дозиметрического контроля термолюминесцентным методом показала, что около 50% результатов измерения фона оказываются больше, чем результаты, зафиксированные индивидуальными дозиметрами персонала. Это объясняется нарушениями правил эксплуатации термолюминесцентных дозиметров в организациях, где производится контроль. Основными нарушениями являются: размещение фоновых дозиметров в поле излучения источника, а также игнорирование персоналом необходимости ношения индивидуальных дозиметров при проведении работ с использованием источников ионизирующего излучения. Для получения величин усреднённых доз фоновых излучений, наиболее приближенных к истинным, к массиву данных, полученных лабораторией радиационного контроля ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в 2018 и 2019 гг., был применен фильтр, а именно: в расчет средней величины дозы естественного фона принимались только те значения, которые не превосходили значений индивидуальных эквивалентов доз персонала в тех же организациях. Таким образом, из 130 организаций, изначально выбранных для сбора данных, после применения фильтра по условной верификации в анализ были включены результаты, полученные методом термолюминесцентной дозиметрии в 50 организациях города Санкт-Петербурга в 2018–2020 гг.

На рисунке 1 графически представлено распределение полученных значений. Межквартильный размах всех представленных измерений достаточно узок. Среднее значение и медиана каждой выборки расположены близко друг к другу, что свидетельствует о нормальном распределении признака. Таким образом, для дальнейшего сравнения целесообразно использование среднего значения признака. Максимальные и минимальные значения имеют широкий разброс, но данные случаи единичны для каждого отдельного года. При сравнении графического

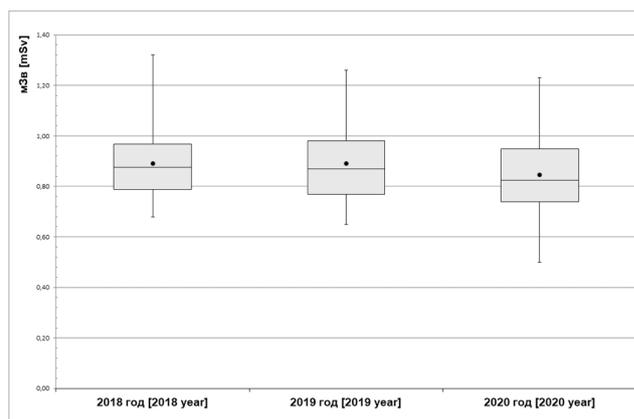


Рис. 1. Среднее годовое значение природного радиационного фона в г. Санкт-Петербурге
[Fig. 1. Average annual value of natural background radiation in St. Petersburg, mSv]

⁵ Форма федерального статистического наблюдения №4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона. Методические рекомендации МУ 2.6.1.0088-14. [Federal statistical surveillance Form #4-DOZ. Data on the doses of the public from natural and man-made adjusted background. Methodical recommendations MR 2.6.1.0088-14 (In Russ.)]

отображения распределения каждой выборки можно сделать вывод о постоянстве и прецизионности полученных значений в течение 3 лет.

Полученная таким образом величина среднего годового значения природного радиационного фона в 2018 и 2019 гг. (табл.) составила $0,89 \pm 0,14$ мЗв/год (доверительный интервал 0,85–0,93), что в 1,3 раза меньше, чем данные, представленные в отчётных формах федерального государственного статистического наблюдения № 4-ДОЗ (1,14 мЗв в год). Авторы не включили в сравнение данные по 2020 г., так как на момент оформления настоящей работы официальных данных по средним годовым значениям природного радиационного фона в г. Санкт-Петербурге в 2020 г. нет. Полученное авторами значение, измеренное термолюминесцентным методом в различные годы, включено в таблицу с целью показать незначительность изменения природной компоненты дозы.

На рисунке 2 представлен состав средней годовой эффективной дозы техногенного производственного облучения персонала в г. Санкт-Петербурге по данным за 2018 и 2019 гг. Исходя из данных информационных сборников [6, 7], средняя годовая эффективная доза техногенного производственного облучения персонала за счёт нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения в городе Санкт-Петербурге в 2018 и 2019 гг. была равна 1,28 мЗв и 1,33 мЗв соот-

ветственно. Таким образом, техногенная компонента индивидуальной дозы персонала составила 0,39 мЗв в 2018 г. и 0,44 мЗв в 2019 г. На рисунке 2 видно, насколько существенный вклад вносит природная компонента в формирование индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения персонала, даже с учётом возможных отклонений.

В работах [11, 12] приведён сложный алгоритм статистических процедур для вычитания фоновых значений. На наш взгляд, при применении термолюминесцентного метода исследования, когда невозможно провести измерения повторно по причине потери детектором накопленной информации после нагрева при первичном измерении, использование подобных алгоритмов в постоянном режиме в практике текущего ИДК не представляется необходимым. Авторы считают достаточным вычитание величины фона, усреднённой по показаниям дозиметров, однотипных с теми, что используются для измерений индивидуального эквивалента дозы персонала, из среднего по региону значения дозы персонала. Предусматривается вычитание дозы естественного фона, усреднённой по региону при формировании РБД и ФБД ДОП ЕСКИД.

Заключение

Настоящая работа показала, насколько существенным может быть вклад природной компоненты в формирование индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения персонала. Так, в г. Санкт-Петербурге около 70% от значения средней годовой эффективной дозы техногенного производственного облучения персонала приходится на природную компоненту дозы. Необходимо заметить, что данный вклад существенен лишь при оценке малых значений доз.

Предлагается следующий алгоритм для учёта природного радиационного фона при представлении данных по техногенному облучению персонала за счёт нормальной эксплуатации техногенных ИИИ:

1. Организация и проведение ИДК с выдачей дополнительного фонового ТЛ-дозиметра для учёта природного фона. Данный дозиметр должен быть откалиброван для определения операционной величины $H_p(10)$ и во время экспонирования индивидуальных дозиметров персонала должен располагаться на территории организации в помещении вдали от любых ИИИ. Контроль производится непрерывно со считыванием показаний экспонированных дозиметров один раз в квартал.

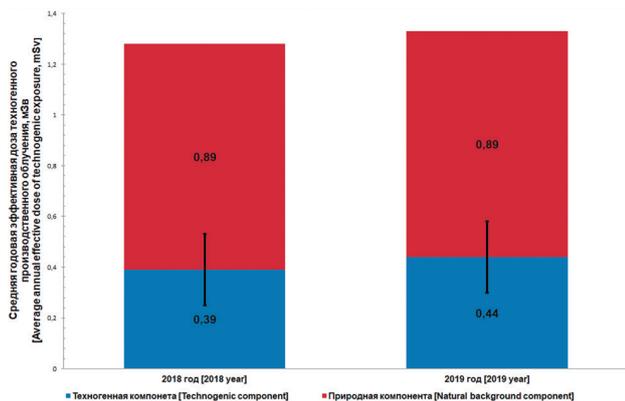


Рис. 2. Состав средней годовой эффективной дозы техногенного производственного облучения персонала в г. Санкт-Петербурге (2018–2019 гг.)

[Fig. 2. Composition of the average annual effective dose of technogenic industrial exposure of personnel in St. Petersburg (2018–2019)]

Среднее годовое значение природного радиационного фона в г. Санкт-Петербурге, полученное методом термолюминесцентной дозиметрии в 50 контрольных точках

Таблица

Average annual value of natural background radiation in St. Petersburg obtained by thermoluminescent dosimetry at 50 control points]

[Table

Год [year]	Среднее значение, мЗв [Average value, mSv]	Минимальное значение, мЗв [Minimum value, mSv]	Максимальное значение, мЗв [Maximum value, mSv]	Среднеквадратическое отклонение [Standard deviation]
2018	0,89	0,68	1,32	0,14
2019	0,89	0,65	1,26	0,14
2020	0,84	0,50	1,23	0,16

2. Проведение условной верификации полученных результатов путём сравнения значений индивидуальных эквивалентов доз персонала с показаниями фонового дозиметра. Для дальнейших этапов используются данные только из тех организаций, где показания фонового дозиметра не превышают индивидуальных эквивалентов доз для каждого из работников. Верификация проводится каждый квартал.

3. Получение по результатам года наблюдения и суммирования квартальных значений годового значения природного радиационного фона в помещении хранения ТЛ-дозиметра.

4. Расчёт среднего годового значения природного радиационного фона в субъекте РФ для выборки организаций, соответствующих п. 2.

5. Вычитание среднего годового значения природного радиационного фона в субъекте РФ из среднего годового значения дозы персонала данного субъекта РФ.

Таким образом, предлагаемый способ может быть рекомендован не для учета величины природного радиационного фона при проведении индивидуального дозиметрического контроля термолюминесцентным методом с целью оценки степени радиационной защиты персонала, а для формирования РБД и ФБД ДОП ЕСКИД. В информационных сборниках [5–9] представлены средние годовые эффективные дозы производственного облучения персонала, включающие техногенную и природную компоненты. Данная поправка позволит более корректно представлять дозы с выделением и оценкой техногенной компоненты облучения персонала за счёт нормальной эксплуатации ИИИ, что в дальнейшем позволит проводить адекватное сравнение состояния радиационной обстановки в зарубежных странах и России.

Литература

1. Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Кайдановский Г.Н., Ильин В.А. О возможности сравнения среднегодовых эффективных доз облучения медицинского персонала России и некоторых зарубежных стран // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 89-98.
2. Григорьев А.И., Панкратов Л.В. Проблемы вычитания фона при индивидуальном дозиметрическом контроле и радиационном контроле на открытой местности // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, №4. С. 42-48.
3. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.Н., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб., 2016. 72 с.
4. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб., 2017. 78 с.
5. Барковский А.Н., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб., 2018. 72 с.
6. Барковский А.Н., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб., 2019. 72 с.
7. Барковский А.Н., Руслан Р. Ахматдинов, Рустам Р. Ахматдинов, и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб., 2020. 70 с.
8. Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 2000. Report. Volume I, Annex E.
9. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия. Под редакцией академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. Санкт-Петербург, 2018. 431 с.
10. Юдин М.Ф., и др. Измерения активности радионуклидов. Справочное пособие. СПб.: 1997. 397 с.
11. Обеснюк В.Ф. К вопросу о вычитании радиационного фона. XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Дни науки – 2019». Посвящается 150-летию открытия периодического закона Д.И. Менделеевым: Материалы конференции. Озерск, 17-20 апреля 2019 г. – Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2019. С. 72-74.
12. Обеснюк В.Ф. Дозиметрический парадокс вычитания фона и способ его преодоления // АНРИ. 2020. №1. С. 25-36.

Поступила: 23.08.2021 г.

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: s.bazhin@niirg.ru

Кайдановский Георгий Наумович – исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника лаборатории радиационного контроля 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: Бажин С.Ю., Кайдановский Г.Н. Учёт вклада природного фона при контроле индивидуальных доз персонала // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 122-128. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-122-128

Consideration of the contribution of the natural background component during individual control of radiation doses to personnel

Stepan Yu. Bazhin, Georgiy N. Kaidanovsky

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

When ensuring radiation safety in the Russian Federation, there is a principle of separate independent assessment of doses from natural, medical, emergency and technogenic exposure. In practice, it is not always possible to comply with this principled approach. The established dose limits are related only to man-made radiation during normal operation of sources of ionizing radiation. However, during the formation of regional and federal databases on individual doses of personnel exposure, information is entered not on technogenic exposure, but on industrial exposure, that is, without subtracting the natural radiation background. The natural component of the individual dose at low radiation doses is quite significant. Failure to its subtraction leads to an overestimation of the individual dose of external exposure of personnel. Difficulties arise in the implementation of the subtraction of the natural radiation background: 1) in what cases it is necessary to subtract the background, 2) what value to choose for the subtracted background, 3) what method to measure the background, 4) at what stage of processing the measurement information to subtract the background. This article proposes a method for solving the problem of subtracting the natural background radiation from the values of individual doses of external exposure to personnel based on results of individual dosimetric control. Using the example of the city of St. Petersburg, the natural background radiation was measured by the thermoluminescent method of individual dosimetry at 50 control points for three consecutive years (2018–2020). To measure the natural background, we used individual thermoluminescent dosimeters of the same type as those used to measure individual equivalents of external radiation doses to personnel. The choice of using the thermoluminescent method as a predominant one for adjusting the average doses of external radiation from technogenic sources of ionizing radiation when subtracting the natural component of the dose has been substantiated. Comparison of official data on personnel exposure doses with the data obtained as a result of our own measurements is made. Recommendations are given on the use of the obtained values of the average natural radiation background in the formation of regional and federal databases on individual doses of personnel exposure.

Key words: ISDCR, subtraction of natural background radiation, individual dosimetric control, individual thermoluminescent dosimeter, industrial exposure, technogenic exposure.

Reference

1. Bazhin SYu, Shleenkova EN, Kaidanovsky GN, Ilyin VA. Possibilities of comparing the average annual effective doses of medical personnel in Russia and some foreign countries. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 89-98. (In Russian).
2. Grigorev AI, Pankratov LV. Problems of subtraction of the background in the process of the individual radiation control and radiating control on open air. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(4): 42-48. (In Russian).
3. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2015: information bulletin. Saint-Petersburg; 2016. 72 p. (In Russian).
4. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2016: information bulletin. Saint-Petersburg; 2017. 72 p. (In Russian).
5. Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2017: information bulletin. Saint-Petersburg; 2018. 72 p. (In Russian).
6. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2018: information bulletin. Saint-Petersburg; 2019. 72 p. (In Russian).
7. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses to the public of the Russian Federation in 2019: information bulletin. Saint-Petersburg; 2020. 70 p. (In Russian).
8. Sources and Effects of Ionizing Radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; 2000. Report. Volume I, Annex E.
9. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV, et al. Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures. Edited by academician of RAS G.G. Onischenko and prof. A.Yu. Popova. Saint-Petersburg; 2018. 431 p. (In Russian).
10. Yudin MF, et al. Measurements of activity of radionuclides. Reference manual. Saint-Petersburg; 1997. 397 p. (In Russian).
11. Obesnyuk V. To the question of the radiation background subtraction. XIX All-Russian Scientific and Practical Conference. Dedicated to the 150th anniversary of the discovery of the periodic law by D.I. Mendeleev.: Materials of the conference. Ozersk, April 17-20, 2019. P. 72-74 (In Russian).
12. Obesnyuk V. Dosimetric Paradox of Background Subtracting and Method of its Resolution. *ANRI = ANRI*. 2020;1: 25-26. (In Russian).

Received: August 23, 2021

Stepan Yu. Bazhin

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: s.bazhin@niirg.ru

For correspondence: Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior 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, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: s.bazhin@niirg.ru)

Georgiy N. Kaidanovsky – Ph.D., acting Leading Researcher of the Laboratory of Radiation Control, 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: Bazhin S.Yu., Kaidanovsky G.N. Consideration of the contribution of the natural background component during individual control of radiation doses to personnel. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 4. P. 122-128. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-14-4-122-128

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. Центр. 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 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. 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 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹ 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 Russ.)]

¹ МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 “Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations”. Moscow, Rosпотребнадзор, 2011, 40 p. (In Russ.)]

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

Литература

Если имеется 3-4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые три автора, затем ставится «и др.».

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430-447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124–169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553–98.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, №1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена, 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосякин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332) С. 5.

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332). 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. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

25. Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется в соответствии с Ванкуверским стилем (Vancouver Style). При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык.

Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Примеры:

Статья 1-6 авторов

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. *Arch Neurol*. 2005 Jan;62(1):112-6.

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Hallal AH, Amortegui JD, Jeroukhimov IM, Casillas J, Schulman CI, Manning RJ, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography accurately detects common bile duct stones in resolving gallstone pancreatitis. *J Am Coll Surg*. 2005 Jun;200(6): 869-75.

Статья в электронном журнале

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397–399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

Статья в электронном журнале с DOI:

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanagan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *Am J Sports Med* [Internet]. 2012 Dec;40(12): 2872-8. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013]

Книга (печатная)

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

Книга (электронная)

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach [Internet]. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://ezproxy.lib.monash.edu.au/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1647-00363546512458223> [Accessed 2 Nov 2012]

Отчет официальной организации (государственный, ведомственный, пр.).

Rowe IL, Carson NE. Medical manpower in Victoria. East Bentleigh (AU): Monash University, Department of Community Practice; 1981. 35 p. Report No.: 4.

Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63, 2001.

Веб-страница

Diabetes Australia. Diabetes globally [Internet]. Canberra ACT: Diabetes Australia; Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed Nov 5 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

Из сборника конференций (тезисы)

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics:

Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

Стандарт

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. *Design of steel structures. General rules. Structural fire design*. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Статьи направляются по адресу: 197101, г. СанктПетербург, ул. Мира, д. 8, Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». Редакция журнала «Радиационная гигиена» и по email: journal@niirg.ru.

Справки по телефону: (812) 2334283 и (812) 2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»).

Факс: (812) 2335363, 2334283.