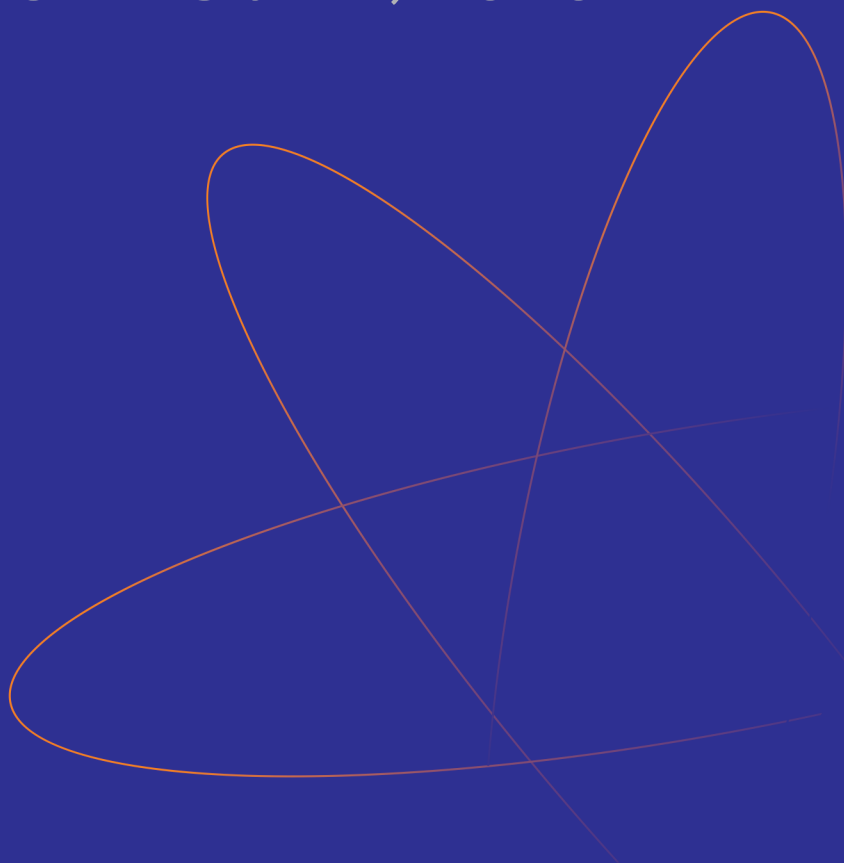


ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 13 № 1, 2020



**Научно-практический
журнал**

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

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

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

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

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

Издается ежеквартально.

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

Ссылка на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» обязательна.

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

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

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

Тираж 200 экз.

ISSN 1998-426X



9 771998 426783 >

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

© «Радиационная гигиена», 2020

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 13 № 1, 2020

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

Алексанин 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», д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Quarterly published

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

RADIATION HYGIENE

Chairman of Editorial Council
Gennadiy G. Onishchenko

Editor-in-Chief
Ivan K. Romanovich



RADIATION HYGIENE

Vol. 13 № 1, 2020

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 13 № 1, 2020

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Иванов С.А., Библин А.М., Репин В.С., Варфоломеева К.В. О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило–Камчатском регионе Тихого океана.....	6	
Аклеев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю. Сравнительный анализ медико–дозиметрических последствий аварии 1957 года и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий.....	16	
Голиков В.Ю. Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС Фукусима-1	27	
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.....	38	
Камышанская И.Г., Черемисин В.М., Водоватов А.В., Борискина А.Н. Результаты клинической апробации низкодозовых протоколов проведения цифровой линейной томографии органов грудной клетки.....	47	
Сабурова А.С., Филимонова М.В., Южаков В.В., Шевченко Л.И., Яковлева Н.Д., Бандурко Л.Н., Корецкая А.Е., Фомина Н.К., Сабуров В.О., Филимонов А.С. Влияния ингибитора синтаз оксида азота T1023 на развитие лучевого пневмофиброза у крыс.....	60	
САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР		
Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Шосафарова Ш.Г., Махмудова М.М. Радоновый мониторинг на территории северного Таджикистана	68	
РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ		
Медников И.В., Васильев В.В., Бусыгин А.С., Собко А.А. Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации тяжеловодного исследовательского ядерного реактора НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ.....	74	
ИЗ ИСТОРИИ ГИГИЕНЫ		
Панин В.Ф., Чередникова В.И. Профессор Федор Григорьевич Кротков – главный гигиенист Красной Армии.....	84	
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ		
Шалагинов С.А., Крестинина Л.Ю. Уральская когорта населения, облученного в детском возрасте	91	
МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА		
Сакович В.А. К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска	94	
РЕЦЕНЗИИ		
Балтрукова Т.Б. Рецензия на монографию «Научные основы радиационной защиты в современной медицине» Том 1 «Лучевая диагностика»	102	
ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»		105

CONTENTS

Vol. 13 № 1, 2020

RESEARCH ARTICLES

Gennadiy G. Onischenko, Anna Yu. Popova, Ivan K. Romanovich, Sergey A. Ivanov, Artem M. Biblin, Viktor S. Repin, Kseniya V. Varfolomeeva	
Results of the fourth combined scientific expedition for the radition monitoring in the Kurily–Kamchatka region of the Pacific ocean.....	14
Alexander V. Akleyev, Marina O. Degteva, Lyudmila Yu. Krestinina	
Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency	25
Vladislav Yu. Golikov	
Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents	36
Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky	
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.....	45
Irina G. Kamyshanskaya, Vladimir M. Cheremisin, Aleksandr V. Vodovатов, Alena N. Boriskina	
Results of the clinical evaluation of the low-dose protocols of the digital linear tomography of the chest.....	58
Alina S. Saburova, Marina V. Filimonova, Vadim V. Yuzhakov, Lyudmila I. Shevchenko, Nina D. Yakovleva, Lyubov N. Bandurko, Anastasiya E. Koretskaya, Natalya K. Fomina, Vyacheslav O. Saburov, Alexandr S. Filimonov	
The influence of nitric oxide synthases inhibitor T1023 on the development of radiation pneumofibrosis in rats	66
SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE	
Ulmas M. Mirsaidov, Kholmurod M. Nazarov, Shoir G. Shosafarova, Manizha M. Mahmudova	
Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan.....	72
RADIATION SAFETY FOR THE DECOMMISSIONING OF THE NUCLEAR LEGACY FACILITIES	
Ivan V. Mednikov, Valeriy V. Vasilyev, Aleksey S. Busygin, Aleksandr A. Sobko	
Provision of the radiation safety for the decommissioning of the heavy-water research nuclear reactor NRC «Kurchatov Institute» – ITEP	82
FROM HYGIENE HISTORY	
Vladimir F. Panin, Valentina I. Cherednikova	
Professor Fedor Grigoryevich Krotkov – chief hygienist of the Red Army.....	90
BRIEF MESSAGES	
S.A. Shalaginov, L.Yu. Krestinina	
Ural cohort of the population exposed in childhood.....	92
EXPERT OPINION	
Vadim A. Sakovich	
On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk	100
REVIEWS	
Tatyana B. Baltrukova	
Review of the monograph «Scientific bases of radiation protection in modern medicine» Volume 1 «Radiation diagnostics».....	104
JOURNAL OF RADIATION HYGIENE – INSTRUCTIONS FOR AUTHORS.....	105

О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило–Камчатском регионе Тихого океана

Г.Г. Онищенко^{1,4}, А.Ю. Попова^{2,5}, И.К. Романович³, С.А. Иванов³,
А.М. Библин³, В.С. Репин³, К.В. Варфоломеева³

¹Российская академия наук, Москва, Россия

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

³Санкт-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

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

⁵Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

Данная статья является очередной в серии статей, посвященных изучению последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» и влиянию аварийных выбросов и сбросов радионуклидов на загрязнение морской биоты и прибрежных территорий дальневосточных регионов. Осенью 2019 г. на учебно-производственном судне «Профессор Хлюстин» выполнена четвертая научная экспедиция Русского географического общества по мониторингу радиационной обстановки в Курило–Камчатском регионе Тихого океана по изучению последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». В экспедиции приняли участие 9 специалистов из некоммерческой организации «Фонд полярных исследований «Полярный фонд», Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический институт», Акционерное общество «Радиовый институт им. В.Г. Хлопина» Госкорпорации «Росатом», Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Федеральное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского». Целью четвертой экспедиции являлось исследование радиационной обстановки в Японском море и Курило–Камчатском регионе Тихого океана после аварии на АЭС «Фукусима-1» — продолжение аналогичных морских экспедиций РГО 2011, 2012 и 2014 гг. Обследование проведено в акватории Японского и частично Охотского морей. В результате проведенных исследований установлено, что содержание радионуклидов цезия-137, стронция-90 в морской воде, гидробионтах, почве, наземной и водной растительности по-прежнему находится на уровне фоновых значений, обусловленных глобальными выпадениями.

Ключевые слова: морская экспедиция, Русское географическое общество, АЭС «Фукусима-1», радиационная авария, радиационная обстановка, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁹⁰Sr, ³H, объекты окружающей среды.

Введение

В период с 27 сентября по 18 октября 2019 г. выполнена четвертая, начиная с 2011 г., комплексная многопрофильная научная экспедиция по мониторингу радиационной обстановки в Курило–Камчатском регионе Тихого океана по изучению последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Экспедиционные работы проводились Некоммерческой организацией (НО) «Фонд полярных исследований «Полярный фонд» в соответствии с грантом Русского географического общества (РГО) «Научно-исследовательская экспедиция по изучению

последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» и выполнялись на учебно-производственном судне (УПС) «Профессор Хлюстин», принадлежащем Дальневосточному бассейновому филиалу ФГУП «РОСМОРПОРТ». В научной программе экспедиции приняли участие 9 специалистов из НО «Фонд полярных исследований «Полярный фонд», ФГБУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический институт», ФГУП «НПО «Радиовый институт имени В.Г. Хлопина» Госкорпорации «Росатом», НИЦ «Курчатовский институт», ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гиги-

Романович Иван Константинович

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: I.Romanovich@niirg.ru

ены имени профессора П.В. Рамзаева», а также ФБОУВПО «Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского».

Авария на АЭС «Фукусима-1» (Япония) привела к значительному радиоактивному загрязнению части территории Японии и вод Тихого океана. В целом ряде отчетов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [1, 2], Научного комитета по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) [3], научных публикациях [4, 5–9] приведена подробная хронология развития радиационной аварии, пути и уровни радиоактивного загрязнения окружающей среды, оценка активностей радионуклидов, выброшенных из аварийных реакторов. Так, в соответствии с докладом НКДАР ООН [3, 8, 9] выброс ^{131}I составил порядка 100–500 ПБк, ^{137}Cs – от 6 до 20 ПБк. Сбросы в океан оценены на уровне от 3 до 6 ПБк ^{137}Cs , ^{131}I – в 3 раза больше. Большая часть активности, выброшенной из аварийных реакторов в атмосферу, в конечном итоге осела на поверхность вод Тихого океана и вместе с прямыми сбросами определила уровень его загрязнения [3, 8, 9]. Наибольшему радиоактивному загрязнению подверглась акватория Тихого океана в радиусе 80 км от места расположения АЭС «Фукусима-1». Со второй половины апреля 2011 г., когда выбросы радионуклидов в атмосферу значительно снизились, на первое место по загрязнению вод Тихого океана вышли прямые сбросы высокорадиоактивной воды в акваторию порта Фукусима (как непреднамеренные – утечки, так и преднамеренные – сброс жидких радиоактивных отходов из хранилищ). Утечки высокорадиоактивной воды из подвальных помещений реакторов, смешивающейся с грунтовыми водами и водами естественных осадков с площадки аварийных реакторов, стали долговременным источником загрязнения акватории Тихого океана в районе АЭС «Фукусима-1». Данная проблема окончательно не решена и на начало 2020 г. В настоящее время в цистернах на территории АЭС скопилось уже свыше 1 млн тонн очищенной (исключая тритий), но все же радиоактивной воды, количество которой ежедневно увеличивается более чем на 170 тонн. Возможности по дальнейшему хранению указанной воды при постоянном росте ее количества почти исчерпаны. Комитет экспертов при правительстве Японии считает наиболее рациональным слить радиоактивную воду, содержащую тритий, в океан [10]. К долговременным источникам радиоактивного загрязнения вод Тихого океана необходимо отнести также стоки рек с радиоактивно-загрязненных территорий, а также вымывание радионуклидов из донных отложений и песка береговой линии. пляжные пески на расстоянии до 100 км от АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. были загрязнены в результате сорбции радионуклидов из морской воды. Этот источник радиоактивного загрязнения океана сопоставим с выбросами ^{137}Cs с площадки АЭС «Фукусима-1» в 2013–2016 гг. и поступлением ^{137}Cs из Фукусимы через реки [6].

Значительное радиоактивное загрязнение акватории Тихого океана в первые годы после аварии на АЭС «Фукусима-1» привело к аккумуляции радионуклидов гидробионтами. По данным правительства Японии, с момента аварии на АЭС «Фукусима-1» и до 25.12.2019 г. был проведен отбор и исследование 125 921 пробы морской рыбы. Среди отобранных проб в 2275 случаях удельная активность превышала 100 Бк/кг. Последний раз проба морской рыбы с превышением 100 Бк/кг была выявлена

в 2018 г. [11]. В 2011 г. примерно половина проб рыбы, отобранных в прибрежных водах префектуры Фукусима, содержала радиоактивный цезий выше 100 Бк/кг. К 2015 г. ситуация изменилась – менее чем в 1% измеренных проб рыб уровень содержания радионуклидов цезия превышал 100 Бк/кг, а 80% измерений были ниже предела обнаружения [11]. Однако, по данным [12], в рыбе из породы ромбовых скатов, которая была поймана в Тихом океане недалеко от аварийной АЭС «Фукусима-1» на глубине 62 м, концентрация радиоактивного цезия составила 161 Бк/кг.

Радиоактивный цезий фукусимского происхождения обнаруживали в рыбе и на расстояниях в тысячи километров от японских островов: в тихоокеанском голубом тунце, пойманном в Калифорнии (США) [13], и нерке, выловленной в Британской Колумбии (Канада) [14].

Интересное наблюдение представила группа ученых из университета Цукуба, университета Канадзава и Японского агентства науки и технологий по изучению морских недр (JAMSTEC) [15]. Ученые установили, что радиоактивный цезий с АЭС «Фукусима-1» вернулся к берегам Японии намного раньше, чем ожидалось. Уже в 2012 г. пробы воды, взятые в японских водах Восточно-Китайского моря, показали повышенное содержание цезия, а пик концентрации цезия в японских морских акваториях наблюдался в 2014 г. Впервые установлено, что зимой радиоактивный цезий, увлекаемый холодными подводными течениями, стал перемещаться по Тихому океану в западном направлении.

Вышеприведенные материалы и являются исходными данными для постановки задач четвертой научной экспедиции РГО.

Цели, задачи и программа четвертой комплексной научной экспедиции

Целью четвертой научной экспедиции РГО являлось продолжение исследований по мониторингу долговременных изменений содержания радионуклидов в почве, наземной растительности, воздухе, морской воде, гидробионтах и донных отложениях в Японском море и Курило-Камчатском регионе Тихого океана после аварии на АЭС «Фукусима-1». Четвертая научная экспедиция продолжила серию аналогичных морских экспедиций РГО, проведенных в 2011, 2012 и 2014 гг., и сухопутных экспедиций, выполненных специалистами ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Роспотребнадзора в 2011–2014 гг. [1, 16–22].

Программой четвертой научной экспедиции, утвержденной первым вице-президентом РГО членом-корреспондентом РАН А.Н. Чилингаровым, предусматривалось частичное повторение маршрутов морских экспедиций РГО 2011, 2012 и 2014 гг. с высадкой на островах Курильской гряды и острове Сахалин.

Перед участниками экспедиции ставились следующие задачи:

- отбор проб воды на содержание ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^3H в точках мониторинга, расположенных к востоку от Японии, а также в 2–3 точках на содержание изотопов плутония;
- изучение содержания радионуклидов в морской воде, расположенной на разных горизонтах, с помощью высокочувствительного подводного гамма-спектрометра;
- отбор проб аэрозолей приземного слоя

атмосферного воздуха для определения техногенных и природных радионуклидов (срок экспозиции 1 сут, для определения ^{14}C - срок экспозиции 2–3 сут);

- отбор проб атмосферной влаги на содержание трития;
- отлов рыбы и других гидробионтов (по ходу маршрута, где это возможно и безопасно);
- отбор проб донных отложений у побережья Приморского края, Курильских островов, острова Сахалин;
- отбор проб грунта и наземной растительности, измерение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения и запись полевых гамма-спектров вблизи побережья в Приморском крае (бухта Джигит), Курильских островов и острова Сахалин;
- выполнение непрерывного измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения по всему маршруту.

Для Роспотребнадзора в экспедиции было выделено 1 место, на которое и был делегирован представитель ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Иванов Сергей Анатольевич младший научный сотрудник радиохимической лаборатории.

Перед специалистом Роспотребнадзора были поставлены следующие задачи:

- измерение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения;
- определение энергетического спектра гамма-излучения в воздухе;
- отбор проб морской воды и морепродуктов;
- измерение содержания радионуклидов цезия в пробах аэрозолей воздуха на борту судна (пробы отбирались другими участниками экспедиции);
- исследование проб морской воды на содержание трития.

Схематизированная карта фактического маршрута экспедиции

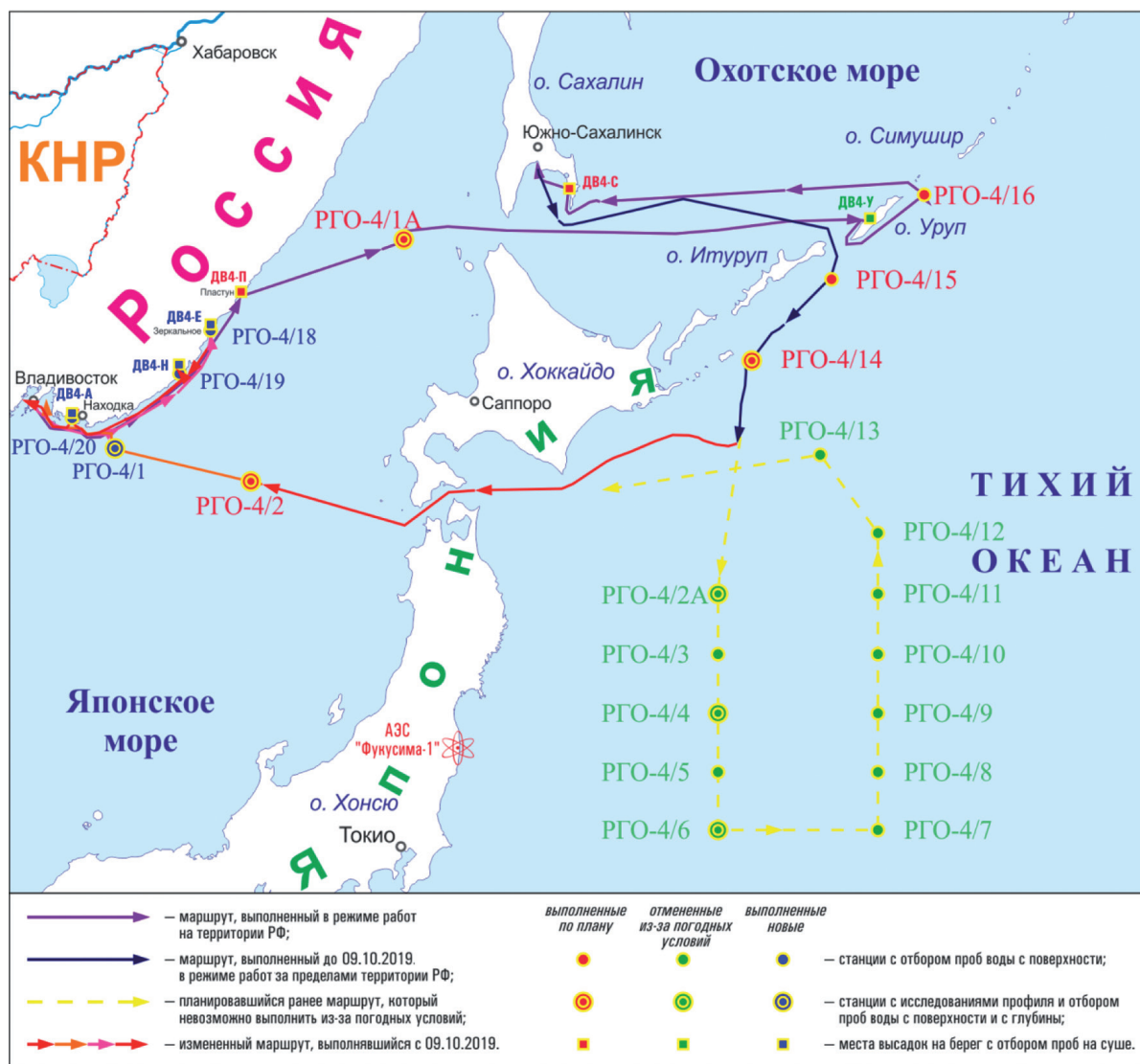


Рис. 1. Карта маршрута экспедиции с указанием точек отбора проб
[Fig. 1. Map of the expedition route with the indicated sampling points]

Краткие итоги четвертой комплексной научной экспедиции РГО (данные Роспотребнадзора)

К сожалению, из-за погодных условий не удалось реализовать план четвертой комплексной многопрофильной экспедиции РГО по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана по программе «Научно-исследовательской экспедиции по изучению последствий аварии на АЭС «Фукусима-1»». С самого начала сильные шторма привели к изменению маршрута экспедиции, не давая возможности УПС «Профессор Хлюстин» выйти в открытое море. В этой связи были назначены новые станции отбора проб и высадки на берег в Приморском крае, представленные на рисунке 1. Несмотря на несколько попыток, выйти в Тихий океан к востоку от места расположения аварийной АЭС «Фукусима-1» не удалось из-за тайфуна «Хагибис».

Мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД)

Измерения МАЭД гамма-излучения проводились на палубе и в каютах УПС «Профессор Хлюстин» в течение всей экспедиции, а также при высадке на берег в Приморском крае и о. Сахалин в местах отбора проб, с помощью портативного универсального дозиметра-радиометра МКС АТ-1125 (производства «Атомтех», Республика Беларусь). МАЭД на палубе и в каютах УПС «Профессор Хлюстин» в течение всей экспедиции составила в среднем 0,015 мкЗв/ч, при максимальном значении 0,03 мкЗв/ч, в точках отбора проб в местах высадки на берег – 0,07 мкЗв/ч и 0,15 мкЗв/ч соответственно. Данные значения МАЭД гамма-излучения соответствуют фоновым значениям.

Активность проб аэрозолей приземного слоя атмосферного воздуха

В ходе экспедиции специалистами из ФГУП «НПО «Радиовый институт имени В.Г. Хлопина» при помощи фильтровоздушной установки производился отбор проб аэрозолей приземного слоя атмосферного воздуха в объеме от 11 000 м³ до 25 000 м³ для определения техногенных и природных радионуклидов. В качестве фильтров использовалась ткань Петрянова. После отбора проб аэрозолей фильтры (всего 19) передавались специалисту Роспотребнадзора для проведения оперативных измерений на борту УПС «Профессор Хлюстин». Оперативное измерение гамма-излучающих радионуклидов в фильтрах проводилось с помощью полевого электроохлаждаемого полупроводникового гамма-спектрометра с детектором из особо чистого германия TSP-DX-100T-PAC-PKG-1 фирмы ORTEC (США). Для снижения фонового воздействия детектор и проба помещались в свинцовую защиту (рис. 2). Длительность измерений для каждой пробы составляла от 18 000 до 25 200 с (от 5 до 7 ч); образец спектра представлен на рисунке 3. Анализ спектров 19 фильтров показал, что в аэрозолях приземного слоя атмосферного воздуха, отобранных по маршруту экспедиции, преобладающими являются природные радионуклиды и ⁷Be космогенного происхождения, а незначительные количества ¹³⁷Cs, обнаруженные в спектрах фильтров, сопоставимы по амплитуде с уровнями, регистрируемыми в фоновых спектрах (без фильтра).



Рис. 2. Полевой электроохлаждаемый полупроводниковый гамма-спектрометр с детектором из особо чистого германия TSP-DX-100T-PAC-PKG-1 со свинцовой защитой во время проведения измерений

[Fig. 2. Field electrically cooled semiconductor gamma-spectrometer with high purity germanium detector -DX-100T-PAC-PKG-1 with the lead shielding during the measurements]

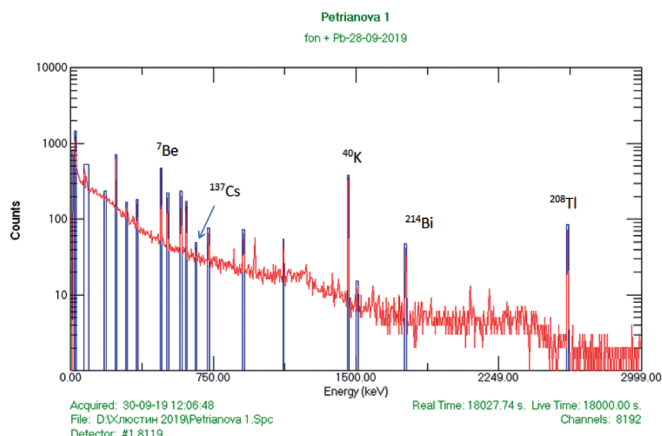


Рис. 3. Спектр фильтра № 1 (на рисунке видны пики дочерних радионуклидов из семейств распада урана и тория, ⁴⁰K, ⁷Be космогенного происхождения и ¹³⁷Cs)

[Fig. 3. Spectrum of the filter #1. Peaks of the daughter nuclides of the uranium and thorium series, ⁴⁰K, ⁷Be of cosmogenic origin, and ¹³⁷Cs are visible on the spectrum]

Содержание радионуклидов в пробах гидробионтов, водорослей, почве и наземной растительности

Предварительное спектрометрическое исследование проб объектов окружающей среды, выполненное непосредственно на борту УПС «Профессор Хлюстин», показало отсутствие техногенных радионуклидов в исследованных образцах выше уровней глобальных выпадений. Все пробы для дальнейшего исследования были доставлены в радиохимическую лабораторию ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева».

Радиохимическое исследование проб окружающей среды проводилось по «Методике выполнения измерений удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой и сельскохозяйственной продукции, почвы и других объектов внешней среды» (свидетельство

Таблица 1

Результаты радиохимических исследований проб объектов окружающей среды, отобранных в ходе проведения четвертой экспедиции РГО

[Table 1]

Results of the radiochemical analysis of the environmental samples, collected during the fourth expedition of RGO

№	Точка отбора проб в соответствии с картой маршрута [Sampling point according to the route map]	Наименование пробы (место отбора) [Name of sample (place of sampling)]	Активность ^{137}Cs , Бк/кг [^{137}Cs activity concentra- tion Bk/kg]	Активность ^{90}Sr , Бк/кг [^{90}Sr activity concentra- tion Bk/kg]
1	ДВ4-С	Рыба Терпуг (<i>Hexagrammidae</i>) (залив Анива) [Terpug fish (<i>Hexagrammidae</i>) (Aniva bay)]	0,56±0,17	0,13±0,04
2	ДВ4-Н	Рыба Бычок (<i>Gobiidae</i>) (бухта у мыса Низменный) [humped rock cod fish (<i>Gobiidae</i>) (cape Nyzmenny bay)]	0,19±0,08	<0,05
3	ДВ4-С	Растение Лопух (<i>Arctium</i>) (берег залива Анива между Новиковым и Южным) [Burdock plant (<i>Arctium</i>) (coast of the Aniva bay between Novikov and Yuzhniy)]	0,25±0,10	0,34±0,10
4	ДВ4-С	Растение Полынь (<i>Artemisia</i>) (берег залива Анива между Новиковым и Южным) [sage plant (<i>Artemisia</i>) (coast of the Aniva bay between Novikov and Yuzhniy)]	0,22±0,09	0,070±0,035
5	ДВ4-С	Растение Шиповник (<i>Rosa</i>) (берег залива Анива между Новиковым и Южным) [briar plant (<i>Rosa</i>) (coast of the Aniva bay be- tween Novikov and Yuzhniy)]	0,52±0,16	0,19±0,07
6	ДВ4-Н	Растение Полынь (<i>Artemisia</i>) (берег к югу от мыса Низменный) [sage plant (<i>Artemisia</i>) (coast to the south of cape Nyzmenny)]	0,090±0,045	0,58±0,17
7	ДВ4-П	Растение Вейник (<i>Calamagrostis</i>) (берег бухты Джигит, залив Рында) [Woodreed plant (<i>Calamagrostis</i>) (coast of Dzhigit creek, Rynda bay)]	<0,05	<0,05
9	ДВ4-А	Трава разная (берег бухты Подосенова у мыса Подосенова) [Grass (coast of Podosenova creek near cape Podosenov)]	0,18±0,07	0,180±0,07
10	ДВ4-С	Водоросли Ламинария (<i>Laminaria</i>) (берег за- лива Анива между Новиковым и Южным) [Laminaria (<i>Laminaria</i>) (coast of the Aniva bay between Novikov and Yuzhniy)]	0,10±0,03	<0,05
11	ДВ4-Е	Водоросли Ламинария (<i>Laminaria</i>) (берег бухты Зеркальная) [Laminaria (<i>Laminaria</i>) (coast of Zerkalnaya creek)]	0,49±0,19	0,18±0,07
12	ДВ4-П	Высшая водная растительность (берег бухты Джигит, залив Рында) [Water plants (coast of Dzhigit creek, Rynda bay)]	0,14±0,06	0,06±0,03
13	ДВ4-Е	Высшая водная растительность (берег бухты Зеркальная) [Water plants (coast of Zerkalnaya creek)]	0,11±0,04	0,090±0,045
14	ДВ4-Н	Грибы Опята (<i>Armillaria</i>) (берег к югу от мыса Низменный) [Honey fungus (<i>Armillaria</i>) (coast to the south of cape Nyzmenny)]	8,7±1,7	2,04±0,41

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» Федерального государственного агентства по техническому регулированию и метрологии № 1730/08 от 08 декабря 2008 г.), а также в соответствии с Методическими рекомендациями МР 2.6.1.0094-14 «Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах». Предварительно все пробы были взвешены, высушены и озолены при температуре не более 250 °С и без открытого

огня. Результаты радиохимических исследования проб объектов внешней среды представлены в таблице 1.

Представленные в таблице 1 результаты показывают, что содержание ^{137}Cs в пробах рыб, морских водорослей и морской растительности находятся на уровне загрязнения, обусловленного глобальными выпадениями, в том числе и в пробе опят, отобранных к югу от мыса Низменный (Приморский край).

Результаты спектрометрических исследований ^{137}Cs в пробах почвы, отобранных в ходе проведения четвертой экспедиции РГО, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты спектрометрических исследований проб объектов окружающей среды, отобранных в ходе проведения четвертой экспедиции РГО

[Table 2]

Results of the spectrometric analysis of the environmental samples collected during the fourth expedition of RGO

№	Точка отбора проб в соответствии с картой маршрута [Sampling point according to the route map]	Наименование пробы (место отбора) [Name of sample (place of sampling)]	Активность ^{137}Cs , Бк/кг [^{137}Cs activity concentration Bk/kg]
1	ДВ4-Н3	Почва (лес на берегу к югу от мыса Низменный) [Soil (forest on the shore to the south of cape Nyzmennyi)]	37±8
2	ДВ4-Н8	Почва (лес к югу от мыса Низменный) [Soil (forest to the south of cape Nyzmennyi)]	30±9
3	ДВ4-Е4	Почва (берег бухты Зеркальная) [Soil (shore of the Zerkalnaya bay)]	37±11
4	ДВ4-Е7	Грунт песчаный (берег бухты Зеркальная) [Sand soil (shore of the Zerkalnaya bay)]	<3
5	ДВ4-Е9	Почва 2 (берег бухты Зеркальная) [Soil 2 (shore of the Zerkalnaya bay)]	20±7
6	ДВ4-П9	Грунт песчаный (пляж бухты Джигит, залив Рында) [Sand soil (beach of the Dzhigit creek, Rynda bay)]	<3
7	ДВ4-А1	Почва (берег бухты Подосенова у мыса Подосенова) [Soil (coast of the Podosenova creek near Podosenova cape)]	18±7
8	ДВ4-А4	Почва 2 (берег бухты Подосенова у мыса Подосенова) [Soil 2 (coast of the Podosenova creek near Podosenova cape)]	16±7
9	ДВ4-А5	Грунт песчаный с литорали (берег бухты Подосенова у мыса Подосенова) [Littoral sand soil (coast of the Podosenova creek near Podosenova cape)]	<3

Из таблицы 2 видно, что содержание ^{137}Cs во всех пробах почвы и грунта, отобранных в результате высадки на берег, находится на уровне глобальных выпадений.

Содержание трития в морской воде

В ходе экспедиции в 4 точках с разной глубины было отобрано 9 проб морской воды объемом 40 мл. Все пробы были доставлены в лабораторию экологии ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева». Исследования удельной активности

трития проводились в соответствии с методикой выполнения измерений активности альфа-бета-излучающих радионуклидов в жидких пробах. Пробы морской воды подвергались дистилляции, аликвота дистиллята объемом 10 мл смешивалась с аналогичным объемом сцинтиллятора Optiphase. Измерение удельной активности трития в счетных образцах производилось на радиометре альфа-, бета- излучения «Quantulus 1220» (производство США). Результаты исследований представлены в таблице 3. Содержание трития во всех пробах морской воды было ниже 2 Бк/л (при времени измерения пробы 12 ч).

**Данные исследований проб морской воды
на содержание трития**

Таблица 3

[Table 3]

Results of the tritium concentration analysis in the sea water

№	Точка отбора проб в соответствии с картой маршрута [Sampling point according to the route map]	Глубина, м [Depth, m]	Av, H-3, Бк/ кг (л) [Av, H-3, Bk/ kg (l)]
1	РГО 4/1	Поверхность [surface]	<2
2	РГО 4/1	187	<2
3	РГО 4/1A	Поверхность [surface]	<2
4	РГО 4/1A	200	<2
5	РГО 4/2	Поверхность [surface]	<2
6	РГО 4/2	260	<2
7	РГО 4/2	305	<2
8	РГО 4/14	Поверхность [surface]	<2
9	РГО 4/14	187	<2

Заключение

Четвертая комплексная многопрофильная научная экспедиция Русского географического общества по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана и изучению последствий для данного региона аварии на АЭС «Фукусима-1» (27 сентября – 18 октября 2019 г., учебно-производственное судно «Профессор Хлюстин») выполнила программу исследований по оценке содержания техногенных радионуклидов в объектах внешней среды в акватории Японского и частично Охотского морей. Установлено, что техногенных радионуклидов «фукусимского» происхождения во всех пробах объектов внешней среды, отобранных в результате высадки на берег (почва, наземная растительность), а также пробах рыб, морских водорослей и морской растительности, не выявлено. Следовательно, спустя 8 лет после аварии на АЭС «Фукусима-1» содержание техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды в акватории Японского и Охотского морей остается на уровне глобальных выпадений, а содержание трития в морской воде не превышает 2 Бк/л.

Благодарности

Авторы выражают благодарность участникам экспедиции, сотрудникам ФГУП «НПО «Радиовый институт имени В.Г. Хлопина» за помощь в отборе проб и полезное взаимодействие во время экспедиции.

Литература

1. The Fukushima Daiichi Accident Technical Volume 1. Description and Context of the Accident. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). 226 p.
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). 2015. The Fukushima Daiichi Accident. In: Technical Volume 4. Radiological Consequences. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). 250 p.
3. UNSCEAR 2013. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. Scientific Annex A. United Nations, New York, 2014. 311 p.
4. Романович И.К. и др. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации; под ред. академика РАМН Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
5. Buesseler K. et al. Fukushima Daiichi-derived radionuclides in the ocean: transport, fate, and impacts // Annual review of marine science. 2017. Vol. 9. P. 173-203.
6. Sanial V. et al. Unexpected source of Fukushima-derived radiocesium to the coastal ocean of Japan // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, No. 42. P. 11092-11096.
7. Pratama M.A. et al. Future projection of radiocesium flux to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant // Scientific reports. 2015. Vol. 5. P. 8408.
8. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». М.: Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. 408 с. ISBN 978-5-9907220-5-7.
9. Аклеев А.В., Иванов В.К., Сазыкина Т.Г., Шинкарев С.М. Последствия ядерной аварии на АЭС «Фукусима-1» (обзор доклада НКДАР ООН 2013 г.) // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60, № 5. С. 12-24.
10. В Японии предложили варианты утилизации зараженной воды с «Фукусима -1»: http://fukushima-news.ru/news/v_japonii_predlozhili_variandy_utilizacii_zarazhjonnoj_vody_s_fukusima_1/2020-01-31-3325 (Дата обращения: 02.03.2020)
11. The Solution of stop the Contaminated Water and The Safety of Fishery Products at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (provisional translation) Dec. 2019 Fisheries Agency of Japan: <https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/attach/pdf/index-94.pdf> (Дата обращения: 16.02.2020)
12. Высокое содержание цезия обнаружено в рыбе вблизи «Фукусимы»: http://fukushima-news.ru/news/vysokoe_soderzhanie_vezija_obnaruzheno_v_rybe_vblizi_fukusimy/2019-02-06-3281 (Дата обращения: 16.02.2020)
13. Madigan D.J., Baumann Z., Fisher N.S. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2012. Vol. 109, No. 24. P. 9483-9486.
14. Domingo T. et al. Studying levels of Fukushima-derived radioactivity in sockeye salmon collected on the west coast of Vancouver Island // Radiation Physics and Chemistry. 2017. Vol. 140. P. 186-189.
15. Цезий с «Фукусимы» нашел короткий путь обратно: http://fukushima-news.ru/news/cezij_s_fukusimy_nashel_korotkij_put_obratno/2019-07-11-3300 (Дата обращения: 16.02.2020)
16. Никитин А.И., Рамзаев В.П., Осокин В.М. и др. Экспедиционные радиоэкологические исследования в Японском море и северо-западной части Тихого океана после аварии на АЭС «Фукусима-1»: предварительные результаты // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 3. С. 14-35.

17. Библин А.М., Иванов С.А., Рамзаев В.П., Басалаева Л.Н. О некоторых результатах третьей комплексной многопрофильной экспедиции Русского Географического Общества по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском районе Тихого океана в 2014 г. // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. С. 62-66.
18. Ramzaev V., Barkovsky A., Goncharova Yu., Gromov A., Kaduka M., Romanovich I. Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011 // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 118. P. 128-142.
19. Рамзаев В.П., Иванов С.А., Гончарова Ю.Н. и др. Исследование радиоактивного загрязнения морской биоты в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 4. С. 5-11.
20. Онищенко Г.Г., Романович И.К., Барковский А.Н. и др. Радиационная обстановка в Дальневосточных субъектах Российской Федерации после аварии на АЭС «Фукусима-1» по данным весенне-летних обследований 2011 года // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 3. С. 7-13.
21. Онищенко Г.Г., Репин В.С., Романович И.К. Оценка радиационных рисков вследствие потребления дальневосточной промысловой рыбы после аварии на АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. С. 5-15.
22. Онищенко Г.Г., Романович И.К., Балонов М.И. и др. Авария на АЭС «Фукусима-1»: Первые итоги аварийного реагирования. Сообщение 1: общие сведения об аварии и радиационной обстановке // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 2. С. 5-12.

Поступила: 26.02.2020 г.

Онищенко Геннадий Григорьевич – доктор медицинских наук, профессор, академик Российской академии наук, Москва, Россия

Попова Анна Юрьевна – доктор медицинских наук, профессор, руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: i.romanovich@niirg.ru

Иванов Сергей Анатольевич – младший научный сотрудник радиохимической лаборатории Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, руководитель отдела здоровья 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

Варфоломеева Ксения Владимировна – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Иванов С.А., Библин А.М., Репин В.С., Варфоломеева К.В. О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15

Results of the fourth combined scientific expedition for the radiation monitoring in the Kurily-Kamchatka region of the Pacific ocean

Gennadiy G. Onischenko^{1,4}, Anna Yu. Popova^{2,5}, Ivan K. Romanovich³, Sergey A. Ivanov³, Artem M. Biblin³, Viktor S. Repin³, Kseniya V. Varfolomeeva³

¹Russian academy of sciences, Moscow, Russia

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

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

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

⁵Russian Medical Academy of the Continuous Professional Education, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russia

This paper continues the series of publications on evaluation of the consequences of the Fukushima-1 nuclear power plant accident and the impact of the emergency radionuclide discharges on the contamination of the sea biota and coastal areas of the Far-East regions. In autumn 2019, the fourth scientific expedition of the Russian geographic society on the monitoring of the radiation situation in Kurily-Kamchatka region was performed on the training vessel «Professor Khlyustin». The expedition included 9 specialists from non-commercial organization «Polar research Fund «Polar Fund», «Russian state hydrometeorological institute», «Radium institute after V.G. Khlopin» of the State Corporation «Rosatom», «Kurchatov institute», «Saint-Petersburg research institute of radiation hygiene after prof. P.V. Ramzaev» and «Marine state university after admiral G.I. Nevelsky». The aim of the fourth expedition was to evaluate the radiation situation in the Sea of Japan and Kurily-Kamchatka region after the Fukushima-1 NPP accident as a continuation of the similar marine expeditions in 2011, 2012 and 2014. The survey was performed in the water area of the sea of Japan and Okhotsk sea. The results indicate that the concentration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in sea water, hydrobionts, soil, ground and sea vegetation is still on the baseline level due to the global fallouts.

Key words: marine expedition, Russian geographic society, Fukushima-1 NPP, radiation accident, radiation situation, ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁹⁰Sr, ³H, objects of the environment.

References

1. The Fukushima Daiichi Accident Technical Volume 1. Description and Context of the Accident. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). 226 p.
2. International Atomic Energy Agency (IAEA). 2015. The Fukushima Daiichi Accident. In: Technical Volume 4. Radiological Consequences. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). 250 p.
3. UNSCEAR 2013. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. Scientific Annex A. United Nations, New York, 2014. 311 p.
4. Romanovich IK, et al. Fukushima-1 NPP accident: management of the prophylactic actions aimed at the preservation of the health of the public in the Russian Federation. Ed. by Academic of RAMS Onischenko G.G. Saint-Petersburg: NIIRG after prof P.V. Ramzaev. 2012: 336 p. (In Russian)
5. Buesseler K, et al. Fukushima Daiichi-derived radionuclides in the ocean: transport, fate, and impacts. *Annual review of marine science*. 2017;9: 173-203.
6. Sanial V, et al. Unexpected source of Fukushima-derived radiocesium to the coastal ocean of Japan. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017;114(42): 11092-11096.
7. Pratama MA, et al. Future projection of radiocesium flux to the ocean from the largest river impacted by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Scientific reports*. 2015;5: 8408.
8. Arutunyan RV, Bolshov LA, Borovoy AA, Velikhov EP. System analysis of the sources and consequences of Fukushima-1 NPP accident. Institute of the problems of the safe development of the nuclear energy of RAS. Moscow. 2018: 408. ISBN 978-5-9907220-5-7. (In Russian)
9. Akleev AV, Ivanov V, Sazykina TG, Shinkarev SM. Consequences of the Fukushima-1 NPP accident (overview of the 2013 UNSCEAR report). *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2015;60(5): 12-24. (In Russian)
10. Options of utilization of the contaminated water from Fukushima-1 were proposed in Japan. – Available from: http://fukushima-news.ru/news/v_japonii_predlozili_varianty_utilizatsii_zarazhjonnoj_vody_s_fukusima_1/2020-01-31-3325 [Accessed 02 March 2020] (In Russian)
11. The Solution of stop the Contaminated Water and The Safety of Fishery Products at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (provisional translation) Dec. 2019 Fisheries Agency of Japan. – Available from: <https://www.jfa.maff.go.jp/e/inspection/attach/pdf/index-94.pdf> [Accessed 16 February 2020]
12. High concentration of cesium was determined in fish near "Fukushima". – Available from: http://fukushima-news.ru/news/vysokoe_soderzhanie_vezija_obnaruzheno_v_rybe_vblizi_fukusimy/2019-02-06-3281 [Accessed 16 February 2020] (In Russian)

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

13. Madigan DJ, Baumann Z, Fisher NS. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012;109(24): 9483-9486.
14. Domingo T, et al. Studying levels of Fukushima-derived radioactivity in sockeye salmon collected on the west coast of Vancouver Island. *Radiation Physics and Chemistry*. 2017;140: 186-189.
15. Cesium from Fukushima found a short way back". – Available from: http://fukushima-news.ru/news/cezij_s_fukusimy_nashel_korotkij_put_obratno/2019-07-11-3300 [Accessed 16 February 2020] (In Russian)
16. Nikitin AI, Ramzaev VP, Osokin VM, Sergeev AS, Sevastyanov AV, Aliev RA, et al. Radioecological investigations in the sea of Japan and the North-West part of the Pacific ocean after the accident at the NPP "Fukushima-1" in Japan: preliminary results. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(3): 14-35. (In Russian)
17. Biblin AM, Ivanov SA, Ramzaev PV, Basalaeva LN. Some results of the third complex multidisciplinary expedition of the Russian geographical society for monitoring of the radiation situation in the Kuril-Kamchatka area of the Pacific ocean, 2014. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(1): 62-66. (In Russian)
18. Ramzaev V, Barkovsky A, Goncharova Yu, Gromov A, Kaduka M, Romanovich I. Radiocesium fallout in the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan islands due to Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;118: 128-142.
19. Ramzaev VP, Ivanov SA, Goncharova YuN, Vishnyakova NM, Sevastyanov AV. A study of radioactive contamination of marine biota after the Fukushima accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2012;5(4): 5-11. (In Russian)
20. Onischenko GG, Romanovich IK, Barkovsky AN, Bruk GY, Gorsky AA, Stepanov VS. Radiation situation in the far eastern regions of the Russian Federation on the basis of spring and summer surveys in 2011. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(3): 7-13. (In Russian)
21. Onishchenko GG, Repin VS, Romanovich IK. Radiation risks assessment due to consumption of the far east food fish after the accident on "Fukushima-1" NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(1): 5-15. (In Russian)
22. Onischenko GG, Romanovich IK, Balonov MI, Barkovsky AN, Gorsky AA. Accident at «Fukushima-1» NPP: First results of emergency response. Report 1: general information about the accident and radiation situation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(2): 5-12. (In Russian)

Received: February 26, 2020

Gennadiy G. Onischenko – Doctor of Medical Science, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Anna Yu. Popova – Doctor of Medical Science, Professor, Head, the Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Moscow, Russia

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

Sergey A. Ivanov – junior research scientist, radiochemical 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

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

Viktor S. Repin – doctor of biological sciences, head of the department of health, 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

Kseniya V. Varfolomeeva – junior research scientist, laboratory of ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K., Ivanov S.A., Biblin A.M., Repin V.S., Varfolomeeva K.V. Results of the fourth combined scientific expedition for the radition monitoring in the Kurily-Kamchatka region of the Pacific ocean. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 5-15. (In Russian).

DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15

Сравнительный анализ медико-дозиметрических последствий аварии 1957 г. и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий

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

Статья посвящена оценке эффективности проведенных защитных мероприятий при аварийном облучении населения Уральского региона, вызванном радиоактивным загрязнением реки Течи и аварией 1957 г. Обе аварийные ситуации имели место в одном и том же регионе в близкие временные сроки и были обусловлены сбросами в реку Течу (1949–1956 гг.) и выбросом в атмосферу (1957 г.) радиоактивных отходов производственного объединения «Маяк». Предпринятые после аварий контрмеры для обеспечения радиационной безопасности населения существенно различались как по характеру мероприятий, так и по срокам их реализации. Если в бассейне реки Течи эффективность их оказалась незначительной, вследствие запоздалого и неполного характера реализации, то на Восточно-Уральском радиоактивном следе эффективность контрмер по медико-дозиметрическим критериям была существенно выше. Как следствие, жители прибрежных сел реки Течи получили значительно большие органические дозы, в том числе на красный костный мозг, а медицинские последствия аварийного облучения у них регистрировались как в ранние, так и в отдаленные сроки после облучения.

Ключевые слова: радиационные аварии, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, доза, медицинские последствия.

Введение

В 1950-е гг. на производственном объединении (ПО) «Маяк» имели место две радиационные аварии, приведшие к радиоактивному загрязнению части территории Уральского региона и облучению населения. Сравнительный анализ долгосрочных последствий этих аварий представляет несомненный интерес с точки зрения оценки эффективности предпринятых защитных мероприятий в отношении населения, проживающего вблизи предприятия. В 1949–1956 гг. ПО «Маяк» осуществлял регламентные и аварийные сбросы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) с различных стадий технологического цикла радиохимического производства в реку Течу. 29 сентября 1957 г. в результате термохимического взрыва емкости хранилища жидких радиоактивных отходов, расположенной на промышленной площадке ПО «Маяк», образовался Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Причины обеих аварийных ситуаций достаточно подробно проанализированы и описаны в литературе [1–3]. Масштабы радиоактивного загрязнения территории Уральского региона, вызванные этими авариями, были сопоставимыми. Суммарная активность, сброшенная в реку Течу, составила

около $3,1 \cdot 10^6$ Ки (115 ПБк). Учитывая, что основная доля активности выброса 1957 г. выпала на территорию промышленной площадки ПО «Маяк», суммарная активность, которая приняла участие в формировании ВУРСа и облучении населения, проживающего на его территории, составила около $2 \cdot 10^6$ Ки по суммарной β -активности (74 ПБк) [4, 5].

Аварийные сбросы в реку Течу имели место преимущественно летом – осенью 1951 г. на фоне регулярных технологических сбросов, которые начались в январе 1949 г. и значительно увеличились в сентябре 1950 г. Происхождение аварийных сбросов было обусловлено неконтролируемыми утечками высокоактивных отходов из резервуаров-хранилищ. Максимальный залп аварийных сбросов пришёлся на 8–12 октября 1951 г. С 28 октября 1951 г. основные сбросы были переключены на закрытое озеро Карачай, что привело к значительному уменьшению поступления радионуклидов в Течу. В 1956 г. русло реки в её верхнем течении было перекрыто глухой плотиной, также были построены обводные каналы, что позволило изолировать сильно загрязненный участок русла от нижележащих частей реки. Таким образом, формирование

Аклеев Александр Васильевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: akleyev@urcrm.ru

радиационной ситуации на реке Тече продолжалось почти 7 лет, причём около половины активности поступило в реку с аварийными сбросами во второй половине 1951 г. [6].

Радионуклидный состав регулярных и аварийных сбросов существенно различался. В регулярных сбросах преобладали $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ (35%), $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ (21%), ^{89}Sr (19%) и ^{137}Cs (14%). Вклад $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ составлял около 3%. В аварийных сбросах преобладал $^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}$ (67%), по сравнению с которым вклады $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$ (17%) и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (6%) были существенно ниже, а вклады всех остальных продуктов деления не превышали 5% [5]. Важно отметить, что периодичность, изотопный состав и активность сбросов ЖРО в реку Течу не имели регулярного характера и существенно отличались во времени, что создавало значительную вариабельность мощности дозы внешнего γ -излучения и внутреннего поступления радионуклидов в организм местных жителей. Основная доля (более 60%) относительно долгоживущих радионуклидов, таких как ^{90}Sr и ^{137}Cs , имевших основное значение в формировании доз облучения населения прибрежных сел реки Течи, была сброшена в Течу в октябре 1951 г. [6].

Формирование ВУРСа полностью завершилось через 10–11 ч после взрыва. В суммарной активности выброса 1957 г. преобладал $^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$ (66,0% от суммарной активности). На долю $^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$ приходилось 24,9% активности, $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y} - 5,4\%$, $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh} - 3,7\%$, а $^{137}\text{Cs} - 0,1\%$ [1–4].

Население в обеих ситуациях подверглось хроническому сочетанному (внешнему γ - и внутреннему) облучению. Внешнее облучение в обеих аварийных ситуациях имело преобладающее значение в формировании доз облучения населения в первые 2 года после аварий и было обусловлено повышенным γ -фоном на территории населенных пунктов и прилегающих районов, которые использовались населением для хозяйственных целей (выпаса скота, покосов и др.). После распада γ -излучающих радионуклидов долгосрочное внутреннее облучение населения с низкой мощностью дозы в обеих ситуациях определялось ^{90}Sr . Особенности аварий были обусловлены разными путями загрязнения окружающей среды: на Тече имел место водный путь, а на ВУРСе – воздушный. Внутреннее облучение было обусловлено поступлением радионуклидов с продуктами питания местного производства (овощи, картофель, рыба, мясо водоплавающей птицы, молоко и др.). У жителей прибрежных сел реки Течи в первые годы после начала сбросов поступление радионуклидов в организм в значительной мере определялось речной водой, которую местное население широко использовало в качестве питьевой. Река использовалась также для водопоя скота, разведения водоплавающей птицы, полива огородов, рыбной ловли, купания и других хозяйственно-бытовых целей. Огороды, пастбища и сенокосы, в основном, располагались на пойменных почвах и заливных лугах реки [3].

В экономическом отношении радиоактивно-загрязненные районы были типичными сельскохозяйственными. Население занималось, в основном, выращиванием овощей, картофеля, зерновых культур (главным образом, пшеницы) и производило мясо и молоко [2, 3].

Мероприятия по защите населения

Необходимо отметить, что после загрязнения реки Течи защитные меры, направленные на обеспечение безопасности населения, предпринимались с задержкой и не выполнялись в должном объеме. Вследствие отсутствия

научно-обоснованных критериев радиационной защиты населения экстренные защитные мероприятия на Тече не проводились. Плановые мероприятия включали гидротехнические и административные, а также организацию и проведение радиационного мониторинга и медицинского наблюдения (табл. 1) [3].

Таблица 1

Защитные мероприятия в бассейне реки Течи и на территории ВУРСа

[Table 1]

Protective measures in the Techa River basin and in the EURT territory

Мероприятия [Measures]	Река Теча [Techa River]	ВУРС [EURT]
Экстренные [Emergency]	Не проводились [were not implemented]	Эвакуация (1,100 чел.) [Evacuation (1,100 persons)]
		Бракераж продовольствия, фуража и частичная его замена [Quality inspection of food products and fodder with their partial replacement]
Плановые [Scheduled]		Организация санитарно-охранной зоны [Establishment of sanitary-protected zone]
		Переселено 7338 чел. [7,338 persons have been resettled]
		Санитарно-охранный режим [Sanitary-protective regime]
		Сельскохозяйственные (в том числе выведено из землепользования 700 км ²) [Agricultural (including 700 km ² withdrawn from the economic use)]
		Дезактивация населенных пунктов и сельскохозяйственных территорий [Radioactive decontamination of settlements and agricultural areas]
	Гидротехнические (строительство плотин, каналов, колодцев, водопроводов и др.) [Hydrotechnical (construction of dams, channels, wells, water-supply system)]	Реорганизация и перепрофилирование сельскохозяйственных предприятий [Restructuring and conversion of farming enterprises]

Окончание таблицы 1

Мероприятия [Measures]	Река Теча [Techa River]	ВУРС [EURT]
Плановые [Scheduled]	Радиационный мониторинг [Radiation monitoring]	Радиационный мониторинг [Radiation monitoring]
	Медицинское наблюдение [Medical follow up]	Медицинское наблюдение [Medical follow up]

Первоочередные меры включали ограничение сбросов ЖРО в реку (конец 1951 г.) и введение официального запрета на использование реки для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд населением. С 1953 г. для ограничения доступа людей, скота и водоплавающей птицы поймы и река в пределах населенных пунктов были огорожены изгородью с колючей проволокой. Для снижения дозы облучения жителей отчужденная пойма (вне территории населенных пунктов) была засажена лесом и оконтурена канавой. В 1954–1960 гг. из 19 прибрежных сел было переселено более 7 тыс. жителей, что составляло около 30% от общей численности населения на Тече. Эвакуация проводилась поэтапно и была начата с жителей наиболее неблагополучных населенных пунктов, расположенных в верховьях реки [3, 4].

Снижение степени воздействия радиации на население, которое осталось проживать в прибрежных селах, предполагалось достигнуть не только за счет введения ряда ограничений на использование реки для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд (полив огородов, стирка белья, разведение водоплавающей птицы, выращивание овощей и картофеля в пойме реки и др.), но и благодаря обеспечению населения источниками чистой воды. Необходимо отметить, что вышеуказанные защитные мероприятия и ограничения были введены только в бассейне реки Течи. Для использования подземных вод в прибрежных населенных пунктах строились колодцы и водопроводы. Как отмечалось выше, для изоляции наиболее загрязненных участков верхнего течения реки от остальной ее части были созданы водоемы-отстойники и обводные каналы [3]. Необходимо отметить, что санитарно-охранный режим для переселенных жителей начал действовать с опозданием. Например, запрет на использование реки как питьевого источника был введен только через 3–4 года после начала сбросов. Однако поскольку строительство колодцев и водопроводов было завершено лишь через 6–7 лет после введения запрета на использование реки, население было вынуждено частично использовать речную воду для хозяйственно-бытовых нужд [3].

Из всех защитных мероприятий наибольшую трудность представляло выполнение требований санитарно-охранного режима. Частыми нарушениями режима являлись рыбная ловля и купание в реке, а также сенокосение в отчужденной пойме. Во всех населенных пунктах в большом количестве имелась водоплавающая птица (гуси, утки), которая в летнее время содержалась на реке. Наиболее частым нарушением был выпас скота в прибрежной отчужденной пойме. Одной из важнейших причин несоблюдения населением санитарно-охранного режима являлось отсутствие на протяжении длительного времени официальной информации о произошедшем ра-

диоактивном загрязнении реки. Другими важными факторами невыполнения ограничительного режима стали нехватка «чистых» территорий для сельскохозяйственной деятельности населения и трудность в изменении привычного образа жизни сельских жителей, чей уклад жизни в течение многих лет формировался в тесной связи с рекой, которая использовалась для разнообразных хозяйственно-бытовых нужд [3, 4].

В основу принятия решений по контрмерам после аварии 1957 г. были положены данные по уровням загрязнения окружающей среды и дозам облучения населения. Экономическая целесообразность защитных мероприятий не оценивалась; все мероприятия были направлены на минимизацию неблагоприятных последствий для здоровья населения [1, 7].

Защитные мероприятия в отношении населения ВУРСа (см. табл. 1) включали как неотложные, так и плановые мероприятия. Уже 2 октября 1957 г. была принята программа экстренных мероприятий по ликвидации последствий аварии, которая включала: эвакуацию населения из близлежащих населенных пунктов, бракераж продовольствия, фуража и замену их на «чистые», определение плотностей и границ загрязненной территории для образования санитарно-охранной зоны. Жители сел Бердяниш, Сатлыково, Галикаево и Кирпичики, расположенных наиболее близко к месту взрыва, были эвакуированы в течение 10 дней после аварии вследствие высокой мощности дозы внешнего излучения. Была проведена полная санитарная обработка всех жителей этих сел с заменой одежды. Эвакуированное население было обеспечено новым жильем. Дома и дворовые постройки в этих селах были полностью разрушены, а сельскохозяйственные животные – забиты и захоронены [1, 2].

В оставшихся селах ВУРСа на основе массового радиометрического контроля с целью снижения внутреннего облучения с осени 1957 г. был начат бракераж продовольствия и фуража с частичной заменой грязных продуктов. Бракераж осенью 1957 г. был затруднен вследствие отсутствия в этот период допустимых уровней их загрязнения. Временные предельно допустимые уровни суточного поступления радионуклидов для отдельных компонентов рациона и фуража были приняты 7 мая 1958 г. Отсутствие территориальной радиологической службы в Челябинской и Свердловской областях при необходимости обследования большого объема образцов продуктов и фуража существенно затрудняло бракераж. Содержание радионуклидов в продуктах питания и фураже в этот период определяла только радиологическая лаборатория ПО «Маяк». Как следствие, поступление радиоактивных веществ в организм жителей некоторых населенных пунктов с продуктами превышало допустимые уровни [2, 7].

Предварительная оценка уровней и границ загрязнения территории ВУРСа, сделанная в первые сутки после аварии, и повторные съемки в октябре – декабре 1957 г. позволили уточнить зону загрязнения. В начале 1958 г. была организована СОЗ с ограничительным режимом (запрещено проживание и хозяйственная деятельность). Плотность загрязнения территории 2 Ки/км² по ⁹⁰Sr была признана предельной для безопасного проживания населения и принята в качестве официальной границы ВУРСа. Однако вследствие нехватки «чистых» пастбищ и сенокос-

сов население продолжало частично использовать территорию СОЗ [2].

Плановые мероприятия включали: дополнительное переселение с территории СОЗ, дезактивацию населенных пунктов и сельскохозяйственных территорий, создание системы радиационного мониторинга, а также реорганизацию и перепрофилирование сельскохозяйственных предприятий. Население 7 сел (2280 человек) было переселено через 250 дней после аварии, а 12 сел (8300 человек) – через 330–670 дней после аварии [1, 2, 4].

Совокупность мер, предпринятых на загрязненных территориях ВУРСа с плотностью загрязнения по ^{90}Sr менее 2 Ки/км^2 , таких как введение допустимых нормативов, упорядочивание условий жизнедеятельности населения, производства и переработки продуктов, установление системы ограничений позволила создать условия для безопасного проживания населения и получения продуктов питания на территории ВУРСа. Для жителей, оставленных на прежнем месте жительства, предпринимались усилия, направленные на снижение доз внешнего облучения и годового поступления ^{90}Sr и ^{137}Cs , такие как дезактивация посредством перепашки радиоактивно-загрязненных территорий, реорганизация и перепрофилирование предприятий, производящих продукты питания. Мелкие хозяйства были реорганизованы в более крупные, специализирующиеся на производстве говядины и свинины с использованием особых условий содержания и кормления животных. Использование естественных кормовых угодий было ограничено. Усилиями специализированных хозяйств в 1960-е гг. было достигнуто снижение ^{90}Sr в говядине, которая являлась их основной продукцией, в 2–7 раз. Производство зерна и овощей было запрещено, а производство молока ограничено. Укрупнение хозяйств значительно облегчило радиационный мониторинг сельскохозяйственной продукции [2, 4].

Организация медицинской помощи облученному населению

Поскольку Уральский регион характеризуется высокой плотностью населения, в сферу потенциального влияния радиации попала достаточно большая по численности группа населения. Только в бассейне загрязненной речной системы Теча – Исеть – Тобол – Обь проживало около 124 тыс. человек [3, 4]. Наиболее неблагоприятная радиационная обстановка имела место в бассейне реки Течи, где на начало сбросов ЖРО проживало около 24 тыс. человек, и еще около 6 тыс. человек приехали или родились в прибрежных селах в период с 1952 по 1960 г. На территории ВУРСа протяженностью 300 км и площадью около 20 тыс. км^2 (плотность загрязнения по ^{90}Sr составляла $0,1 \text{ Ки/км}^2$ и более) располагалось 217 населенных пунктов, в которых проживало около 270 тыс. человек. На территории СОЗ находилось 22 населенных пункта с общей численностью населения около 18 тыс. человек. Как отмечалось выше, в зависимости от уровня загрязнения территории жители этих населенных пунктов в течение 2 лет были поэтапно переселены.

Важно отметить, что первые специализированные медицинские осмотры жителей прибрежных сел реки Течи были начаты через 1,5 года после начала сбросов (1951 г.),

тогда как осмотры жителей сел Бердяниш, Сатлыково, Галикаево и Кирпичики, расположенных наиболее близко к месту взрыва, были начаты в первые дни после аварии. До настоящего времени специализированное медицинское наблюдение за жителями прибрежных сел реки Течи и ВУРСа осуществляет клиническое отделение Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) ФМБА России.

Информационной основой для осуществления медицинского наблюдения за облученными людьми и анализа медицинских последствий радиационного воздействия является медико-дозиметрическая база данных УНПЦ РМ [3]. Регистр облученного населения начал формироваться в 1967 г. и содержит персонифицированную информацию как о самих облученных лицах, так и об их потомках. Для анализа медико-биологических последствий хронического облучения жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа были созданы две когорты, которые получили название Когорта реки Течи (КРТ) и Когорта Восточно-Уральского радиоактивного следа (КВУРС). КРТ составили люди, родившиеся до 1950 г. и постоянно проживавшие в 1950–1960 гг. в населенных пунктах (НП) вдоль реки Течи. В когорту ВУРСа вошли жители 22 переселенных населенных пунктов и 14 сел, находившихся близко к границе отселения в головной части ВУРСа, которые родились до аварии и проживали там до отселения или до 31 декабря 1959 г. (непереселенные жители) [7]. Основные характеристики когорт представлены в таблице 2. В когорту ВУРСа не были включены лица из 3 переселенных сел Свердловской области (около 1 тыс. человек) в связи с отсутствием постоянного доступа к данным о смертности и заболеваемости в этой области.

Анализ основных параметров КРТ и КВУРСа свидетельствует о достаточной их сопоставимости по численности, периоду наблюдения, соотношению полов, этническому фактору и возрастной структуре населения. В обеих когортах на время облучения преобладали женщины и была большая доля детей и лиц молодого возраста (табл. 2). Важно отметить, что в когорту ВУРСа включено около 1,5 тыс. человек, которые ранее были переселены из прибрежных сел реки Течи и уже подвергались облучению в результате ее загрязнения.

Отслеживание жизненного статуса и состояния здоровья у членов когорт осуществлялось на территории наблюдения, которая несколько различалась по доступности информации о случаях онкозаболеваемости и причинах смерти. Территория наблюдения для анализа онкозаболеваемости включала Красноармейский, Кунашакский, Аргаяшский, Каслинский и Сосновский районы Челябинской области, а также г. Челябинск и г. Озерск. Территория наблюдения для анализа смертности включала всю Челябинскую и Курганскую области.

Информация о нерадиационных факторах риска, результатах медицинского и дозиметрического обследования членов когорт сохраняется в медико-дозиметрической базе данных УНПЦ РМ. Актуализация жизненного статуса, мест проживания, а также состояния здоровья осуществляется на регулярной основе с использованием единых источников информации [8]. Жизненный статус в сравниваемых когортах представлен в таблице 3.

Таблица 2

Основные характеристики исследуемых когорт

[Table 2]

Main characteristics of the studied cohorts

Показатель [Parameter]	Когорта реки Течи (КРТ) [Techa River Cohort (TRC)]	Когорта ВУРСа (КВУРС) [EURT Cohort (EURTC)]
Численность [Size of the cohort]	29 730	21 427
Период наблюдения [Follow up period]	58 лет * [58 years] 1950–2007 гг. [1950–2007]	50 лет [50 years] 1957–2006 гг. [1957–2006]
Число чел.-лет под наблюдением [Number of person-years under follow up]	927 743	458 131
Доля женщин, % [Percentage of females, %]	58	56
Этнический состав [Ethnic composition]	Татары и башкиры – 20%, славяне – 80% [Tartars and Bashkirs – 20%, Slavs – 80%]	Татары и башкиры – 40%, славяне -60% [Tartars and Bashkirs – 40%, Slavs – 60%]
Доля лиц моложе 20 лет, % [Percentage of people under 20 years old, %]	43	42

* – представлены данные на период последней публикации

[* – the data are given as of the last publication].

Таблица 3

Жизненный статус в сравниваемых когортах

[Table 3]

Vital status in the cohorts under comparison

Жизненный статус [Vital status]	КРТ [TRC]		КВУРС [EURTC]	
	Человек [Number of persons]	%	Человек [Number of persons]	%
Живы на ТН [Alive in the catchment area]	5 684	19	5 731	27
Умерли [Deceased]	17 307	58	8 016	37
Из них причина известна [With known cause of death]	15 763	91	7 164	89
Потеряны для наблюдения [Lost to follow up]	6 739	23	7 680	35
Из них: мигранты [Out of them: migrants]	4 696	16	3 511	16
Статус неизвестен [Status unknown]	2 043	7	4 169	19
Всего [Total]	29 730	100	21 427	100

В обеих когортах преобладает доля умерших членов, которая составляет 58% в КРТ и 37% в когорте ВУРСа. Большая доля умерших людей в КРТ, по-видимому, обусловлена более старшим возрастом членов данной когорты. Так, самые молодые члены КРТ к 2007 г. достигли возраста 58 лет, а возраст молодых членов когорты ВУРСа составлял 50 лет.

Доля живых на территории наблюдения в КРТ составляет 19%, а в когорте ВУРСа – 27%. Потерянными для наблюдения (вышедшими из анализа до конца периода наблюдения) являются 23% и 35% членов когорт соответственно. Значительную долю потерянных для наблюдения составляют люди, мигрировавшие за пределы

наблюдаемой территории, доля которых за весь период наблюдения составила в обоих когортах 16%.

Дозиметрические оценки эффективности защитных мероприятий

Как отмечалось выше, характер облучения населения прибрежных сел реки Течи и ВУРСа был сопоставимым. В обеих ситуациях имело место многолетнее (хроническое) радиационное воздействие, обусловленное сочетанным воздействием внешнего γ -излучения и внутреннего облучения за счет поступивших в организм местных жителей продуктов деления урана, преимущественно ^{90}Sr и ^{137}Cs . Критическим органом по дозе облучения у членов обеих когорт являлся красный костный мозг (ККМ) вследствие значительного поступления остеотропного ^{90}Sr с продуктами питания местного производства, преимущественно с молоком [2, 3].

Поступление ^{90}Sr длительное время в обеих аварийных ситуациях определяло внутреннее облучение населения жителей прибрежных НП реки Течи и ВУРСа, а его содержание в организме можно рассматривать в качестве показателя эффективности защитных контрмер в отношении фактора внутреннего облучения. Мониторинг содержания ^{90}Sr в организме жителей радиоактивно-загрязненных территорий проводился с использованием спектрометра излучения человека (СИЧ-9.1) и по данным аутопсии. Содержание ^{90}Sr в образцах костей было оценено радиохимическим методом у 246 членов КРТ и 1646 жителей ВУРСа, тогда как методом спектрометрии излучения человека – у 10 174 и 369 человек соответственно. Результаты оценки содержания ^{90}Sr у жителей Челябинской области представлены на рисунке [9].

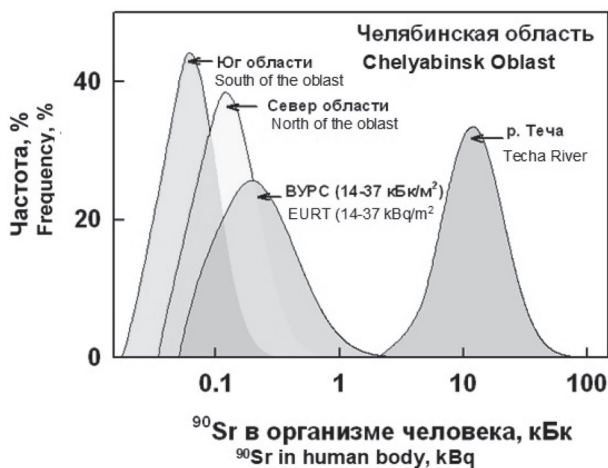


Рис. Распределение содержания ^{90}Sr в организме для различных субпопуляций Челябинской области
[Fig.] Distribution of the ^{90}Sr body-burden for various subpopulations of the Chelyabinsk Oblast]

Хотя введение санитарно-охранного режима привело к снижению поступления ^{90}Sr в организм жителей прибрежных сел реки Течи с молоком в 6,7 раза в средней и в 3 раза в дальней части реки [3], содержание ^{90}Sr у них было высоким и примерно на два порядка превышало аналогичные значения у жителей ВУРСа. Значительная доля членов когорты ВУРСа имела содержание ^{90}Sr существен-

но выше, чем население северных районов Челябинской области, которые проживали на территориях, подвергшихся низким уровням загрязнения в результате локальных выпадений от выбросов ПО «Маяк». Содержание ^{90}Sr у жителей южных районов Челябинской области определялось исключительно глобальными выпадениями после испытаний ядерного оружия.

Индивидуализированные расчеты органовых доз, выполненные с использованием дозиметрической системы реки Течи – TRDS-2016D [8], свидетельствуют о значительном превышении поглощенной дозы на ККМ по сравнению с дозой на желудок у членов КРТ (табл. 4).

Основные характеристики доз облучения ККМ и желудка у населения Течи и ВУРСа

[Table 4]

Main characteristics of the exposure doses to RBM and stomach in residents of the Techa River and EURT settlements]

Поглощенная доза [Absorbed dose]	КРТ [TRC]	КВУРС [EURTC]
ККМ, Гр [RBM, Gy]		
Среднее значение [Mean value]	0,43	0,12
Медиана [Median]	0,27	0,01
Максимальное значение [Maximum value]	9,02	2,04
Желудок, Гр * [Stomach, Gy]*		
Среднее значение [Mean value]	0,04	0,03
Медиана [Median]	0,01	0,02
Максимальное значение [Maximum value]	0,96	0,69

* представлены дозы на желудок, которые используются при оценке радиационного риска заболеваемости и смертности от всех злокачественных опухолей, исключая остеосаркому и рак кожи

[* the provided doses to the stomach are used in the assessment of radiation risk of incidence and mortality from all malignant tumors excluding osteosarcoma and skin cancer].

Максимальные значения органовых доз были отмечены у постоянных жителей верховьев реки Течи, которые располагались недалеко от места сброса ЖРО. Средняя доза облучения ККМ в КРТ составляла 0,43 Гр, а средняя доза на желудок – на порядок меньше. В когорте ВУРСа поглощенные дозы на ККМ были значительно меньше, чем у жителей прибрежных сел Течи, тогда как дозы на желудок в обеих когортах были сопоставимыми.

Анализ эффективности такой радикальной меры защиты при радиационных авариях, как переселение, показал высокую зависимость ее эффективности от сроков реализации (табл. 5) [10]. Максимальные значения предотвращенных доз облучения населения отмечались при отселении в первые 10 суток после аварии. Отселение в ранние сроки явилось одной из самых эффективных контрмер, которое значительно снизило дозы от внешнего γ -излучения и прекратило поступление относительно короткоживущих радионуклидов (преимущественно ^{144}Ce) с пищевым рационом.

Таблица 5

**Предотвращенная отселением доза
(% от потенциальной дозы) у жителей ВУРСа**

[Table 5]

**Dose averted through resettlement (% of the potential dose)
in residents of the EURT]**

Доза [Dose]	Сроки отселения, сут. [Resettlement time, days]			
	10	250	330	670
Эффективная [Effective]	94	41	34	10
Поглощенная на ЖКТ * [Absorbed to GIT*]	96	37	30	3,7
Поглощенная на ККМ * [Absorbed to RBM*]	93	41	32	20
Поглощенная от внешнего облучения [Absorbed dose of external exposure]	92	43	35	30

ЖКТ – желудочно-кишечный тракт; * – поглощенные дозы от сочетанного радиационного воздействия, которые были обусловлены преимущественно внутренним облучением
[GIT – gastrointestinal tract; * – absorbed doses of combined radiation exposure that were determined largely by internal exposure].

Отселение жителей ВУРСа в более поздние сроки (250–670 дней после аварии) не приводило к значительному уменьшению доз, включая дозы внешнего и внутреннего облучения ЖКТ, так как основная доля дозы уже была сформирована в первые месяцы после аварии. Например, переселение через 670 дней предотвратило только 10% эффективной дозы и 20% дозы на ККМ. Анализ дозы, предотвращенной отселением в разные сроки, позволяет сделать вывод, что переселение людей с радиоактивно-загрязненных территорий ВУРСа в поздние сроки после аварии не было достаточно обоснованным и могло ухудшить условия и качество жизни переселенных людей [11].

Результаты измерений содержания маркерного радионуклида ^{90}Sr в организме, а также оценок индивидуализированных органов доз у жителей прибрежных сел реки Течи и когорты ВУРСа свидетельствуют о значительно большей эффективности контрмер, принятых после аварии 1957 г. Они позволили существенно снизить дозы как внутреннего, так и внешнего облучения населения ВУРСа и минимизировать у них неблагоприятные последствия для здоровья. Анализ коллективных эффективных доз для членов КРТ и когорты ВУРСа показал, что теоретический ущерб, причиненный авариями здоровью населения прибрежных сел реки Течи и оцененный на основе рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите [11] с использованием индивидуальных поглощенных доз на органы на основе TRDS-2016D, значительно выше, чем для населения ВУРСа. Коллективная эффективная доза для 29 647 членов КРТ составила 2980 чел.-Зв, а для 21 014 членов когорты ВУРСа – 340 чел.-Зв.

Медицинские последствия аварий

Ранние эффекты облучения в виде хронического лучевого синдрома (ХЛС) и реакций тканей (кроветворной, иммунной, центральной нервной системы и др.) регистрировались преимущественно у жителей прибрежных сел реки Течи, расположенных наиболее близко к месту сброса ЖРО. Точное количество случаев ХЛС среди жителей бассейна реки Течи неизвестно, так как медицинское обследование населения в период максимального радиационного воздействия (1951–1956 гг.) не охватывало всего облученного населения. Среди выявленных 940 случаев ХЛС преобладала легкая по степени тяжести форма заболевания (899 случаев – 95,5%), которая могла протекать под видом других заболеваний и спонтанно регрессировать после реализации защитных мероприятий и особенно переселения [12].

Наиболее выраженные изменения гемопоэза отмечались в виде нейтропении, лимфоцитопении и тромбоцитопении в 1951–1953 гг. у жителей верховьев реки Течи, когда регистрировалась максимальная мощность дозы внешнего γ -излучения. Неврологические синдромы (вегетативная дисфункция, астения и органическое поражение нервной системы) также отмечались преимущественно у жителей верховьев (в основном у населения села Метлино, расположенного в 7 км от места сброса ЖРО), но сохранялись более длительное время [3, 8]. Факт преимущественного выявления ХЛС и реакций критических систем организма у жителей НП, расположенных в верховьях реки Течи, свидетельствовал о преобладающей значимости внешнего облучения в развитии ранних медицинских последствий аварийного облучения, контрмеры в отношении которого в селах бассейна реки Течи не предпринимались.

Случаев ХЛС среди населения ВУРСа не было зарегистрировано. Ранние реакции тканей отмечались со стороны гемопоэза только у отдельных жителей ВУРСа в течение первого года после аварии. У них регистрировалось транзиторное умеренное снижение количества лейкоцитов, нейтрофилов и тромбоцитов в периферической крови [7].

В качестве медицинских критериев эффективности защитных мероприятий в сравниваемых аварийных ситуациях рассматривались такие доказанные отдаленные последствия облучения человека, как злокачественные опухоли и лейкозы, избыточный относительный риск (ИОР) которых в КРТ и когорте ВУРСа представлен в таблице 6 [7, 8, 13].

Как видно из таблицы 6, радиационный риск злокачественных опухолей по данным смертности в обеих когортах был сопоставимым. В обеих когортах дозовая зависимость хорошо описывается линейной моделью. Атрибутивный риск для раков составляет 1,9–3,6%.

У жителей прибрежных районов реки Течи отмечалось повышение ИОР злокачественных опухолей (исключая рак кожи и остеосаркому) как по данным заболеваемости, так и по данным смертности. ИОР злокачественных опухолей у членов когорты ВУРСа был достоверно повышен только по данным смертности. Однако при исключении из когорты ВУРСа жителей, ранее проживавших в прибрежных селах реки Течи, ИОР злокачественных опухолей становится статистически незначимым.

Таблица 6

Избыточный относительный риск (линейная модель) злокачественных опухолей в Уральских когортах облученного населения

[Table 6]

Excess relative risk (linear model) of malignant tumors in Urals cohorts of exposed population]

Когорта [Cohort]	ИОР/100 мГр (95% ДИ) ERR/100 mGy (95%CI)	p	AP,% ATR,%
КРТ, заболеваемость [TRC, incidence]			
1956–2007, 1933 случая [1956–2007, 1,933 cases]	0,09 (0,02; 0,16)	0,008	3,6 (69)
КРТ, смертность [TRC, mortality]			
1950–2007, 2303 случая [1950–2007, 2,303 cases]	0,06 (0,004; 0,13)	0,03	2,2 (50)
КВУРС, заболеваемость [EURTC, incidence]			
1957–2009, 1426 случаев [1957–2009, 1426 cases]	0,05 (-0,005; 0,11)	0,08	1,9 (27)
КВУРС, смертность [EURTC, mortality]			
1957–2006, 1039 случаев [1957–2006, 1039 cases]	0,06 (0,001; 0,13)	0,046	2,4 (25)

AP – атрибутивный риск, * – в скобках обозначено избыточное число случаев

[ATR – attributable risk, * – excess number of cases is given in parentheses].

Анализ радиационного риска заболеваемости всеми формами лейкозов, а также лейкозами при исключении хронического лимфолейкоза (ХЛЛ) показал повышение ИОР в КРТ с увеличением дозы, но не выявил статистически значимой дозовой зависимости в когорте ВУРСа (табл. 7) [8, 14].

Высокие значения атрибутивного риска лейкозов (и особенно с исключением ХЛЛ) по сравнению с солидными злокачественными опухолями в КРТ в значительной мере обусловлены преимущественно внутренним облучением ККМ у жителей прибрежных сел реки Течи вследствие поступления в их организм ⁹⁰Sr.

Таким образом, результаты анализа медицинских последствий у аварийно-облученного населения Уральского региона позволили установить, что предпринятые защитные мероприятия в отношении населения прибрежных сел реки Течи были неэффективными и, как следствие, в ранние сроки у них регистрировались случаи ХЛС и лучевые реакции тканей, а в отдаленные сроки – повышенный радиационный риск развития злокачественных опухолей и лейкозов.

Таблица 7

Избыточный относительный риск (линейная модель) лейкозов в Уральских когортах облученного населения

[Table 7]

Excess relative risk (linear model) of leukemias in Urals cohorts of exposed population]

Лейкозы [Leukemias]	ИОР/100 мГр (95% ДИ) [ERR/100 mGy (95% CI)]	p	AP,% [ATR,%]
КРТ, 1953–2007 [TRC, 1953–2007]			
Все лейкозы (99) [All leukemias (99)]	0,12 (0,04; 0,24)	<0,001	30% (29)
Лейкозы, исключая ХЛЛ (72) [Leukemias excluding CLL (72)]	0,22 (0,08; 0,54)	<0,001	47% (34)
КВУРС, 1957–2009 [EURTC, 1957–2009]			
Все лейкозы (37) [All leukemias (37)]	0,10 (nf <0; 0,37)	0,14	–
Лейкозы, исключая ХЛЛ (29) [Leukemias excluding CLL (29)]	0,12 (nf <0; 0,45)	0,17	–

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 software].

Выводы

1. Сравнительный анализ долгосрочных медико-дозиметрических последствий двух радиационных аварий, имевших место в 1950-е гг. в Уральском регионе (сбросы ЖРО в реку Течу и авария 1957 г.), которые были сопоставимыми по выброшенной активности, характеру облучения населения, его численности и возрастно-половому составу, позволил сопоставить эффективность проведенных защитных мероприятий в отношении облученного населения.

2. Результаты многолетнего мониторинга радиационной обстановки и состояния здоровья облученных жителей прибрежных сел реки Течи и ВУРСа свидетельствуют о значительно большей эффективности предпринятых защитных мероприятий в отношении населения Уральского региона после аварии 1957 г. Коллективная эффективная доза облучения жителей ВУРСа оценена на порядок ниже, чем у жителей прибрежных сел реки Течи (340 чел.-Зв и 2 980 чел.-Зв соответственно).

3. Чрезвычайную эффективность в отношении внешнего и внутреннего облучения населения продемонстрировали экстренные мероприятия на ВУРСе. Эвакуация людей, проживавших в непосредственной близости к месту взрыва 29 сентября 1957 г., позволила предотвратить развитие у них острого лучевого синдрома и лучевых реакций тканей.

Плановые контрмеры (дезактивация, переселение, реорганизация сельскохозяйственных предприятий

и др.), предпринятые на ВУРСе для снижения поступления ^{90}Sr , также позволили значительно уменьшить дозы внутреннего облучения ККМ у населения и минимизировать риск развития лейкозов и злокачественных опухолей в отдаленные сроки. Важно отметить, что эффективность такой радикальной контрмеры, как переселение жителей ВУРСа в более поздние сроки (через 250–670 дней после аварии), значительно снижалась по критерию предотвращенной дозы.

4. В условиях отсутствия экстренных мероприятий по защите населения в период максимальных радиоактивных сбросов в реку Течу, и особенно в 1950 и 1951 гг., когда имели место наибольшие мощности дозы внешнего γ -излучения, у населения регистрировались такие детерминированные эффекты, как ХЛС и реакции тканей критических органов (иммунодепрессия и центральная нервная система). Предпринятые плановые защитные мероприятия в отношении жителей прибрежных сел реки Течи (гидротехнические, переселение, введение санитарно-охранного режима и др.) вследствие неполного и запоздалого характера их реализации не позволили существенно снизить остаточные дозы облучения, особенно красного костного мозга. Тяжелые детерминированные эффекты, а также повышенные радиационные риски лейкозов и злокачественных опухолей у жителей прибрежных сел реки Течи свидетельствуют о неэффективности контрмер, предпринятых после радиоактивного загрязнения реки Течи.

5. В условиях низкой эффективности защитных мероприятий в поставарийном периоде, которые не обеспечивают снижения дозы внешнего облучения и задержку поступления в организм радионуклидов, важным фактором минимизации медицинских эффектов аварийного радиационного воздействия является регулярная специализированная медицинская помощь населению, направленная на раннюю диагностику лучевых тканевых реакций и канцерогенных эффектов.

Благодарности

Данные исследования выполнены при поддержке Федерального медико-биологического агентства РФ. Авторы признательны членам биофизической лаборатории УНПЦ РМ за работу по расчету индивидуализированных оценок доз для членов КРТ и когорты ВУРСа, сотрудникам отдела «База данных Человек» УНПЦ РМ (заведующий Н.В. Старцев) за помощь в проведении работы по прослеживанию жизненного статуса членов когорт, персоналу клинического отделения (главный врач В.Н. Коваленко) за многолетнее наблюдение за состоянием здоровья облученных людей и сотрудникам эпидемиологической лаборатории, участвовавшим в сборе и подготовке данных для анализа.

Литература

1. Бурназян А.И. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. М: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
2. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк» / под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ», 2001. 294 с.
3. Аклеев А.В. и др. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. М.: Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем», 2001. 531 с.
4. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.
5. Василенко Е.К., Аладова Е.Е., Горелов М.В. и др. Авария 1957 года: радиационная обстановка и дозы облучения участников ликвидации аварии на территории промышленной площадки ПО «Маяк» // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 31–49.
6. Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., Толстых Е.И. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949 – 1956 гг. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 5. С. 523–534.
7. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the Kyshtym Accident) // J Radiol Prot. 2017 Sep; 37(3): 19–42.
8. Аклеев А.В., Аклеев А.А., Андреев С.С. и др. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
9. Дегтева М.О., Толстых Е.И., Суслова К.Г., Романов С.А., Аклеев А.В. Анализ результатов мониторинга содержания долгоживущих радионуклидов в организме жителей Уральского региона // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 30–37.
10. Романов Г.Н. Радиационная авария на ПО «Маяк»: практика контрмер, их эффективность и извлеченные уроки. Вопросы радиационной безопасности. 1997. № 3. С. 3 – 17.
11. ICRP, 2007. Recommendations of the ICRP: ICRP Publication 103. Annals of the ICRP. 2007. V. 37, No. 2–4.
12. Аклеев А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сел реки Теча. Челябинск: Книга, 2012. 461 с.
13. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 1. С. 100–114.
14. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Аклеев А.В. Риск заболеваемости гемобластомами у членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа. Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 2. С. 36–50.

Поступила: 24.12.2019 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. Сравнительный анализ медико-дозиметрических последствий аварии 1957 г. и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 16 – 26. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26

Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency

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 deals with the evaluation of the efficiency of the implemented protective measures in the event of accidental exposure of the Urals region population due to radioactive contamination of the Techa River and the 1957 accident. Both of the accidents occurred in one and the same region within approximately the same time frame, and were caused by discharges of Mayak Production Association radioactive waste into the Techa River (1949–1956) and into the atmosphere (1957). Counter-measures that had been undertaken to provide radiation safety of the population differed both in nature and in timeline. Their efficiency was insufficient in the Techa River basin as they were delayed in time and were not implemented to a full extent. But counter-measures in the East Urals Radioactive Trace were much more effective according to medical and dosimetric criteria. As a result, residents of the Techa riverside settlements received much higher organ doses, including doses to red bone marrow, and health effects of accidental exposure were registered in them both soon after and long after the radiation exposure.

Key words: radiation accidents, Techa River, East Urals Radioactive Trace, dose, health effects.

References

1. Burnazyan AI. Results of the study and experience in elimination of the consequences of accidental contamination of a territory with uranium fission products. Moscow: Energoatomizdat; 1990. 144 p. (in Russian).
2. Akleyev AV, Kiselev MF, Eds. Ecological and health effects of the radiation accident of 1957 at the Mayak PA. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 290 p. (in Russian).
3. Akleyev AV, et al. Medical-biological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 531 p. (in Russian).
4. Aleksakhin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, Drozhko EG, Ilyin LA, et al. Large-scale radiation accidents: consequences and protective measures. Moscow: Izdat; 2001. 752 p. (in Russian).
5. Vasilenko EK, Aladova EE, Gorelov MV, Knyazyev VA, Kolupayev DN, Romanov SA. The accident of 1957: radiation situation and doses to the liquidators of the accident on the territory of the PO «Mayak» facility. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 31–49. (in Russian).
6. Degteva MO, Shagina NB, Shishkina EA, Tolstykh EI. Current status of the radioactive contamination of the Techa river in 1949-1956. *Radiation biology. Radioecology*. 2016;56(5): 523 – 34 (in Russian).
7. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO, Tolstykh EI. Consequences of the radiation accident at the Mayak production association in 1957 (the «Kyshtym Accident»). *J Radiol Prot*. 2017 Sep; 37(3): 19-42.
8. Akleyev AV, et al. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health. Chelyabinsk: Kniga. 2016: 390 p. (in Russian).
9. Degteva MO, Tolstykh EI, Suslova KG, Romanov SA, Akleyev AV. Analysis of the results of the monitoring of the contents of the long-lived radionuclides in residents of the Ural region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 30–7 (in Russian).
10. Romanov GN. Issues of the radiation safety. 1997;3: 3–17(in Russian).
11. ICRP, 2007. Recommendations of the ICRP: ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007. V. 37, No. 2-4.
12. Akleyev A.V. Chronic radiation syndrome in Techa riverside residents. Chelyabinsk: Kniga; 2012: 461p. (in Russian).

Alexander V. Akleyev

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovskogo Str., 68-A, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: akleyev@urcrm.ru

13. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Comparative analysis of the risk of the mortality from solid malignant tumors for the public exposed at Techa river and East-Ural radioactive trace. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2017;26(1): 100–114 (in Russian).
14. Krestinina LYu, Silkin SS, Akleyev AV. Risk of hemoblastosis morbidity for the members of the East-Ural radioactive trace cohort. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2019;28(2): 36–50 (in Russian).

Received: December 24, 2019

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. Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 16-26. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26

Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»

В.Ю. Голиков

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

Статья посвящена сравнению моделей и оцениваемых с их помощью доз внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». В случае аварии на АЭС «Фукусима-1» использовали модель, предложенную НКДАР ООН. Как значения доз гамма-излучения в окружающей среде, так и значения эффективных доз внешнего облучения сопоставимых групп населения, нормированные на одинаковую поверхностную активность радионуклидов, для обеих аварий оказались близки. Причинами этого явились как схожесть изотопных составов радиоактивных выпадений, так и тот факт, что «японская» модель внешнего облучения была основана на «чернобыльской», вплоть до использования одинаковых численных значений для некоторых параметров, из-за недостатка специфических японских послеварийных данных к моменту первых оценок доз облучения жителей Японии. Для более корректного сравнения доз внешнего облучения жителей после двух аварий необходимо верифицировать значения параметров японской модели с помощью результатов измерений мощностей доз гамма-излучения в окружающей среде и индивидуальных доз внешнего облучения жителей, выполненных после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Ключевые слова: радиационная авария, ЧАЭС, АЭС «Фукусима-1», модели внешнего облучения, гамма-излучение, эффективная доза.

Введение

В конце XX в. (апрель 1986 г.) и в начале XXI в. (март 2011 г.) с разницей всего лишь в 25 лет в СССР и в Японии произошли две крупнейшие радиационные аварии, существенно подорвавшие веру в безопасность атомной энергетики. Эти аварии сопровождались значительным радиоактивным загрязнением окружающей среды и облучением сотен тысяч людей [1, 2, 3].

Среди возможных путей облучения населения при крупномасштабных выбросах в окружающую среду радиоактивных веществ внешнее облучение от выпадений является одним из наиболее значимых. После аварии на АЭС «Фукусима-1» внешнее облучение от выпавших радионуклидов определяло более 90% от суммарной эффективной дозы облучения населения в наиболее загрязненной префектуре Фукусима в Японии [3]. В случае Чернобыльской аварии вклады внешнего и внутреннего облучения в суммарную эффективную дозу зависели от типа почв региона: в пользу внутреннего облучения в случае торфяных почв или в пользу внешнего облучения в случае черноземных почв [1]. На соотношение доз внешнего и внутреннего облучения населения влияла также и эффективность защитных мероприятий, которая была более высока применительно к снижению дозы внутреннего облучения населения [1].

Несмотря на то, что причины двух аварий были различны, однако их последствия, особенно в контексте формирования доз внешнего облучения населения, оказались весьма схожи. Исторически сложилось так, что предложенная в 1990 г. структура модели внешнего облучения населения при крупномасштабных выбросах в окружающую среду радиоактивных веществ [4] получила свое развитие после исследования последствий Чернобыльской аварии. Численные значения параметров модели были определены на базе результатов многолетних дозиметрических исследований в загрязненных регионах путем проведения фантомных экспериментов, в результате опросов населения [5, 6, 7]. Верификация модельных оценок на основе результатов измерений индивидуальных доз у жителей методом термолюминесцентной дозиметрии показала, что оценки доз, полученные согласно модельным расчетам, не отличались от экспериментальных результатов с погрешностью до фактора 1,5 при доверительной вероятности 95% [8]. Разработанная модель была положена в основу официальных действующих документов по оценке текущих [9] и реконструкции накопленных доз внешнего облучения населения, проживающего на территориях РФ, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС [10].

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

После аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г. международными группами экспертов были выполнены оценки доз у населения Японии [2, 3]. При этом в основу оценки доз внешнего облучения была положена чернобыльская модель, параметры которой, насколько возможно, были адаптированы к японским условиям. Хронологически первая попытка оценки доз у населения Японии и соответствующая модель, использовавшаяся ВОЗ [2], была более консервативна, в основном, из-за нехватки данных натурных измерений к моменту подготовки материалов. Материалы НКДАР ООН [3], опубликованные в 2014 г., уже во многом были основаны на результатах измерений, выполненных после аварии, и параметры модели внешнего облучения населения более реалистично отражали развитие ситуации в Японии.

Цель исследования – сравнение исходных данных, параметров моделей и результатов расчетов эффективных доз внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений в случае Чернобыльской аварии и аварии на АЭС «Фукусима-1». В случае аварии на АЭС «Фукусима-1» использовали модель НКДАР ООН [3].

Формулировка модели внешнего облучения населения

При любой ситуации внешнего облучения человека в полях гамма-излучения для оценки эффективной дозы необходима следующая информация:

- характеристики поля внешнего гамма-излучения;
- характеристики поведения человека в этом поле;
- коэффициенты перехода от характеристик поля гамма-излучения к эффективной дозе у человека.

При радиоактивном загрязнении окружающей среды в качестве базовой используется модель облучения человека над открытым целинным участком почвы, а в качестве характеристики поля излучения – значение кермы в воздухе на высоте 1 м над подстилающей поверхностью. В этом случае на ее величину, кроме поверхностной активности выпавших радионуклидов, оказывают влияние такие естественные факторы, как начальное заглубление радионуклидов в почву, их радиоактивный распад, вертикальная миграция долгоживущих радионуклидов, наличие снежного покрова.

При облучении населения в антропогенной среде характеристики поля излучения изменяются. Учет этого в модели проводится с помощью факторов места (location factors) f_j , определяемых как отношение мощности дозы в воздухе в точке j внутри населенного пункта (НП) или в его ареале, обусловленной гамма-излучением радиоактивных выпадений, к аналогичной величине над открытым целинным участком почвы [4, 7, 11].

Поведение человека в поле излучения источника описывается с помощью факторов поведения (occupancy factors) p_{ij} , представляющих собой долю времени, в течение которого представители i -й группы населения находятся в j -й точке НП [4, 7].

Третий необходимый для оценки эффективной дозы внешнего облучения блок данных представлен коэффициентами перехода, связывающими измеряемые на практике величины (поглощенная доза в воздухе, амбиентный эквивалент дозы) с оцениваемым критерием воздействия излучения – эффективной дозой [4, 7].

Учитывая вышеизложенное, запишем уравнение модели для оценки мощности эффективной дозы внешнего облучения от выпавших радионуклидов у представителей i -й группы населения $\dot{E}_i^{dep}(t)$ следующим образом:

$$\dot{E}_i^{dep}(t) = \dot{K}_{air}(t) \cdot k_E \cdot k_S \cdot \sum_j f_j(t) \cdot p_{ij} \quad (\text{нЗв ч}^{-1}) \quad (1)$$

$$\dot{K}_{air}(t) = r(t) \cdot \sum_k A^k \cdot k_k^{dep} \cdot \exp(-\lambda^k \cdot t) \quad (\text{нГр ч}^{-1}) \quad (2)$$

где: $\dot{K}_{air}(t)$ – мощность кермы в воздухе на высоте 1 м над открытым целинным участком почвы, нГр ч⁻¹; k_E – коэффициент перехода от кермы в воздухе к эффективной дозе, Зв Гр⁻¹; k_S – коэффициент влияния снежного покрова на величину эффективной дозы, отн. ед.; f_j – фактор места, отн. ед.; p_{ij} – фактор поведения, отн. ед.; A^k – поверхностная активность k -го радионуклида на дату окончания радиоактивных выпадений, кБк м⁻²; k_k^{dep} – удельная мощность кермы в воздухе гамма-излучения k -го радионуклида для геометрии плоского изотропного источника, расположенного на глубине 0,5 г см⁻² в почве, (нГр ч⁻¹)/(кБк м⁻²); $r(t)$ – функция, описывающая влияние миграции радионуклидов в почву на мощность кермы в воздухе и равная отношению мощности кермы в момент времени t над почвой с наблюдаемым распределением нуклидов в почве к мощности кермы от плоского источника с той же поверхностной активностью, расположенного на глубине 0,5 г см⁻² в почве, отн. ед.; λ^k – постоянная радиоактивного распада k -го радионуклида (час⁻¹); t – время, прошедшее с момента окончания радиоактивных выпадений (час).

Тогда значение эффективной дозы за период времени облучения T (час) от выпавших радионуклидов $E_i^{dep}(T)$ может быть рассчитано следующим образом:

$$E_i^{dep}(T) = 10^{-6} \int_T \dot{E}_i^{dep}(t) \cdot dt \quad \text{мЗв} \quad (3)$$

Уравнения (1), (2) и (3) использовали для расчетов как мощности кермы и накопленной кермы в воздухе, так и накопленной эффективной дозы у разных групп населения, различающихся условиями проживания и работы.

Сравнение исходных данных и параметров моделей внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений в случае аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»

Радиоактивное загрязнение окружающей среды в результате аварии на АЭС «Фукусима-1», в основном, было образовано выбросом легколетучих радионуклидов Cs, I, Te [3, 12]. Наиболее интенсивные влажные выпадения наблюдались в северо-западном направлении от АЭС «Фукусима-1». Поэтому для сравнения с Чернобыльской аварией в качестве региона сравнения была выбрана юго-западная часть Брянской области, где изотопный состав выпадений также был представлен в основном легколетучими соединениями радионуклидов, а пятнистость радиоактивного загрязнения была обусловлена наличием дождевых фронтов во время прохождения радиоактивного облака [13].

Изотопный состав радиоактивных выпадений

Изотопный состав радиоактивных выпадений для обеих аварий был определен на основании результа-

тов спектрометрического анализа проб почвы. В случае Чернобыльской аварии пробы почвы впервые были отобраны 22–23 мая 1986 г. в 19 точках Брянской области [13]. Позже в работе [14] была представлена общая картина результатов моделирования переноса радиоактивных веществ от разрушенной Чернобыльской АЭС и результатов анализа проб почвы, собранных к началу 1990-х гг. из всех зон радиоактивного загрязнения РФ.

Регулярный отбор проб почвы после аварии на АЭС «Фукусима-1» начался в июне–июле 2011 г. К моменту подготовки материалов для доклада НКДАР ООН имелись данные по анализу 2200 образцов почвы из префектуры Фукусима [3].

В таблице 1 представлен относительный радионуклидный состав выпадений в случае аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». Активности всех радионуклидов нормированы на активность долгоживущего радионуклида ^{137}Cs и приведены на дату аварии.

Таблица 1

Активность выпавших гамма-излучающих радионуклидов по отношению к активности ^{137}Cs после аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»

[Table 1]

Activity of the ground-deposited gamma-emitting radionuclides relative to activity of ^{137}Cs after the Chernobyl and Fukushima NPP accidents]

Радионуклид [Radionuclide]	Авария на ЧАЭС, Брянская область (на 26.04.1986) [Chernobyl ac- cident, the Bryansk region, on 4/26/1986]	Авария на АЭС «Фукусима-1», (на 15.03.2011) [Fukushima-1 NPP ac- cident, on 3/15/2011]
^{95}Zr	0,065	–
^{95}Nb	0,064	–
^{103}Ru	1,68	–
^{106}Ru	0,50	–
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	–	0,0028
$^{129\text{m}}\text{Te}$	–	1,1
^{131}I	11	11,5
$^{132}\text{Te}+^{132}\text{I}$	16,6	8,0
^{134}Cs	0,54	1,0
^{136}Cs	0,27	0,17
^{137}Cs	1,0	1,0
^{140}Ba	0,72	–
^{140}La	0,84	–
^{144}Ce	0,26	–

Как видно из приведенных в таблице 1 данных, радионуклидный состав выпадений после обеих аварий похож. Тем не менее, различия активностей пары $^{132}\text{Te} + ^{132}\text{I}$ и наличие большего количества короткоживущих радионуклидов в «чернобыльских» выпадениях по сравнению с «фукусимскими» должны обуславливать большее значение мощности кермы в воздухе в начальный период времени после выпадений в этом случае. С другой стороны, двукратное превышение активности радионуклида ^{134}Cs в случае аварии на АЭС «Фукусима-1» должно обуславливать большее значение мощности кермы в воздухе в период времени от года до нескольких лет после выпадений по отношению к чернобыльской ситуации.

Начальное заглупление радионуклидов после выпадений было оценено путем сравнения измеренных значений мощности поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью почвы с его расчетным значением для различных вариантов заглупления плоского источника в почву. В обоих случаях наилучшее соответствие между измеренными и расчетными значениями мощностей доз в воздухе достигалось при использовании заглупления плоского источника в почву на глубину $0,5 \text{ г см}^{-2}$, что соответствует влажным выпадениям [6, 7]. В случае аварии на ЧАЭС регрессионный анализ дал следующие результаты:

$$D_{\text{возд}}^{\text{изм}} = 0,97 \cdot D_{\text{возд}}^{\text{расч}}; R=0,97; N=16.$$

где $D_{\text{возд}}^{\text{изм}}$ и $D_{\text{возд}}^{\text{расч}}$ – измеренная и расчетная мощность поглощенной дозы в воздухе, R – коэффициент корреляции, а N – число точек измерений.

В случае аварии на АЭС «Фукусима-1» среднее значение отношения расчетной величины к измеренной и его стандартная ошибка составляли: $D_{\text{возд}}^{\text{расч}} / D_{\text{возд}}^{\text{изм}} = 0,92 \pm 0,03; N = 92$.

Дозовые коэффициенты для начального заглупления радионуклидов в почве

Значения удельной мощности кермы в воздухе k_m^{dep} для плоского изотропного источника, расположенного на глубине $0,5 \text{ г см}^{-2}$ в почве (начальное заглупление радионуклидов в почве), используемые для расчета кермы в воздухе над целинными участками почвы с помощью формулы (2), представлены в таблице 2 [15]. Эти значения для расчета мощности кермы в воздухе были одинаковы для обеих аварий.

Таблица 2

Значения удельной мощности кермы в воздухе k_m^{dep} для плоского изотропного источника, расположенного на глубине $0,5 \text{ г см}^{-2}$ в почве, используемые в формуле (2) [15]

[Table 2]

The values of k_m^{dep} kerma rate coefficients for flat isotropic source at the depth of 0.5 g cm^{-2} in soil to be used in formula (2) [15]

Радионуклид [Radionuclide]	k_m^{dep} (нГр/ч)/(кБк/м ²) [k_m^{dep} (нГр/ч)/(кБк/м ²)]
Ag-110m+Ag-110	8,12
Te-129m+Te-129	0,23
Te-132	0,71
I-131	1,18
I-132	6,66
Cs-134	4,68
Cs-136	6,34
Cs-137+ Ba-137m	1,72

Функция, описывающая влияние миграции радионуклидов в почву на мощность кермы в воздухе

Для выполнения расчетов прогнозных накопленных доз, вплоть до значений доз за 50–70 лет (доза за жизнь), необходимо учитывать уменьшение мощности дозы в воздухе со временем. Очевидным механизмом уменьшения дозы со временем является радиоактивный распад нуклидов в выпадениях. Однако мощность дозы гамма-излуче-

ния уменьшается со временем также за счет процессов миграции долгоживущих радионуклидов в окружающей среде (природной и антропогенной). Учет влияния природной вертикальной миграции радионуклидов цезия в почве представлен в «чернобыльской» модели внешнего облучения населения, проживающего в дальней зоне выпадений (более 150 км от АЭС), функцией ослабления $r(t)$ [7, 16]:

$$r(t) = p_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_1} \cdot t\right) + p_2 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_2} \cdot t\right) \quad (4)$$

Параметры этой функции были определены на основе гамма-спектрометрического анализа более чем 400 образцов почвы, отобранных в течение 1986–2003 гг. в загрязненных регионах Германии (Бавария), Российской Федерации (Брянская, Тульская, Орловская, Ленинградская области), Швеции. В отсутствие японских данных к моменту подготовки доклада НКДАР ООН и с учетом того, что долговременное облучение японских жителей будет обусловлено теми же самыми радионуклидами ^{137}Cs и ^{134}Cs в форме легколетучих соединений, как и в дальней зоне чернобыльской аварии, было предложено и в «японской» модели внешнего облучения населения использовать функцию $r(t)$ в том же виде и с теми же параметрами, что и в чернобыльской дальней зоне: $p_1=0,5$, $p_2=0,5$, $T_1=1,5$ г. и $T_2=50$ лет [7, 16].

Влияние вертикальной миграции цезия на значение мощности дозы в воздухе показано на рисунке 1.

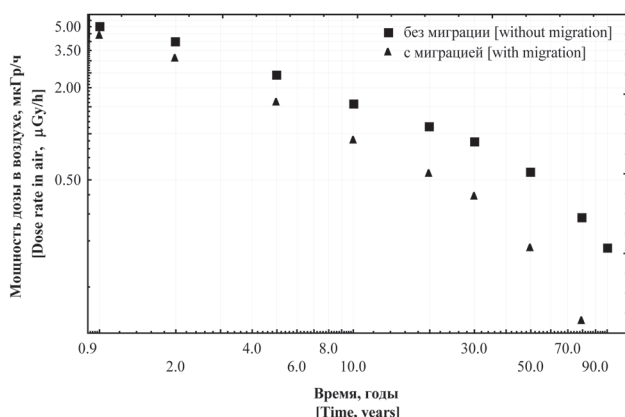


Рис. 1. Влияние миграции цезия в почву на мощность дозы в воздухе для изотопного состава выпадений после аварии на АЭС «Фукусима-1» (начальная поверхностная активность ^{137}Cs полагалась равной 1 МБк м⁻²)

[Fig. 1. The influence of cesium migration in soil depth on dose rate in air for isotopic composition of deposition after the accident on Fukushima-1 NPP (initial ^{137}Cs surface activity of 1 MBq m⁻²)]

Антропогенные факторы уменьшения дозы внешнего облучения населения

При облучении населения в антропогенной среде характеристики поля излучения изменяются по сравнению с таковыми над целинными участками почвы. Мощность дозы гамма-излучения в антропогенной среде всегда меньше, чем над открытыми участками почвы, особенно внутри зданий из-за поглощения излучения их конструкциями. Кроме того, естественные процессы смыва радионуклидов с дождем и снегом, а также хозяйственная деятельность человека (движение транспорта, чистка улиц и др.) обеспечивают вынос радионуклидов через дренаж-

ные системы за пределы НП. Учет этого проводится с помощью факторов места (location factors), определяемых как отношение мощности дозы в воздухе в выбранных точках внутри НП или в его ареале, обусловленной гамма-излучением радиоактивных выпадений, к аналогичной величине над открытым целинным участком почвы. Поведение человека в поле излучения источника описывают с помощью факторов поведения (occupancy factors), представляющих собой долю времени, в течение которого представители разных групп населения находятся в выбранных точках внутри НП или в его ареале.

Таким образом, факторы места зависят от времени. После чернобыльской аварии их зависимость от времени была установлена на основании результатов многочисленных измерений, выполненных на загрязненных территориях Европы [17, 18, 19] и РФ [16].

Поскольку информации о специфических факторах места для японских НП, применимых к их особой национальной строительной традиции, отсутствовали к моменту подготовки материалов НКДАР ООН, для расчета дозы использовали следующие факторы места, основанные на чернобыльском опыте: внутри жилых и производственных зданий и вне помещений (над асфальтированными и неасфальтированными поверхностями). Здания подразделяли на три типа с учетом японской национальной статистики: одноэтажный деревянный дом, одноэтажный деревянный огнеупорный дом и трехэтажный бетонный дом с начальными значениями факторов места 0,4, 0,2 и 0,1 соответственно. Зависимость факторов места от времени экстраполировали на основе чернобыльских измерений [11, 16] следующим образом:

– для твердых поверхностей (асфальт, бетон и т.п.):

$$f_{hard} = 0.50 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{0.9 \text{ г}}\right) + 0.1 \quad (5)$$

– для нетвердых поверхностей (почва, луг и т.п.):

$$f_{dirt} = 0.50 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{2.2 \text{ г}}\right) + 0.25 \quad (6)$$

– для зданий:

$$f_{build} = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}\right) + a_2 \quad (7) \text{ (табл. 3).}$$

На рисунке 2 в качестве примера показана зависимость от времени факторов места для чернобыльской и японской моделей расчета доз внешнего облучения населения.

Значения параметров в формуле (7) Таблица 3

Parameter values for formula (7)			
Тип здания [Type of building]	a_1 , отн.ед. [rel. un.]	a_2 , отн.ед. [rel. un.]	T , лет [years]
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,2	0,2	1,8
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,1	0,1	1,8
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete building]	0,05	0,05	1,8

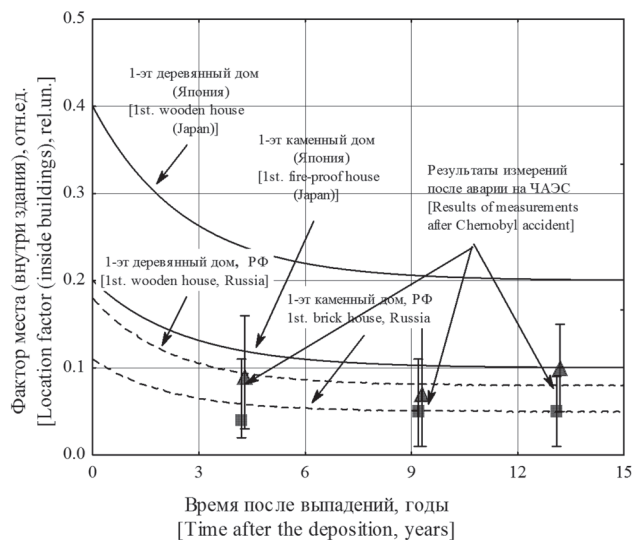


Рис. 2. Зависимость от времени факторов места для чернобыльской и японской моделей расчета доз внешнего облучения населения
[Fig. 2. The time influence of location factors after the Chernobyl and Japan models for external dose calculation of people]

Значения факторов времени для различных групп населения Японии были оценены на основе национальных данных опроса населения и представлены в таблице 4 [4]. Эти значения в комбинации со значениями факторов места характеризуют уменьшение доз облучения 12 социально-возрастных групп населения Японии в антропогенной среде по сравнению с облучением над открытым целинным участком почвы и называются антропогенными факторами уменьшения дозы. В таблице 5 для сравнения представлены их значения для чернобыльской и японской моделей расчета доз внешнего облучения взрослого населения, усредненные за 1 год, 10 и 80 лет после радиоактивных выпадений.

Коэффициенты перехода от значений кермы в воздухе к эффективной дозе

Значения коэффициентов перехода от кермы в воздухе на высоте 1 м к эффективной дозе для плоского изотропного источника фотонов с энергией 0,1–1 МэВ, залегающего на глубине 0,5 г см⁻² в почве, были получены расчетным путем для набора воксельных расчетных моделей тела человека различных размеров, включая фантом МКРЗ (the ICRP reference computational phantom) [20]. Они представлены в таблице 6.

Таблица 4

Набор значений факторов поведения для Японии

[Table 4]

Set of annual occupancy factors p_j for Japan

Тип локации [Type of location]	Фактор поведения, p_j отн. ед. [Occupancy factor, p_j (dimensionless)]			
	Ребенок 1 год [Child 1 y]	Ребенок 10 лет [Child 10 y]	¹ Взрослые, группа 1 [Adult, group1]	² Взрослые, группа 2 [Adult, group2]
Внутри помещений [indoors]	0,80	0,85	0,70	0,90
Вне помещений, включая: [outdoors including]:				
Асфальтированные поверхности [paved surfaces]	0,10	0,05	0,20	0,05
Неасфальтированные поверхности [unpaved surfaces]	0,10	0,10	0,10	0,05

¹группа 1 – представители профессий, работающих преимущественно вне помещений; ²группа 2 – представители профессий, работающих преимущественно внутри помещений.
 [group 1 – people working predominantly outdoors; group 2 – people working predominantly indoors].

Таблица 5

Усредненные по времени антропогенные факторы уменьшения дозы для РФ и Японии

[Table 5]

Time-averaged dose reduction factors for Russia and Japan

Жилой дом/офис [Living house/Office]	Чернобыльская авария (село/город) [Chernobyl accident (rural/urban)]		Авария на АЭС «Фукусима-1» [Fukushima-1 accident]	
	Группа 1 [Group1]	Группа 2 [Group2]	Группа 1 [Group1]	Группа 2 [Group2]
1 год облучения [1 st year exposure]				
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,43/0,35	0,38/0,24	0,41	0,38
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,37/0,31	0,30/0,19	0,29	0,22

Жилой дом/офис [Living house/Office]	Чернобыльская авария (село/город) [Chernobyl accident (rural/urban)]		Авария на АЭС «Фукусима-1» [Fukushima-1 accident]	
	Группа 1 [Group1]	Группа 2 [Group2]	Группа 1 [Group1]	Группа 2 [Group2]
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete buildings]	0,32/0,27	0,24/0,13	0,22	0,14
10 лет облучения [10 years exposure]				
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,33/0,22	0,27/0,16	0,25	0,25
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,29/0,20	0,22/0,13	0,16	0,14
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete buildings]	0,26/0,17	0,18/0,093	0,12	0,085
80 лет облучения [80 years exposure]				
Одноэтажный деревянный дом [One storey wood frame house]	0,29/0,17	0,23/0,14	0,20	0,20
Одноэтажный деревянный огнеупорный дом [One storey wooden fire-proof house]	0,26/0,16	0,19/0,11	0,12	0,11
Трехэтажный бетонный дом [Three storey concrete buildings]	0,23/0,13	0,15/0,082	0,085	0,065

Таблица 6

Коэффициенты перехода k_{Ei}^{dep} (Зв/Гр) для плоского изотропного источника фотонов с энергией 0,1–1 МэВ, залегающего на глубине 0,5 г см⁻² в почве

[Table 6]

Dose conversion coefficients k_{Ei}^{dep} (Sv/Gy) for infinite plane source at a depth of 0.5 g cm⁻² in the ground with photon energy of 0.1-1 MeV [20]

Показатель [Indicator]	Фантом МКРЗ [ICRP Reference phantom (adult)]	Фантом Jo [Phantom Jo (7-12 y)]	Фантом Baby [Phantom Baby (8 weeks)]
Рассчитано для диапазона энергий фотонов (измерено) [Calculated for different photon energies (measured)]	0,73-0,7 (0,69) ¹⁾	0,80-0,81 (0,77) ¹⁾	1,04-0,99 (0,88) ¹⁾
Рекомендовано [Recommended]	0,72	0,80	0,93 ²⁾

¹⁾ В скобках приведены результаты фантомных экспериментов, выполненных на загрязненных после Чернобыльской аварии территориях [5] [In brackets are shown the results of phantom measurements in the Chernobyl affected area [5]. ²⁾ Получено экстраполяцией от фантома Baby весом 4,2 кг к фантому годовалого ребенка весом 10 кг [Extrapolated from phantom Baby of 4.2 kg to 1y old infant of 10 kg].

На рисунке 3 результаты этих расчетов сравниваются с результатами измерений в физических фантомах годовалого, пятилетнего ребенка и взрослого человека, выполненных в реальных условиях радиоактивного загрязнения в Брянской области РФ [5]. Результаты измерений и расчетов для взрослого фантома и фантома 5-летнего ребенка соотносились в пределах 4–7%. Расчетных данных для модели весом 10 кг (возрастом 1 год) не было,

а различия между значениями коэффициентов перехода для 10 кг физического фантома (ребенок возрастом 1 год) и 4,2 кг расчетной модели ребенка возрастом 8 недель достигали 15%. Рекомендованные значения коэффициентов перехода для 10 кг ребенка возрастом 1 год, указанные в таблице 6, были получены интерполяцией расчетных значений для фантомов Baby и Child (см. примечание (2) к таблице 6).

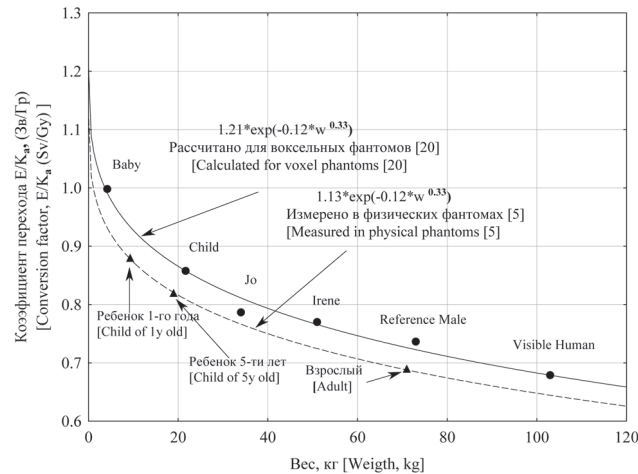


Рис. 3. Сравнение коэффициентов перехода от кермы в воздухе на высоте 1 м к значению эффективной дозы, полученных расчетным путем в воксельных расчетных моделях различного размера и измеренных с помощью физических фантомов в условиях радиоактивного загрязнения в Брянской области РФ

[Fig. 3. Comparison of the conversion coefficients from kerma in air at a height of 1 m to the effective dose obtained by calculation in human voxel calculation models of various sizes and measured using physical phantoms under conditions of radioactive contamination in the Bryansk region of the Russian Federation]

Сравнение результатов расчета доз согласно моделям внешнего облучения от радиоактивных выпадений в случае аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»

Как следует из вышеизложенного, структура модели внешнего облучения населения Японии от радиоактивных выпадений после аварии на АЭС «Фукусима-1» полностью соответствует аналогичной чернобыльской модели. Однако изотопный состав выпадений и ряд других параметров японской модели отличались от чернобыльских, что обуславливало и различие доз.

На рисунке 4 представлена зависимость от времени мощности кермы в воздухе на высоте 1 м над почвой в случае «чернобыльских» и «фукусимских» радиоактивных выпадений. В первые дни после выпадений мощность кермы в воздухе от «чернобыльских» выпадений превышала аналогичную величину от «фукусимских» выпадений приблизительно в два раза за счет присутствия таких короткоживущих радионуклидов, как ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{140}Ba , ^{140}La . Затем в период времени от 1 года до нескольких лет после выпадений мощность кермы в воздухе от «фукусимских» выпадений превышала аналогичную величину от «чернобыльских» выпадений до 30% за счет в два раза большей активности ^{134}Cs . Наконец, по прошествии 10 лет после выпадений мощности кермы в воздухе от «фукусимских» и «чернобыльских» выпадений сравнялись, т.к. практически определялись лишь одним долгоживущим радионуклидом ^{137}Cs в равновесии с $^{137\text{m}}\text{Ba}$.

Зависимость от времени накопленной кермы в воздухе после радиоактивных выпадений в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» представлена на рисунке 5. В этом случае различия более сглажены: через год после выпадений накопленная керма в воздухе в случае «чернобыльских» выпадений лишь на 7% больше аналогичной величины для «фукусимских» выпадений; через 10 лет соотношение изменяется в обратную сторону (за счет ^{134}Cs), и накопленная керма в воздухе в случае

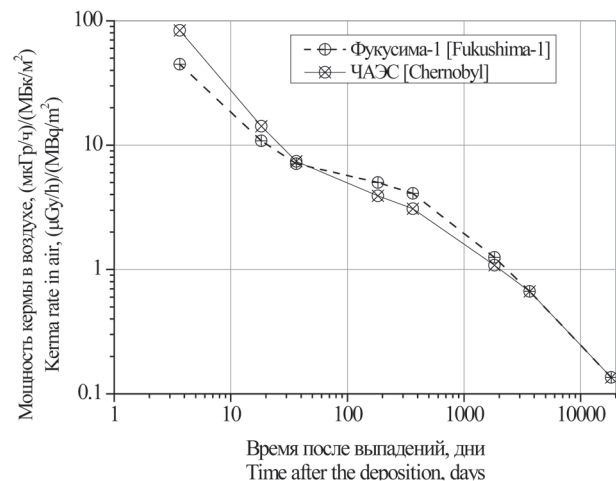


Рис. 4. Зависимость от времени мощности кермы в воздухе после радиоактивных выпадений в результате аварий на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»: ⊕ – «Фукусима-1»; ⊗ – ЧАЭС (нормировано на $1 \text{ MBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$).

[Fig. 4. Time dependence of kerma rate in air after radioactive deposition as a result of Chernobyl and Fukushima-1 accidents: ⊕ – Fukushima-1; ⊗ – Chernobyl (Normalized on $1 \text{ MBq m}^{-2} \text{ of } ^{137}\text{Cs}$)]

«фукусимских» выпадений становится больше, чем для «чернобыльских», на 10%, а дальше это различие медленно уменьшается, достигая через 25 лет +6% в пользу «фукусимских» выпадений.

В случае расчетов значений накопленной эффективной дозы у различных групп населения Японии и России дополнительную роль играли различия в антропогенных факторах уменьшения дозы (факторы места и поведения). Кроме того, в российской модели внешнего облучения существует подразделение групп населения по типу антропогенной среды (сельское, городское). В японской модели внешнего облучения населения такого подразделения нет.

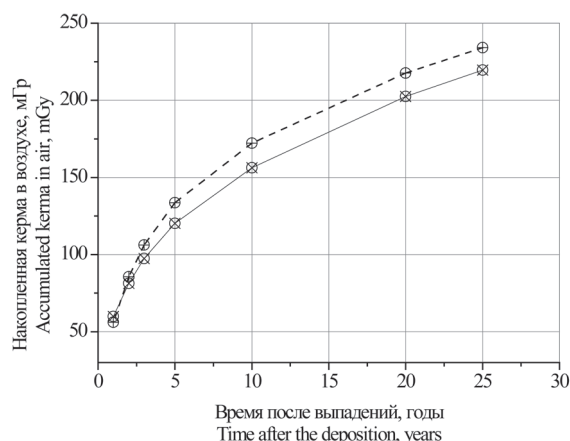


Рис. 5. Зависимость от времени накопленной кермы в воздухе после радиоактивных выпадений в результате аварий на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1»: ⊕ – «Фукусима-1»; ⊗ – ЧАЭС (нормировано на $1 \text{ MBq m}^{-2} \text{ }^{137}\text{Cs}$).

[Fig. 5. Time dependence of accumulated kerma in air after the radioactive deposition as a result of Chernobyl and Fukushima-1 accidents: ⊕ – Fukushima-1; ⊗ – Chernobyl. (Normalized on 1 MBq m^{-2} of ^{137}Cs)]

На рисунке 6 в качестве примера представлены результаты сравнения накопленных эффективных доз внешнего облучения для двух групп японского и двух групп русского взрослого населения (Брянская область РФ), различающихся условиями работы (вне или внутри помещения) и проживания (тип дома) в антропогенной среде.

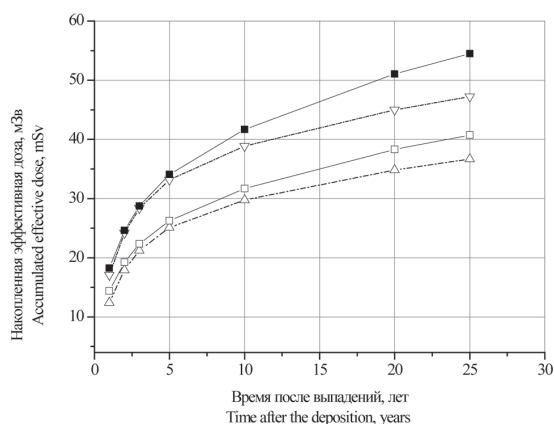


Рис. 6. Зависимость от времени накопленной эффективной дозы у различных групп взрослого населения после радиоактивных выпадений в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: ■ – российское сельское население, работающее вне помещений и проживающее в деревянных домах; ▽ – японское население, работающее вне помещений и проживающее в деревянных домах; Δ – японское население, работающее внутри многоквартирных зданий и проживающее в деревянных домах; □ – российское сельское население, работающее внутри многоквартирных зданий и проживающее в деревянных домах.

[Fig. 6. Time dependence of accumulated effective dose in different groups of adult population after the radioactive deposition as a result of Chernobyl and Fukushima accidents: ■ – Russian rural population working outdoors and living in wooden houses; ▽ – Japan population working outdoors and living in wooden houses; Δ – Japan population working indoors in multi storey houses and living in wooden houses; □ – Russian rural population working indoors in multi storey houses and living in wooden houses]

Оказалось, что накопленные эффективные дозы у японцев, проживающих в деревянных домах (большинство населения в наиболее загрязненной префектуре Фукусима) и работающих как вне, так и внутри помещений (группа 1 и группа 2 соответственно), близки к аналогичным величинам у сельских жителей Брянской области с такими же условиями работы и проживания. Городское население Брянской области с аналогичными условиями работы и проживания подвергалось облучению в более низких дозах по сравнению с японским, в основном из-за лучших защитных свойств зданий.

Заключение

В работе представлено сравнение моделей и оцениваемых с их помощью доз внешнего облучения населения от радиоактивных выпадений после аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1». Как дозы гамма-излучения в окружающей среде, так и эффективные дозы внешнего облучения сопоставимых групп населения, нормированные на одинаковую поверхностную активность радионуклидов, для обеих аварий оказались близки. Причинами этого явились как схожесть изотопного состава выпадений, так и тот факт, что «японская» модель внешнего облучения была основана на «чернобыльской», вплоть до использования одинаковых численных значений для некоторых параметров, из-за недостатка специфических японских послеаварийных данных к моменту первых оценок доз облучения жителей Японии. Для более корректного сравнения доз внешнего облучения жителей после двух аварий необходимо верифицировать значения параметров японской модели с помощью результатов измерений мощностей доз гамма-излучения в окружающей среде и индивидуальных доз внешнего облучения жителей, выполненных после аварии на АЭС «Фукусима-1».

Анализируя публикации, вышедшие после 2013 г., НКДАР ООН пришел к выводу, что большинство из них поддерживают или подтверждают основные предположения, сделанные в докладе 2013 г. [21], в частности:

- дозы внешнего облучения населения Японии, полученные с помощью индивидуальных измерений или оцененные на основе измерений мощности дозы в сочетании с национальными антропогенными факторами уменьшения дозы, в целом согласуются с выводами отчета 2013 г.;
- дозы внешнего облучения населения Японии продолжают снижаться в соответствии с выводами доклада 2013 г.

Более подробному анализу результатов натурных исследований, выполненных после 2013 г. в контексте их использования для верификации «японской» модели внешнего облучения населения будет посвящена отдельная статья.

Литература

1. International Atomic Energy Agency 2006. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty years of experience. IAEA: Vienna.
2. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
3. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan

- Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
4. Jacob P., Meckbach R. External exposure from deposited radionuclides. Proceedings of the seminar on methods and codes for assessing the off-site consequences of nuclear accidents. Brussels: Commission of the European Communities; EUR 13013; 1990.
5. Golikov V., Wallstrom E., Wohli T., et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // *Radiat Environ Biophys.* 2007;46(4): 375-382.
6. Golikov V.Yu., Balonov M. I., Ponomarev A.V. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov M.I. and Merwin S.E., eds. *The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.*
7. Jacob P., Pröhl G., Likhtarev I., et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN: 1-130; 1996.
8. Golikov V., Balonov M., Erkin V., et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident // *Health Phys.* 1999;77(6): 654-661.
9. Зонирование населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, по критерию годовой дозы облучения населения. Методические указания МУ 2.6.1.784-99. Минздрав России, М., 1999. 19 с.
10. Реконструкция накопленной в 1986-1994 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Методические указания МУ 2.6.1-96. Минздрав России, 1996. 33 с.
11. Jacob P., Meckbach R., Müller H.M. Reduction of external exposure from deposited Chernobyl activity by run-off, weathering, street cleaning and migration in the soil. *Radiat. Prot. Dosim.* 1987;21: 51-57.
12. Романович И.К. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здоровья населения Российской Федерации / Под ред. Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
13. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Ponomarev A.V. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov M.I. and Merwin S.E., eds. *The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.*
14. Pitkevich V.A., Shershakov V.M., Duba V.V. et al. Reconstruction of composition of the Chernobyl radionuclide fallout in the territories of Russia // *Radiation and Risk.* 1993;(3): 62-93.
15. Jacob P., Rosenbaum H., Petoussi N., Zankl M. Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods. Part II: Radionuclides distributed in the air or deposited on the ground. GSF-National Research Center on Environment and Health. Neuherberg, Germany: GSF-Bericht 12/90; 1990.
16. Golikov V.Yu., Balonov M.I., Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident // *Radiat. Environ. Biophysics.* 2002;41(10): 185-193.
17. Andersson K.G., Roed J., Jacob P., Meckbach R. Weathering of Cs-137 on various surfaces in inhabited areas and calculated locations factors. In: *Deposition of radionuclides, their subsequent relocation in the environment and resulting implications. Report EUR 16604 EN, European Commission, Luxembourg; 1995: 47-56.*
18. Meckbach R., Jacob P. Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Part II: Location factors for different deposition patterns // *Radiat. Prot. Dosim.* 1988;25: 181-190.
19. Jacob P., Meckbach R. Measurements after the Chernobyl accident regarding the exposure of an urban population. IN: *Restoration of environments affected by residues from radiological accidents: Approaches to decision making*, pp. 34-41. IAEA-TECDOC-1131. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2000.
20. Petoussi-Hens N., Schlattl H., Zankl M., et al. Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children // *Phys. Med. Biol.* 2012;57: 5679-5713.
21. Developments since the 2013 UNSCEAR report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the Great East-Japan earthquake and tsunami. A 2017 white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. New York, 2017.

Поступила: 09.01.2020 г.

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

Для цитирования: Голиков В.Ю. Дозиметрия внешнего облучения населения: сравнение аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» // *Радиационная гигиена.* 2020. Т.13, № 1. С. 27-37.
DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-27-37

Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents

Vladislav Yu. Golikov

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

The paper is devoted to comparing the models and the doses of the population external exposure from radioactive fallout after the accident at the Chernobyl and Fukushima-1 NPPs estimated with their help. In the case of the Fukushima-1 accident, the model proposed by the UNSCEAR was used. Both the values of the doses of gamma radiation in the environment and the values of the effective doses of external exposure of comparable population groups normalized to the same surface activity of radionuclides were close for both accidents. The reasons for this are both the similarity of the isotopic compositions of the radioactive fallout and the fact that the "Japanese" model of external exposure was based on the "Chernobyl" model up to using the same numerical values for some parameters, due to the lack of specific Japanese post-accident data for the moment of the first dose estimates for the inhabitants of Japan. For a more accurate comparison of the external exposure of residents after two accidents it is necessary to verify the values of the parameters of the Japanese model using the results of measurements of gamma radiation dose rates in the environment and individual external doses of the residents after the accident at the Fukushima-1 NPP.

Key words: radiation accident, Chernobyl NPP, Fukushima-1 NPP, models of external exposure, gamma-radiation, effective dose.

References

1. International Atomic Energy Agency 2006. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty years of experience. IAEA: Vienna.
2. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, 2012.
3. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Scientific Annex A, Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Appendix C (Assessment of Doses to the Public). United Nations, New York, 2014.
4. Jacob P, Meckbach R. External exposure from deposited radionuclides. Proceedings of the seminar on methods and codes for assessing the off-site consequences of nuclear accidents. Brussels: Commission of the European Communities; EUR 13013; 1990.
5. Golikov V, Wallstrom E, Wohni T, et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiat Environ Biophys*. 2007;46(4): 375-382.
6. Golikov VYu, Balonov MI, Ponomarev AV. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov MI and Merwin SE, eds. The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.
7. Jacob P, Pröhl G, Likhtarev I, et al. Pathway analysis and dose distributions. European Commission, Brussels: EUR 16541 EN: 1-130; 1996.
8. Golikov V, Balonov M, Erkin V, et al. Model validation for external doses due to environmental contaminations by the Chernobyl accident. *Health Phys*. 1999;77(6): 654-661.
9. Methodological guidelines MG 2.6.1.784-99. Zoning of the Russian Federation settlements contaminated as a result of the Chernobyl accident according to the criterion of the annual population dose. Moscow: Minzdrav of Russia; 1999: 19 (In Russian).
10. Methodological guidelines MG 2.6.1.579-96. The reconstruction of population average accumulated in 1986 – 1995 effective exposure dose in radioactively contaminated Russian settlements after 1986 Chernobyl NPP accident. Moscow: Minzdrav of Russia; 1996: 33 (In Russian).
11. Jacob P, Meckbach R, Müller HM. Reduction of external exposure from deposited Chernobyl activity by run-off, weathering, street cleaning and migration in the soil. *Radiat. Prot. Dosim*. 1987;21: 51-57.
12. Romanovich IK, et al. The accident at the «Fukushima-1» NPP: the preventive measures organization aimed at the preservation of the Russian Federation public health. Ed.: GG Onischenko. St. Petersburg: Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev. 2012: 336 (In Russian).
13. Golikov VYu, Balonov MI, Ponomarev AV. Estimation of external gamma-radiation doses to the population after the Chernobyl accident. In: Balonov MI and Merwin SE, eds. The Chernobyl Papers. Vol.1. Research Enterprises; Publishing Segment; Richland; Washington; 1993: 247-288.
14. Pitkevich VA, Shershakov VM, Duba VV, et al. Reconstruction of composition of the Chernobyl radionuclide fallout in the territories of Russia. *Radiation and Risk*. 1993;(3): 62-93.
15. Jacob P, Rosenbaum H, Petoussi N, Zankl M. Calculation of organ doses from environmental gamma rays using human phantoms and Monte Carlo methods. Part II: Radionuclides distributed in the air or deposited on the ground. GSF-National Research Center on Environment and Health. Neuherberg, Germany: GSF-Bericht 12/90; 1990.
16. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Radiat. Environ. Biophysics*. 2002;41(10): 185-193.
17. Andersson GG, Roed J, Jacob P, Meckbach R. Weathering of Cs-137 on various surfaces in inhabited areas and calcu-

Vladislav Yu. Golikov

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

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

- lated locations factors. In: Deposition of radionuclides, their subsequent relocation in the environment and resulting implications. Report EUR 16604 EN, European Commission, Luxemburg. 1995: 47-56.
18. Meckbach R, Jacob P. Gamma exposures due to radionuclides deposited in urban environments. Part II: Location factors for different deposition patterns. *Radiat. Prot. Dosim.* 1988;25: 181-190.
 19. Jacob P, Meckbach R. Measurements after the Chernobyl accident regarding the exposure of an urban population. IN: Restoration of environments affected by residues from radiological accidents: Approaches to decision making, pp. 34-41. IAEA-TECDOC-1131. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2000.
 20. Petoussi-Henss N, Schlattl H, Zankl M, Endo A, Saito K. Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children. *Phys. Med. Biol.* 2012;57: 5679-5713.
 21. Developments since the 2013 UNSCEAR report on the levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident following the Great East-Japan earthquake and tsunami. A 2017 white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. New York, 2017.

Received: January 09, 2020

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

For citation: Golikov V.Yu. Dosimetry of external population exposure: a comparison of the Chernobyl and Fukushima accidents. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 27-37. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-27-37

Динамика уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в сельских населенных пунктах Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии

В.П. Рамзаев, А.Н. Барковский

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

Целью настоящего исследования являлось определение динамики уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в типичных локациях сельской местности в отдаленный период после Чернобыльской аварии. Измерения мощности дозы с использованием полевого гамма-спектрометра-дозиметра были выполнены в ареалах 15 населенных пунктов Злынковского, Клинцовского и Новозыбковского районов Брянской области России в период 1998–2012 гг. После аварии в 1986 г. плотность загрязнения территории ^{137}Cs во всех обследованных населенных пунктах превышала величину 555 КБк/м^2 . Измерения мощности дозы были проведены в восьми локациях, обычно используемых при оценке доз облучения населения после Чернобыльской аварии: 1) целинные участки почвы (луга), расположенные вне населенного пункта; 2) целинные участки почвы, расположенные внутри населенного пункта; 3) леса; 4) пахотные поля; 5) огороды; 6) прочие земляные поверхности (земляные дворы рядом с жилыми домами); 7) жилые одноэтажные деревянные дома; 8) асфальтированные поверхности (улицы, дороги, дворы рядом с жилыми домами). Количество точек наблюдения в индивидуальных локациях составляло от 6 до 19 (всего 103 точки). Серии измерений в отдельных точках были начаты в период 1998–2001 гг. и закончены в 2009–2012 гг. В среднем продолжительность серии была равна 11,1 года. Измерения проводили в весенне-осенний период в отсутствие снега ежегодно (в отдельные годы в некоторых точках по два-три раза в год). В начальный момент времени наблюдений (1998–2001 гг.) значения мощности поглощенной дозы в воздухе от гамма-излучения $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$ находились в диапазоне от 40 до 2020 нГр/ч. Максимальные значения были зарегистрированы над целинной почвой и в лесах, а минимальные — внутри домов и над асфальтированными поверхностями. К концу серии наблюдений (2009–2012 гг.) мощность дозы уменьшилась на 6–64%. Значения экологического периода полууменьшения мощности дозы, вычисленные для отдельных локаций, равнялись 34 годам (целинные почвы, расположенные вне населенного пункта), 30 годам (целинные почвы, расположенные внутри населенного пункта), 37 годам (леса), 93 годам (пахотные поля), 99 годам (огороды), 33 годам (прочие земляные поверхности), 45 годам (деревянные дома), 60 годам (асфальтированные поверхности). Полученные значения периода полууменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в обследованных локациях были использованы для оценки величины экологического периода полууменьшения эффективной дозы внешнего облучения сельского населения, проживающего в деревянных домах. В среднем этот период оказался равным 50 годам. С учетом радиоактивного распада ^{137}Cs можно ожидать, что доза внешнего облучения сельского населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться примерно на 4% в год. Наша оценка уменьшения мощности дозы внешнего излучения близка к оценке, которая была ранее получена другими авторами для описания медленной компоненты динамики эффективной дозы внешнего облучения взрослых жителей в сельских населенных пунктах Брянской области.

Ключевые слова: Чернобыль, ^{137}Cs , гамма-излучение, мощность поглощенной дозы в воздухе, эффективная доза.

Введение

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. привела к широкомасштабному загрязнению окружающей среды различными техногенными радионуклидами, включая изотоп долгоживущего ^{137}Cs (период полураспада $T_{\text{phys}} = 30,0$ лет)

[1, 2]. Этот радионуклид в равновесии с дочерним метастабильным изотопом $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ($T_{\text{phys}} = 2,55$ мин)] в настоящее время определяет чернобыльскую компоненту дозы внешнего облучения населения, проживающего на загрязненных территориях [2–4].

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

Для оценки дозы внешнего облучения населения от ^{137}Cs в условиях чернобыльского загрязнения были предложены модели, которые учитывают как продолжительность нахождения человека в том или ином месте (локации) внутри загрязненной территории, так и мощность дозы гамма-излучения в воздухе от ^{137}Cs (DR) в этих локациях [1, 2, 5–7]. Последний параметр характеризуется существенными различиями между локациями.

Динамика мощности дозы в локации, во-первых, зависит от скорости радиоактивного распада изотопа (для ^{137}Cs 2,3% в год), что формально может быть представлено:

$$DR(t) = DR(0) \times \exp(-\lambda_{phys} \times t), \quad (1)$$

где $DR(t)$ – мощность дозы в момент времени t ; $DR(0)$ – мощность дозы в начальный момент времени ($t = 0$); λ_{phys} – постоянная распада, год⁻¹ (для ^{137}Cs 0,023 год⁻¹); t – время, прошедшее от момента 0 (год).

Второй компонентой, определяющей динамику мощности дозы в воздухе, является скорость уменьшения $DR(t)$ за счет экологических (природных) процессов и деятельности человека, включая дезактивацию территории. Динамика данной компоненты характеризуется «экологическим периодом полууменьшения» (T_{eco} , год) $DR(t)$. Соответственно, постоянная экологического уменьшения (λ_{eco} , год⁻¹) $DR(t)$, может быть представлена в виде:

$$\lambda_{eco} = \frac{\ln 2}{T_{eco}} \quad (2)$$

В данном случае динамику мощности дозы гамма-излучения в воздухе от ^{137}Cs $DR(t)$ в локации можно описать экспоненциальной зависимостью:

$$DR(t) = DR(0) \times \exp(-(\lambda_{phys} + \lambda_{eco}) \times t) \quad (3)$$

Обозначив сумму $\lambda_{phys} + \lambda_{eco}$ как постоянную эффективного уменьшения мощности дозы, λ_{eff} , получаем:

$$DR(t) = DR(0) \times \exp(-\lambda_{eff} \times t) \quad (4)$$

Эффективный период полууменьшения мощности дозы, T_{eff} , вычисляем:

$$T_{eff} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eff}} \quad (5)$$

Экологический период полууменьшения мощности дозы, T_{eco} , вычисляем, используя следующую формулу:

$$T_{eco} = \frac{\ln 2}{(\lambda_{eff} - \lambda_{phys})} \quad (6)$$

Для отдаленного периода после Чернобыльской аварии (1996–2003 гг.) показано, что, проведя серию последовательных измерений мощности дозы в одной и той же точке на протяжении нескольких лет, можно аппроксимировать зависимость $DR(t)$ от времени одной экспонентой [выражение (4)] и вычислить T_{eff} и T_{eco} [6]. Выполненные в работе Ramzaev et al. [6] оценки выявили существенную разницу между локациями в отношении значений T_{eco} . Одновременно было указано на необходимость более длительного наблюдения за динамикой мощности дозы в воздухе, т.к. значения T_{eco} могли достигать величины десятков или даже сотен лет и отличались высокой неопределенностью.

Цель исследования – уточнение результатов, полу-

ченных в [6], и определение T_{eff} и T_{eco} на основе результатов, полученных за более длительный период наблюдений после аварии на ЧАЭС (1998–2012 гг.), применительно к типичным локациям сельских населенных пунктов юго-западных районов Брянской области России.

Материалы и методы

Исследования были проведены на территории Злынковского, Клинцовского и Новозыбковского районов Брянской области в период 1998–2012 гг. Всего было обследовано 14 сельских населенных пунктов (н.п.) и один городской н.п., – г. Новозыбков. Перечень н.п., в ареалах которых проводили работы, представлен в таблице 1. Эта таблица также содержит официальные данные [8–10] о плотности загрязнения территории н.п. ^{137}Cs (σ_{cs} , кБк/м²) для 1986, 2001 и 2014 гг. Можно видеть, что начальные уровни загрязнения были весьма высокими и все н.п. попали в зону отселения ($\sigma_{cs} > 555$ кБк/м²). Выбор сильно загрязненных н.п. для наших исследований не был случайным, т.к. долговременные наблюдения требовали значений DR, надежно регистрируемых на протяжении всего периода времени наблюдений.

Сопоставление уровней загрязнения в различные годы (колонки 5 и 6 в таблице 1) показывает, что уменьшение запаса (плотности загрязнения) ^{137}Cs на территории н.п. происходило в близком соответствии с законом радиоактивного распада радионуклида. Для радиоактивного распада доля σ_{cs} в 2005 г. (на 1 января) и 2014 г. (на 1 января) равняется, 0,65 и 0,53 соответственно, относительно показателя 1986 г. (на 10 мая).

Измерения были проведены в восьми типичных локациях, использованных ранее при оценке доз облучения населения после Чернобыльской аварии [1, 5, 6]: 1) целинные участки почвы (луга), расположенные вне н.п.; 2) целинные участки почвы, расположенные внутри н.п.; 3) леса; 4) пахотные поля; 5) огороды; 6) прочие земляные поверхности (земляные дворы рядом с жилыми домами); 7) жилые одноэтажные деревянные дома; 8) асфальтированные поверхности (улицы, дороги, дворы рядом с жилыми домами). В городе Новозыбков измерения проводили на окраине в той части, где застройка соответствовала таковой в сельских н.п. Количество точек наблюдения в локациях находилось в диапазоне от 6 до 19 (всего 103 точки). Серии измерений в отдельных точках были начаты в период 1998–2001 гг. и закончены в 2009–2012 гг. В среднем продолжительность серии была равна 11,1 года. В каждой точке было записано в среднем по 13 спектров. Измерения проводили в весенне-осенний период ежегодно (за исключением 2011 г.), в отсутствие снежного покрова (в отдельные годы в некоторых точках по два-три раза в год).

Для измерения мощности поглощенной дозы в воздухе (нГр/ч) использовали переносной спектрометр-дозиметр гамма-излучения МКС-СК1 «СКИФ» фирмы «Синко» (Санкт-Петербург, Россия) [11]. Спектрометр-дозиметр «СКИФ» имел сцинтилляционный детектор с цилиндрическим кристаллом NaI(Tl) размером 63 мм × 63 мм и 480-канальный анализатор импульсов. Детектор был размещен в защитном футляре. Процедура калибровки прибора для измерения общей мощности дозы и последующего определения вклада природной и чернобыльской компоненты в величину общей мощности дозы приведены в работах

Таблица 1

Список населенных пунктов, обследованных в Брянской области в 1998–2012 гг., и официально установленные средние значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (σ_{Cs}) в населенных пунктах [8–10]

[Table 1]

List of settlements surveyed in the Bryansk region in 1998–2012 and the officially determined mean values of ^{137}Cs soil contamination density (σ_{Cs}) for the settlements [8–10]

Населенный пункт [Settlement]	Плотность загрязнения ^{137}Cs (кБк/м ²) [^{137}Cs contamination density (kBq/m ²)]			Отношение плотностей загрязнения ^{137}Cs [^{137}Cs contamination densities ratio]	
	1986 г. [1986 y]	2005 г. [2005 y]	2014 г. [2014 y]	2005 г./1986 г. [2005 y/1986 y]	2014 г./1986 г. [2014 y/1986 y]
Ущерпье [Uscherpie]	656	452	370	0,69	0,56
Мамай [Mamay]	684	465	377	0,68	0,55
Синявка [Sinavka]	696	459	392	0,66	0,56
Новозыбков [Novozybkov]	697	471	396	0,68	0,57
Дубровка [Dubrovka]	784	532	433	0,68	0,55
Веприн [Veprin]	853	564	459	0,66	0,54
Новые Бобовичи [Novie Bobovich]	1090	729	592	0,67	0,54
Ясная Поляна [Yasnaya Polyana]	1100	676	551	0,61	0,50
Муравинка [Muravinka]	1130	729	592	0,65	0,52
Деменка [Demenka]	1170	780	636	0,67	0,54
Барки [Barki]	1200	750	611	0,63	0,51
Грива [Griva]	1210	801	651	0,66	0,54
Старый Вышков [Stary Vishkov]	1470	1060	847	0,72	0,58
Святск [Svyatsk]	1490	963	751	0,65	0,50
Бабаки [Babaki]	2190	1410	1140	0,64	0,52
Средняя [Mean]	1100	723	587	0,66	0,54
Стандартное отклонение [Standard deviation]	411	266	210	0,03	0,02

[12, 13]. Небольшой и постоянно снижающийся со временем вклад гамма-излучения ^{134}Cs (около 2% в начале серии измерений) был вычтен.

Для измерений детектор вывешивали на алюминиевом треножнике на высоте 1 м над подстилающей поверхностью (иллюстрация приведена в [14]). Продолжительность набора спектра находилась в диапазоне от 200 с до 600 с (типично 300 с). Статистическая неопределенность оценки мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs в подавляющем большинстве случаев не превышала 5% и во всех случаях была менее 15% (2 ст. откл.). Отклонение точки расположения треноги в последующие годы от изначально выбранной точки не превышало 5 м для локаций «пахотное поле»; для остальных локаций этот показатель был менее 2 м.

Статистический анализ полученных результатов включал в себя вычисление средней, медианы, стандартного отклонения. Различия между группами исследовали с помощью непараметрического критерия Манна – Уитни.

Результаты и обсуждение

В начальный момент времени (1998–2001 гг.) значения мощности поглощенной дозы в воздухе гамма-излучения ^{137}Cs [$DR(t)$] находились в диапазоне от 40 до 2020 нГр/ч. Значения $DR(t)$ для отдельных локаций приведены в та-

блице 2. Как видно из данных таблицы 2, максимальные значения были зарегистрированы над целинными почвами, расположенными вне н.п., и в лесах, а минимальные – внутри домов и над асфальтированными поверхностями. Такое распределение локаций в отношении мощности дозы в воздухе от чернобыльского цезия соответствует данным и оценкам, полученным другими авторами на территориях, загрязненных в результате Чернобыльской аварии [1, 2, 6, 7]. К концу наших наблюдений (2009–2012 гг.) $DR(t)$ уменьшилась (см. табл. 2) во всех точках, в среднем на 33% (диапазон 6–64%).

По результатам измерений в каждой серии были построены зависимости $DR(t)$ от времени, прошедшего с 1 января 1998 г. (момент времени $t = 0$). Динамика уменьшения мощности дозы в воздухе во всех точках хорошо аппроксимировалась экспоненциальной зависимостью от времени [выражение (4)]. Примеры результатов измерений и их экспоненциальной аппроксимации приведены на рисунке 1. Коэффициент детерминации (R^2) был высоким и в среднем для 103 мест наблюдения составил 0,858 (диапазон 0,495–0,977). Наблюдаемый разброс результатов измерений относительно линии аппроксимации можно объяснить комбинацией таких факторов, как: 1) статистическая погрешность измерений общей мощности дозы и вычисления $DR(t)$; 2) некоторая

Таблица 2

Мощность поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs для первого измерения (1998–2001 гг.) и последнего измерения (2009–2012 гг.) в серии наблюдений в выбранных локациях в Брянской области в 1998–2012 гг.

[Table 2]

Absorbed dose rates in air from ^{137}Cs for the first measurement (1998–2001) and the last measurement (2009–2012) in series of observations at the selected locations in the Bryansk region in 1998–2012

Локация [Location]	n	Мощность поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs (нГр/ч) [Absorbed dose rate in air from ^{137}Cs (nGy/h)]			
		1998–2001 гг. [1998–2001]		2009–2012 гг. [2009–2012]	
		Диапазон [Range]	Средняя $\pm$ С.о. [Mean $\pm$ s.d.]	Диапазон [Range]	Средняя $\pm$ С.о. [Mean $\pm$ s.d.]
Лес [Forest]	23	359 – 1110	736 $\pm$ 215	260 – 709	463 $\pm$ 120
Целинная почва вне населенного пункта [Virgin soil outside settlement]	15	576 – 2020	1120 $\pm$ 421	319 – 1420	679 $\pm$ 326
Пахотное поле [Arable field]	22	141 – 655	350 $\pm$ 177	100 – 517	266 $\pm$ 148
Целинная почва внутри населенного пункта [Virgin soil inside settlement]	6	632 – 824	719 $\pm$ 69	376 – 632	454 $\pm$ 93
Земляной двор [Earthen yard]	8	135 – 427	281 $\pm$ 113	87 – 269	167 $\pm$ 63
Огород [Kitchen garden]	10	166 – 576	360 $\pm$ 135	130 – 455	268 $\pm$ 105
Асфальтированная поверхность [Asphalted area]	12	60 – 317	138 $\pm$ 81	41 – 225	95 $\pm$ 59
Деревянный дом [Wooden house]	7	38 – 100	77 $\pm$ 22	26 – 70	53 $\pm$ 15

n – число обследованных точек [n – number of sites surveyed].
С.о. – стандартное отклонение [s.d. – standard deviation].

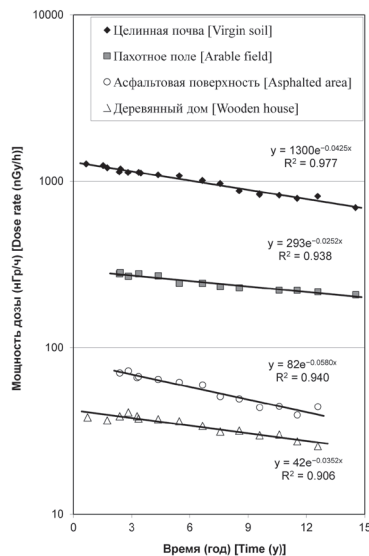


Рис. 1. Примеры экспериментальных значений мощности поглощенной дозы в воздухе от ^{137}Cs и экспоненциальные кривые, соответствующие данным для индивидуальных точек наблюдения. Измерения проводились в период 1998–2012 гг. на лугу (целинная почва), расположенном вблизи села Муравинка, на пахотном поле, расположенном недалеко от деревни Веприн, и в городе Новозыбков на улице (асфальтовая поверхность) и внутри деревянного дома. 1 января 1998 г. взято в качестве нулевой точки на оси времени [Fig. 1. Examples of experimental values of absorbed dose rate in air from ^{137}Cs and exponential fits to the data for individual sites. The measurements were performed in the period 1998–2012 at a meadow (virgin soil) located near the village Muravinka, at an arable field located near the village Veprin, and at a street (asphalted area) and in a wooden house in the town Novozybkov. The first of January 1998 is defined as the zero point in the time axis]

вариабельность размещения спектрометра на площадке в разные годы; 3) изменения влажности почвы и, соответственно, мощности дозы гамма-излучения на протяжении коротких промежутков времени (см., например, [15]).

Значения постоянной эффективного уменьшения $DR(t)$, λ_{eff} в 103 пунктах наблюдения находились в диапазоне от 0,0252 год⁻¹ до 0,0734 год⁻¹, что соответствует скорости снижения $DR(t)$ от 2,52% до 7,34% в год.

Вычисленные [выражение (5)] значения эффективно-го период полууменьшения $DR(t)$, T_{eff} варьировали от 9,4 до 27,5 лет. Соответственно, вычисленные [выражение (6)] значения экологического периода полууменьшения $DR(t)$, T_{eco} лежали в диапазоне от 14 до 320 лет. Столь широкий диапазон значений может быть объяснен различиями в скорости уменьшения $DR(t)$ как между отдельными точками внутри одной и той же локации, так и между разными локациями (табл. 3).

Для целинных участков почвы, расположенных вне н.п., среднее значение T_{eco} равнялось 34 годам. Целинные участки почвы используются в качестве референтной локации (референтного места) при моделировании распределения доз внешнего облучения в различных локациях после аварии на ЧАЭС и проведении дозовых оценок [1, 5, 16]. На основе анализа вертикальных распределений ^{137}Cs в почве Golikov et al. [1] пришли к заключению, что применительно к Брянской области динамика $DR(t)$ (в части природной миграции) может быть описана суммой двух экспонент, имеющих значения T_{eco} 2,4 года [короткий период полууменьшения $DR(t)$] и 37 лет [длинный период полууменьшения $DR(t)$]. Последнее значение хорошо соответствует полученному нами среднему (34 года) и медианному (33 года) значению T_{eco} для целинных участков почвы вне н.п. в отдаленном периоде времени после аварии. Такое совпадение в определенной мере связано с тем, что в изученный нами период времени (1998–2012 гг.) влия-

Таблица 3

Эффективный период полууменьшения мощности дозы от ^{137}Cs (T_{eff}) и экологический период полууменьшения мощности дозы от ^{137}Cs (T_{eco}) для выбранных локаций в Брянской области в 1998–2012 гг.

[Table 3]

^{137}Cs -dependent dose rate effective half-live (T_{eff}) and ^{137}Cs -dependent dose rate ecological half-live (T_{eco}) for the selected locations in the Bryansk region in 1998–2012]

Локация [Location]	n	T_{eff} (год) [T_{eff} (y)]			T_{eco} (год) [T_{eco} (y)]		
		Диапазон [Range]	Медиана [Median]	Средняя $\pm$ С.о. [Mean $\pm$ s.d.]	Диапазон [Range]	Медиана [Median]	Средняя $\pm$ С.о. [Mean $\pm$ s.d.]
Лес [Forest]	23	13 – 19	16	16 $\pm$ 2	22 – 54	36	37 $\pm$ 9
Целинная почва вне населенного пункта [Virgin soil outside settlement]	15	11 – 20	16	16 $\pm$ 2	18 – 57	33	34 $\pm$ 11
Пахотное поле [Arable field]	22	16 – 28	21	21 $\pm$ 3	34 – 320	70	93 $\pm$ 71
Целинная почва внутри населенного пункта [Virgin soil inside settlement]	6	10 – 18	15	15 $\pm$ 3	15 – 42	31	30 $\pm$ 11
Земляной двор [Earthen yard]	8	9,4 – 22	14	15 $\pm$ 4	14 – 77	28	33 $\pm$ 20
Огород [Kitchen garden]	10	16 – 26	23	22 $\pm$ 3	33 – 200	89	99 $\pm$ 56
Асфальтированная поверхность [Asphalted area]	12	12 – 26	18	18 $\pm$ 4	20 – 220	46	60 $\pm$ 54
Деревянный дом [Wooden house]	7	13 – 23	18	17 $\pm$ 4	22 – 96	46	45 $\pm$ 26

n – число обследованных точек [n – number of sites surveyed].
С.о. – стандартное отклонение [s.d. – standard deviation].

ние быстрой компоненты на динамику мощности дозы в воздухе уже является пренебрежимо малым. Аналогичные средние и медианные значения T_{eco} были вычислены нами для земляных дворов и участков целинной почвы, расположенных внутри н.п., а также для лесов (см. табл. 3). Статистически значимых различий между этими локациями и целинными участками почвы, расположенными вне н.п., не было найдено (тест Манна – Уитни, $P > 0,05$). Не было обнаружено и статистически значимой разницы ($P > 0,05$) между асфальтированными поверхностями и целинными участками почвы, хотя и среднее (60 лет), и медианное (46 лет) значения T_{eco} для асфальтированных площадок заметно превышали таковые для целинных лугов. Не было найдено различий ($P > 0,05$) также между целинными участками почвы и деревянными домами. Значения T_{eco} для пахотных полей и огородов были в 2–3 раза больше, чем таковое для целинных участков почвы (см. табл. 3). Здесь различия были уже статистически значимыми (тест Манна – Уитни, $P < 0,01$).

С учетом полученных значений T_{eco} для мощности дозы гамма-излучения в типичных локациях (см. табл. 3), можно оценить значения экологического периода полууменьшения эффективной дозы внешнего облучения (T_{eco}) для сельского населения, которое проживает в деревянных домах. Для этих вычислений мы использовали нормированные (на плотность загрязнения территории ^{137}Cs) значения $DR(t)$, полученные в работе [6] для типичных локаций на летний период 1996–2001 гг., и значения доли времени (так называемый «фактор поведения»), которую человек проводит в каждой из локаций также в летний период [7]. Оценка была выполнена для трех групп жителей, выделенных в работе В.Ю. Голикова [7]: 1) работающие, преимущественно внутри помещений (группа 1 – например, служащие, продавцы, учителя), 2) работающие, преимущественно вне помещений (группа 2 – сельскохозяйственные рабочие), 3) пенсионеры. Для выполнения

расчетов были приняты следующие допущения: 1) доля времени, которую человек проводит вне помещения в жилой зоне, распределена равномерно между огородом и двором; 2) двор в жилой зоне имеет земляное покрытие; 3) значения $DR(t)$ для жилого дома и рабочего помещения одинаковы; 4) значения T_{eco} для жилого дома и помещения в рабочей зоне одинаковы; 5) двор в рабочей зоне имеет твердое покрытие, и значения $DR(t)$ и T_{eco} равны таковым для других асфальтированных поверхностей.

Используем следующий алгоритм. Вычисляем нормированную месячную дозу внешнего облучения человека в точке времени t ($t = 0$ соответствует 1 июня 1998 г.):

$$E_i(t) = 10^{-3} \times 720 \times k \times \sum_j DR_j(t) \times p_{ij}, \quad (7)$$

где $E_i(t)$ – месячная доза внешнего облучения представителя i -й группы населения в момент времени t , нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(мЗв/месяц)/(МБк/м²)]; $DR_j(t)$ – мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в j -й локации в момент времени t , нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(нГр/ч)/(кБк/м²)]; p_{ij} – фактор поведения для представителя i -й группы населения в j -й локации (безразмерная величина); k – коэффициент перехода от поглощенной дозы в воздухе к эффективной дозе облучения человека (0,72 Зв/Гр [17]); 720 – количество часов в месяце; 10^{-3} – фактор перевода [(нГр/ч)/(кБк/м²)] в [(мГр/ч)/(МБк/м²)].

Значение мощности дозы в воздухе в каждой из локаций для интересующей нас точки времени t (например, 5 лет) вычисляем, используя значения T_{eco} из таблицы 3:

$$DR_j(t) = DR_j(0) \times \exp\left(-\frac{\ln 2 \times t}{T_{\text{eco}(j)}}\right), \quad (8)$$

где $DR_j(t)$ – мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в j -й локации в момент времени $t > 0$, нор-

мированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(нГр/ч)/(кБк/м²)]; $DR_i(0)$ – мощность поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в i -й локации в момент времени 0, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(нГр/ч)/(кБк/м²)]; $T_{eco(i)}$ – экологический период полууменьшения мощности поглощенной дозы гамма-излучения в воздухе в i -й локации (год); t – время, прошедшее от первого измерения в момент $t = 0$ (год).

По результатам расчетов были построены зависимости E_i от времени, прошедшего с момента времени $t = 0$ (рис. 2). Интервал между точками равен 1 году. Как видно из рисунка 2, динамику месячной эффективной дозы в летний период (июнь) для всех трех групп можно аппроксимировать одной экспонентой:

$$E_i(t) = E_i(0) \times \exp(-\lambda_{eco}^E \times t), \quad (9)$$

где $E_i(t)$ – месячная доза внешнего облучения представителя i -й группы населения в момент времени $t > 0$, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(мЗв/месяц)/(МБк/м²)]; $E_i(0)$ – месячная доза внешнего облучения представителя i -й группы населения в момент времени $t = 0$, нормированная на плотность загрязнения территории ^{137}Cs [(мЗв/месяц)/(МБк/м²)]; λ_{eco}^E – экологическая постоянная снижения эффективной дозы внешнего облучения (год⁻¹); t – время, прошедшее от первого измерения в момент $t = 0$ (год).

Значение экологического периода (год) полууменьшения эффективной дозы внешнего облучения (T_{eco}^E) вычисляем, используя выражение:

$$T_{eco}^E = \frac{\ln 2}{\lambda_{eco}^E}, \quad (10)$$

где λ_{eco}^E – экологическая постоянная снижения эффективной дозы внешнего облучения (год⁻¹).

Для группы 1 (работающие внутри помещений) группы 2 (работающие вне помещений) и пенсионеров значения T_{eco}^E оценены величиной 50, 54 и 49 лет соответственно. Округленное значение T_{eco}^E , равное 50 годам, может быть принято в качестве репрезентативной величины для взрослого населения, проживающего в деревянных домах в юго-западных районах Брянской области. Таким образом, в среднем скорость экологического уменьшения дозы внешнего облучения равна 1,4% в год. С учетом радиоактивного распада ^{137}Cs (2,3% в год) можно принять, что доза внешнего облучения населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться на 3,7% в год.

Выведенное нами значение скорости уменьшения эффективной дозы внешнего облучения сельского населения в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии (1998–2012 гг.) меньше, чем наиболее вероятное значение – 8% в год (при диапазоне 2–16% в год), предсказанное в работе Thornberg et al. [18] по результатам индивидуальных дозиметрических исследований, которые были выполнены в Брянской области в период 1990–2000 гг. Вместе с тем, наша усредненная оценка T_{eco}^E (50 лет) очень хорошо совпадает с оценкой, которая была ранее дана В.Ю. Голиковым [7] для медленной компоненты (50 лет) снижения эффективной дозы внешнего облучения взрослого человека по результатам индивидуального дозиметрического контроля, проведенного в двух сельских населенных пунктах Брянской области в 1991–2003 гг.

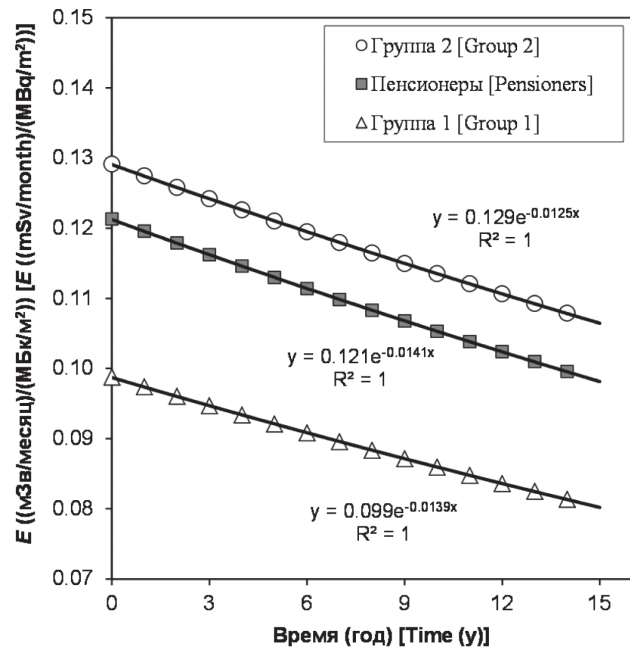


Рис. 2. Динамика месячной эффективной дозы внешнего облучения от ^{137}Cs (E) в летний период 1998–2012 гг., нормированной на плотность загрязнения территории ^{137}Cs , (мЗв/мес.)/(МБк/м²). Оценки приведены для трех групп взрослых жителей Брянской области: группа 1 (работающие преимущественно внутри помещений), группа 2 (работающие преимущественно вне помещений) и пенсионеры. Нулевая точка на оси времени соответствует 1 июня 1998 г.

[Fig. 2. Dynamics of the monthly effective external dose from ^{137}Cs (E) in the summer of 1998–2012, normalized to the density of contamination of the territory with ^{137}Cs , (mSv/month)/(MBq/m²). The estimates are given for three groups of adult residents of the Bryansk region: Group 1 (working mainly indoors), Group 2 (working mainly outdoors) and Pensioners. The zero point on the time axis corresponds to June 1, 1998]

Выводы

1. В период 1998–2012 гг. в типичных локациях сельских населенных пунктов Злынковского, Клинцовского и Новозыбковского районов Брянской области России были проведены мониторинговые измерения мощности дозы гамма-излучения в воздухе с использованием полевого гамма-спектрометра дозиметра. Для 103 точек наблюдения выполнена оценка скорости снижения мощности дозы гамма-излучения от ^{137}Cs .

2. Значения экологического периода полууменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе, вычисленные для отдельных точек, лежали в диапазоне от 14 до 320 лет, а для отдельных локаций составляли: 34 года (целинные участки почвы, расположенные вне н.п.), 30 лет (целинные участки почвы, расположенные внутри н.п.), 37 лет (леса), 93 года (пахотные поля), 99 лет (огороды), 33 года (прочие земляные поверхности), 45 лет (деревянные дома), 60 лет (асфальтированные поверхности).

3. Полученные значения скорости уменьшения мощности дозы гамма-излучения в воздухе в обследованных локациях были использованы для оценки значения экологического периода полууменьшения эффективной дозы внешнего облучения для сельского населения, которое

проживает в деревянных домах. В среднем оно оказалось равным 50 годам. С учетом радиоактивного распада ^{137}Cs можно ожидать, что доза внешнего облучения сельского населения от чернобыльского загрязнения будет снижаться примерно на 4% в год.

4. Полученные значения скорости снижения мощности дозы гамма-излучения в воздухе могут быть использованы для ретроспективной и проспективной оценки значений мощности эффективной дозы и накопленной дозы внешнего облучения сельского населения Брянской области России в отдаленном периоде после Чернобыльской аварии. При этом для вычисления годовых доз следует учитывать сезонные (зима/лето) вариации как мощности дозы гамма-излучения в воздухе, так и режима поведения человека.

Литература

- Golikov V.Yu., 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, No. 10. P. 185–193.
- Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т. 1. 488 с.
- Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Барковский А.Н., и др. Облучение населения Российской Федерации вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и основные направления дальнейшей работы на предстоящий период // *Радиационная гигиена*. 2014. Т. 7, № 4. С. 78–83.
- Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 66–74.
- Jacob P., Prohl G., Likhtarev I., Kovgan L., Gluvchinsky R., Perevoznikov O., et al. Pathway Analysis and Dose Distributions. European Commission, Brussels: 1996. EUR 16541 EN. 130 p.
- Ramzaev V., Yonehara H., Hille R., Barkovsky A., Mishine A., Sahoo S.K., 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.
- Golikov V.Yu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident // *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018. Vol. 11, No. 4. P. 39–50.
- Балонov М.И., Савкин М.Н., Питкевич В.А., и др. Средние эффективные накопленные дозы // *Радиация и риск*. 1999. Специальный выпуск. С. 1–125.
- Брук Г.Я., Балонov М.И., Голиков В.Ю., и др. Средние накопленные за 1986–2005 годы эффективные дозы облучения жителей населенных пунктов Брянской, Калужской, Орловской и Тульской областей Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению правительства Российской Федерации № 1582 от 18 декабря 1997 года «Об утверждении перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» // *Радиация и риск*. 2007. Т. 16, № 1. С. 3–73.
- Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., и др. Средние годовые эффективные дозы облучения в 2014 году жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС (для целей зонирования населенных пунктов) // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8, № 2. С. 32–128.
- Спектрометры-дозиметры гамма и рентгеновского излучения МКС-СК1 «СКИФ»: <https://all-pribors.ru/opisanie/19630-00-mks-sk1-skif-14822> (дата обращения: 09.11.2019 г.).
- 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.
- Рамзаев В.П., Голиков В.Ю. Сравнение расчетных и измеренных значений мощности кермы в воздухе над почвой, загрязненной ^{137}Cs // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8, № 4. С. 42–51.
- Ramzaev V., Barkovsky A., Mishine A., Andersson K.G. Decontamination tests in the recreational areas affected by the Chernobyl accident: efficiency of decontamination and long-term stability of the effects. *Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment*. 2013. Vol. 1, No. 2. P. 93–107. Available from: <http://khjosen.org/journal/FullText/Vol1/V1N2-RAMZAEV-full.pdf> (дата обращения: 12.12.2019 г.).
- Roed J., Lange C.L., Andersson K.G., et al. Decontamination in a Russian Settlement. Risø National Laboratory report Risø-R-870 (EN). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1996. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/053/27053487.pdf?r=1&r=1 (дата обращения: 12.12.2019 г.).
- 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.
- 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, No. 4. P. 375–382.
- Thornberg C., Vesanen R., Wallström E., et al. External and internal irradiation of a rural Bryansk (Russia) population from 1990 to 2000, following high deposition of radioactive caesium from the Chernobyl accident // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2005. Vol. 44, No. 2. P. 97–106.

Поступила: 15.12.2019 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

Для цитирования: 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

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

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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 aim of this study was to determine the dynamics of decrease of the dose rate of gamma radiation in air from ^{137}Cs in typical rural locations in the remote period after the Chernobyl accident. The dose rate measurements were performed in the areas of 15 settlements of the Zlynka, Klintsy and Novozybkov districts of the Bryansk region of Russia in the period 1998–2012. After the accident in 1986, the density of contamination of the territory with ^{137}Cs in all settlements was higher than the value of 555 kBq/m². Monitoring measurements of the dose rate were performed in eight locations commonly used in assessing the radiation doses to the rural population after the Chernobyl accident: 1) virgin soils (meadows) located outside settlements, 2) virgin soils located inside settlements, 3) forests, 4) arable fields, 5) kitchen gardens, 6) other ground surfaces (earthen yards next to residential buildings), 7) single-story wooden houses, 8) asphalted areas (streets, roads, court-yards next to residential buildings). The number of observation sites in individual locations ranged from 6 to 19 (a total of 103 sites). Series of measurements at individual sites were launched in the period 1998–2001 and completed in 2009–2012. On average, the duration of the series was 11.1 years. The measurements were made in the spring-autumn period annually (in some years at some sites two to three times a year) using a portable gamma-ray spectrometer-dosimeter. In the initial period of the study (1998–2001), the values of the absorbed dose rate in air from ^{137}Cs were in the range from 40 to 2020 nGy/h. The maximum values were recorded in virgin meadows and forests, and the minimum ones were observed inside houses and over asphalted surfaces. By the end of our series of observations (2009–2012), the dose rate decreased at all sites, by an average of 33% (range 6–64%). The values of the ecological period of half-reduction of the dose rate, calculated for individual sites, ranged from 14 to 320 years and averaged 34 years (virgin soils located outside settlements), 30 years (virgin soils located inside settlements), 37 years (forests), 93 years (arable fields), 99 years (kitchen gardens), 33 years (other earth surfaces), 45 years (wooden houses), 60 years (asphalted areas). The deduced values of the rate of decrease of the dose rate of gamma radiation in the air in the surveyed locations were used to estimate the ecological period of the half-reduction of the effective external dose for rural population living in wooden houses. On average, this period was equal to 50 years. Given the radioactive decay of ^{137}Cs , we can expect that the external dose from Chernobyl ^{137}Cs to the rural population will decrease by approximately 4% per year. Our estimate of the rate of decrease of the external effective dose from ^{137}Cs in the remote period after the Chernobyl accident is in agreement with the estimates that were previously given by other authors for the slow component of decreasing external doses from ^{137}Cs to adults living in rural settlements of the Bryansk region.

Key words: Chernobyl, ^{137}Cs , gamma radiation, absorbed dose rate in air, effective dose.

References

1. Golikov VYu, 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(10): 185–193.
2. Radiological and Hygienic Issues of the Mitigation of the Chernobyl NPP Accident Consequences. Eds.: Onishchenko GG, Popova AYU. St.-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev. 2016; 1. 448 p. (In Russian).
3. Bruk GYa, Bazyukin AB, Barkovsky AN, Bratilova AA, Vlasov AYU, Goncharova YuN, et al. The exposure for populations of the Russian Federation due to the Chernobyl accident and main directions of further work in the coming period.

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

- Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 78–83 (In Russian).
4. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Trends of development and prediction of the doses from the internal exposure of the public of the Russian Federation and its critical groups in the distant post-Chernobyl NPP accident period. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2) (Special issue): 66–74 (In Russian).
 5. Jacob P, Prohl G, Likhtarev I, Kovgan L, Gluvchinsky R, Perevoznikov O, et al. Pathway Analysis and Dose Distributions. European Commission, Brussels: 1996. EUR 16541 EN. 130 p.
 6. 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.
 7. Golikov VYu. Analysis of the long-term dynamics of external doses of the population after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2018;11(4): 39–50.
 8. Balonov MI, Savkin MN, Pitkevich VA, Schukina NV, Podleschuk VB, Ogorodnikova GV, et al. Mean effective cumulated doses. *Radiation and Risk*. 1999;(Special issue): 1–125 (In Russian).
 9. Bruk GYa, Balonov MI, Golikov VYu, Bazyukin AB, Romanovich IK, Shutov VN, et al. The average effective doses accumulated during 1986–2005 for the residents of the settlements of the Bryansk, Kaluga, Oryol and Tula regions of the Russian Federation, assigned to the zones of radioactive contamination by decree of the Government of the Russian Federation No. 1582 of December 18, 1997 "On approval of the list of settlements located in the boundaries of the zones of radioactive contamination due to the catastrophe at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation and Risk*. 2007;16(1): 3–73 (In Russian).
 10. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AYU, Goncharova YuN, 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), 2014. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2015;8(2): 32–128 (In Russian).
 11. MKS-SK1 «SKIF» x-ray and gamma radiation spectrometer-dosimeters. – Available from: <https://all-pribors.ru/opisanie/19630-00-mks-sk1-skif-14822> [Accessed 09 November 2019] (In Russian).
 12. 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 Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 6–20.
 13. Ramzaev VP, Golikov VYu. A comparison of measured and calculated values of air kerma rates from ^{137}Cs in soil. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 42–51 (In Russian).
 14. Ramzaev V, Barkovsky A, Mishine A, Andersson KG. Decontamination tests in the recreational areas affected by the Chernobyl accident: efficiency of decontamination and long-term stability of the effects. *Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment*. 2013;1(2): 93–107. Available from: <http://khjosen.org/journal/FullText/Vol1/V1N2-RAMZAEV-full.pdf> [Accessed 12 December 2019].
 15. Roed J, Lange CL, Andersson KG, Prip H, Olsen S, Ramzaev V, et al. Decontamination in a Russian Settlement. Risø National Laboratory report Risø-R-870 (EN). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark. 1996. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/053/27053487.pdf?r=1&r=1 [Accessed 12 December 2019].
 16. Bailiff IK, Slim HA. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry. *Radiation Measurements*. 2008;43: 859–863.
 17. 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(4): 375–382.
 18. Thornberg C, Vesanen R, Wallström E, Zvonova I, Zhesko T, Balonov M, et al. External and internal irradiation of a rural Bryansk (Russia) population from 1990 to 2000, following high deposition of radioactive caesium from the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2005;44(2): 97–106.

Received: December 15, 2019

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.

For citation: Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. 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 Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 38–46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-38-46

Результаты клинической апробации низкодозовых протоколов проведения цифровой линейной томографии органов грудной клетки

И.Г. Камышанская^{1,2}, В.М. Черемисин^{1,2}, А.В. Водоватов³, А.Н. Борискина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Городская Мариинская больница, Санкт-Петербург, Россия

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

Высокий уровень заболеваемости туберкулезом в Российской Федерации обуславливает широкое применение рентгеновских методов для его диагностики и оценки эффективности проводимого лечения. Традиционно для диагностики туберкулеза используются цифровая рентгенография и компьютерная томография. Оба данных метода обладают своими недостатками: низкая специфичность у рентгенографии; высокая стоимость, значительные дозы облучения пациентов и ограниченная доступность у компьютерной томографии. В качестве дополнительного метода для оценки эффективности лечения туберкулеза была предложена линейная томография, выполняемая на цифровых рентгеновских аппаратах. Целью данного исследования являлась оценка возможности использования цифровой линейной томографии для контроля эффективности лечения туберкулеза в рамках специализированного противотуберкулезного учреждения. Исследование было разделено на два этапа. В рамках первого этапа была выполнена оценка диагностического качества цифровых линейных томограмм, выполненных на перспективных низкодозовых протоколах. Данный этап был выполнен с использованием антропоморфного фантома грудной клетки и разработанных имитаторов легочных очагов. Качество изображения оценивалось экспертами по специально разработанным критериям. Было показано, что на всех низкодозовых протоколах обеспечивается как минимум удовлетворительное качество изображения, что позволило использовать низкодозовые протоколы для клинической апробации на базе противотуберкулезного диспансера. На втором этапе исследования были оценены структура исследований, дозы облучения пациентов и качество линейных томограмм в рамках проспективного когортного исследования. Были отобраны две выборки пациентов, однородные по половозрастному составу, антропометрическим характеристикам и структуре диагнозов. Одна из выборок была диагностирована с использованием стандартных протоколов линейной томографии; вторая — с использованием предложенных низкодозовых протоколов. Для каждого пациента были определены дозы за одну линейную томограмму и за все исследование (измерено произведение дозы на площадь, рассчитана эффективная доза); выполнена экспертная оценка качества томограмм. Результаты второго этапа исследования показали, что переход на низкодозовые протоколы позволяет снизить эффективные дозы пациентов за все исследование вплоть до 6–8 раз (0,56–5,9 мЗв на стандартных протоколах; 0,2–1,15 мЗв на низкодозовых протоколах), что главным образом обуславливается использованием низких значений экспозиции (126 мАс и 11 мАс соответственно). При этом достоверно снижается диагностическое качество полученных томограмм (с хорошего/отличного до удовлетворительного), что не сказывается на возможности их описания и выявлении патологий. Результаты исследования показали, что цифровую линейную томографию можно применять для оценки динамики патологического процесса в легких в том случае, когда локализация патологии уже известна. Представленные низкодозовые протоколы внедрены в практику противотуберкулезного диспансера. В настоящее время рассматривается возможность проведения более крупномасштабного исследования на базе нескольких медицинских организаций, в том числе многопрофильных стационаров.

Ключевые слова: цифровая линейная томография, туберкулез, эффективная доза, оптимизация, оценка качества диагностического изображения.

Водоватов Александр Валерьевич

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

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vodovattoff@gmail.com

Введение

Туберкулез (ТБ) занимает девятое место среди ведущих причин смертности в мире и находится на первом месте среди причин смерти от какого-либо одного возбудителя инфекции, опережая ВИЧ, так как пациенты с ВИЧ-инфекцией чаще погибают именно от ТБ [1]. Около трети населения Земли инфицировано микобактериями туберкулеза (МБТ). По данным Всемирной организации здравоохранения, в мире ежегодно заболевают ТБ 8–10 млн человек (около 140 на 100 тыс. населения), из них 4–5 млн открытыми формами [2–6]. В России на 2015 г. заболеваемость ТБ составила 115 тыс. человек (80 на 100 тыс. населения), при этом по распространенности ТБ с множественной лекарственной устойчивостью и ТБ с устойчивостью к рифампицину среди новых случаев заболевания наша страна вошла в тройку лидеров, наряду с Китаем и Индией. 93% новых случаев и рецидивов – ТБ с легочной локализацией [3–5].

Проблематика диагностики и лечения ТБ усугубляется постоянной мутацией МБТ и распространением штаммов, устойчивых к противотуберкулезной терапии [1–5]. Начальные формы туберкулеза протекают бессимптомно, что приводит к необходимости активного скрининга населения и выявления туберкулеза не только в специализированных диспансерах, но и в других медицинских организациях [1, 2].

В соответствии с Федеральными клиническими рекомендациями по диагностике и лечению туберкулеза органов дыхания¹ от 2014 г. процесс диагностики туберкулеза у взрослых включает несколько этапов:

1. Отбор лиц с различными заболеваниями легких среди больных, обратившихся за медицинской помощью в учреждения первичной медико-санитарной помощи. К данной категории относятся лица с рентгенологическими изменениями, подозрительными на туберкулез, при прохождении ежегодной флюорографии (ФГ) и лица с жалобами, подозрительными на туберкулез (кашель более 3 недель, кровохарканье, субфебрильная температура более 2 недель).

2. Дообследование: 3-кратное исследование мокроты на наличие кислотоустойчивых микобактерий и обзорная рентгенография органов грудной клетки.

3. Обследование в учреждениях противотуберкулезной службы.

Лечение туберкулеза длится от 6 месяцев (I режим противотуберкулезной химиотерапии) до 18 месяцев (IV, V режимы). Во время интенсивной фазы лечения необ-

ходимо выполнять рентгенографию ОГК 1 раз в 2 месяца, в фазе продолжения лечения – каждые 3 месяца². Во время периодических рентгенографий оценивают ответ пациента на лечение: увеличение зон инфильтрации, размеров полостей, появление полостей распада с новыми очагами отсева, гидроторакса говорят о негативной динамике процесса в легких и необходимости смены режима терапии.

В настоящее время для диагностики патологий респираторной системы, в том числе туберкулеза, применяется аналоговая и цифровая рентгенография (РГ) и компьютерная томография (КТ). РГ является наиболее распространенным методом исследования за счет низкой стоимости рентгеновских снимков, особенно цифровых, и широкой доступности. При этом дозы облучения пациентов находятся в диапазоне 0,05–0,5 мЗв за одно исследование [7–9]. Однако ЦРГ обладает недостаточной диагностической эффективностью для поиска мелких очаговых образований либо небольших полостей destruction в легких [10–13].

КТ позволяет уточнить структуру и распространенность патологического процесса в паренхиме легких. Высокая чувствительность КТ к градиентам плотности позволяет отчетливо визуализировать практически все анатомические структуры, а также дифференцировать патологические очаги по плотности, определять наличие включений (жировых, полостей распада, наличие жидкости) [8, 14, 15]. Однако КТ-исследования ассоциированы со значительными дозами облучения пациентов (5–20 мЗв за исследование) [16]. Доступность КТ также может быть ограничена, особенно в регионах и/или небольших медицинских организациях.

В качестве альтернативного метода для диагностики патологий респираторной системы может быть использована линейная томография. Линейная томография – метод рентгенологического исследования, с помощью которого можно производить снимок слоя, лежащего на определенной глубине исследуемого объекта [17, 18]. Её выполняют как дополнительный, уточняющий метод лучевой диагностики для более детального исследования легочных полей в тех случаях, когда нет возможности провести компьютерную томографию (КТ) [17, 18]. Линейная томография входит в перечень обязательного диагностического минимума при диагностике туберкулеза легких³.

Достоинством линейной томографии в сравнении с традиционной рентгенографией ОГК является нивелирование эффекта суммации получаемого изображения.

¹ Федеральные клинические рекомендации по диагностике и лечению туберкулеза органов дыхания, 2014 г.: http://roftb.ru/netcat_files/doks2015/rec3.pdf (Дата обращения: 19.02.2020)

[Federal clinical recommendations on the diagnostics and treatment of the tuberculosis of the respiratory organs. 2014. Available from: http://roftb.ru/netcat_files/doks2015/rec3.pdf (Accessed: 19.02.2020)]

² Федеральные клинические рекомендации по диагностике и лечению туберкулеза органов дыхания с множественной и широкой лекарственной устойчивостью возбудителя, издание 3-е.: http://roftb.ru/netcat_files/doks2015/rec2018.pdf (Дата обращения: 19.02.2020)

[Federal clinical recommendations on the diagnostics and treatment of the multi- and extensively drug-resistant tuberculosis of the respiratory organs. 3d edition. Available from: http://roftb.ru/netcat_files/doks2015/rec2018.pdf (Accessed: 19.02.2020)]

³ Федеральные клинические рекомендации по диагностике и лечению туберкулеза органов дыхания, 2014 г.: http://roftb.ru/netcat_files/doks2015/rec3.pdf (Дата обращения: 19.02.2020)

Federal clinical recommendations on the diagnostics and treatment of the tuberculosis of the respiratory organs. 2014. Available from: http://roftb.ru/netcat_files/doks2015/rec3.pdf (Accessed: 19.02.2020)]

Это особенно важно при исследовании органов грудной полости в связи с достаточно трудной сканологической картиной данной анатомической области. Основным недостатком ЛТ являются низкие пространственное разрешение и контраст изображений за счет артефактов, возникающих при движении рентгеновской трубки [17, 18]. Однако внедрение современных цифровых приемников изображения (плоские панели непрямого преобразования) и современных методов цифровой обработки рентгеновских изображений позволяет существенно повысить диагностическое качество изображения. К сожалению, линейная томография, выполняемая на цифровом рентгеновском оборудовании (ЦЛТ), мало описана в современных отечественных и зарубежных публикациях.

ЦЛТ является широко доступным методом, так как большинство современных отечественных цифровых рентгеновских аппаратов снабжены приставкой для линейной томографии. Целесообразно оценить возможности применения ЦЛТ ОГК для оценки динамики лечения туберкулеза. Данный метод ассоциирован с существенно меньшими дозами облучения пациентов по сравнению с КТ и более высоким качеством изображения по сравнению с рентгенографией. При этом необходимо использовать протоколы проведения ЦЛТ, оптимальные по соотношению доза облучения пациента – диагностическое качество изображения.

Цель исследования – оценка возможности использования цифровой линейной томографии для контроля эффективности лечения туберкулеза. Для этого были разработаны низкодозовые протоколы проведения ЦЛТ органов грудной клетки, выполнена оценка их диагностического качества изображения и проведено проспективное исследование на базе туберкулезного диспансера.

Материалы и методы

Исследование проводилось на базе рентгеновских отделений Городской Мариинской больницы и Городского противотуберкулезного диспансера. В Мариинской больнице была выполнена экспериментальная часть работы с использованием антропоморфного фантома грудной клетки. На базе противотуберкулезного диспансера была выполнена клиническая часть работы – проспективный этап исследования по апробации предложенных оптимизированных протоколов ЦЛТ.

В обеих медицинских организациях ЦЛТ проводилась на цифровых рентгенодиагностических аппаратах (ЗАО «НИПК «Электрон», Россия). Основные технические характеристики данных аппаратов представлены в таблице 1.

Для оценки качества изображения были использованы следующие экспериментальные низкодозовые протоколы (табл. 2), разработанные авторами ранее [19, 20].

Технические характеристики рентгеновских аппаратов

Таблица 1

[Table 1]

Характеристика оборудования [Equipment data]	Медицинская организация [Hospital]	
	Мариинская больница [Mariinsky hospital]	Противотуберкулезный диспансер [Antitubercular early treatment center]
Марка аппарата [Type of X-ray unit]	«АПЦ – Эксперт» (АПЦ) [“ARC-Expert” (ARC)]	«КРД – Эксперт» (КРД) [“KRD-Expert” (KRD)]
Тип приемника изображения [Type of detector]	Цифровой, плоская панель непрямого преобразования (Csl + аморфный Si) [Digital, indirect flat-panel (Csl + amorphous Si)]	Цифровой, ПЗС-матрица [Digital, CCD-matrix]
Характеристики раstra [Grid characteristics]	90 линий на см; R 12:1; F=100 см [90 lines/cm; R 12:1; F=100 cm]	70 линий на см; R 6:1; F = 100 см [70 lines/cm; R 6:1; F = 100 cm]
Наличие дозиметра [Type of dosimeter]	ДРК-1м (ООО «НПП «ДОЗА», Россия) [DRK-1m (JSC “NPP “DOZA”, Russia)]	ДРК-1 (ООО «НПП «ДОЗА», Россия) [DRK-1 (JSC “NPP “DOZA”, Russia)]
Расстояние источник – приемник [Focal-image distance]	100 см [100 cm]	
Проекция облучения [Projection]	Передне-задняя (ПЗ) [Anterior-posterior (AP)]	Передне-задняя (ПЗ) [Anterior-posterior (AP)]
Толщина и материал использованного фильтра [Thickness and material of the filter]	5 мм алюминия [5 mm Al]	
Размер поля облучения на приемнике [Irradiation field size on the detector]	40×40 см [40×40 cm]	

Таблица 2

Оптимизированные протоколы цифровой линейной томографии

[Table 2]

Optimized digital linear tomography protocols]

Телосложение пациента [Types of constitution]	Анодное напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	Сила тока, мА [Tube current, mA]	Максимальное время экспозиции, мс [Maximum exposure time, ms]	Угол отклонения трубки, ° [Tomographic angle, °]	Время движения трубки, с [Tube movement time, s]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]
Нормостеник ИМТ 18,5–25 кг/м ² [Normosthenic BMI 18.5–25 kg/m ²]	60	10	4000	15°	0,8	0,03
	–	–	–	25°	1,3	0,05
	–	–	–	40°	2	0,08
Гиперстеник ИМТ > 25 кг/м ² [Hypersthenic BMI > 25 kg/m ²]	65	10	4000	15°	0,8	0,04
	–	–	–	25°	1,3	0,08
	–	–	–	40°	2	0,095
Гипостеник ИМТ < 18,5 кг/м ² [Hyposthenic BMI < 18.5 kg/m ²]	55	10	4000	15°	0,8	0,03
	–	–	–	25°	1,3	0,04
	–	–	–	40°	2	0,05

Оценка влияния параметров проведения ЦЛТ ОГК на качество изображения проводили с использованием антропоморфного фантома грудной клетки Kyoto (Kyoto Kagaku Co, Япония): Multipurpose Chest Phantom N1 "Lungman". Данный фантом имитирует бронхиальное дерево, легочную паренхиму и органы средостения. Плотность костных структур и мягких тканей фантома соответствуют органам средостения. В ходе эксперимента антропоморфный фантом располагался

в стандартном для пациента положении на деке стола (рис. 1).

Оценка визуализации патологических изменений в легочной паренхиме на различных режимах исследования ЦЛТ проводилась с использованием специально разработанных имитаторов очагов различной плотности (имитаторов) [21]. Характеристики имитаторов представлены в таблице 3.



а



б

Рис. 1. Проведение ЦЛТ: а) расположение фантома в ходе проведения ЦЛТ; б) пример цифровой линейной томограммы антропоморфного фантома

[Fig. 1. a) positioning of the phantom on the table for the digital linear tomography; b) an example of the digital linear tomography of the anthropomorphic phantom]

Характеристики имитаторов очаговых образований

Таблица 3

[Table 3]

Characteristics of the imitators of the nodules

Характеристика очага [Type of nodule]	Плотность*, ед. Хаунсфилда [Density*, Hounsfield units]	Материал [Material]	Размер, мм [Nodule size, mm]	Контур [Contour]	№ п/п
Солидный [Solid]	+50 ... +90	Силикон [Silicone]	4, 10	Ровный, четкий [smooth, sharp]	2, 5
Полусолидный [Semi-solid]	-650 ... -800	Бинт, пропитанный клеем ПВА [Compressed medical bandage stained with PVA glue]	7, 10	Неровный, нечеткий [Rough, unsharp]	1, 8
«Матовое стекло» [“Ground-glass” opacity]	-600 ... -800	Медицинский бинт [Compressed medical bandage]	5, 9	Неровный, нечеткий [Rough, unsharp]	3, 6
Обызвествленный [Calcinated]	+250 ... +400	Мел [Chalk]	5, 6	Неровный, четкий [Rough, sharp]	4, 7

* Оценка плотности проводилась для очагов, уже размещенных внутри легочной паренхимы антропоморфного фантома грудной клетки [Assessment of the density was performed for the imitators positioned inside the lung parenchyma of the anthropomorphic chest phantom].

На рисунке 2 представлен внешний вид очагов и их рентгеновское изображение, полученное при следующих параметрах исследования: напряжение – 70 кВ, экспозиция – 19 мАс.

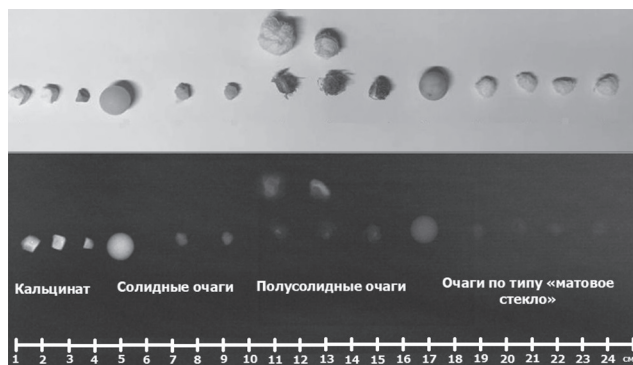


Рис. 2. Внешний вид и рентгеновское изображение имитаторов очагов

[Fig. 2. Layout and conventional X-ray image of the imitators of the nodules]

В ходе эксперимента 8 имитаторов различной плотности были размещены в среднем отделе грудной клетки антропоморфного фантома на расстоянии 10 ± 2 см от задней стенки фантома таким образом, что каждый вид очага аналогичной плотности был размещен в правом и левом легочном поле. На рисунке 3 представлен пример линейной томограммы фантома с отмеченными очаговыми образованиями в легочной паренхиме.

Перспективный сбор данных осуществлялся с февраля по апрель 2019 г. на базе рентгеновского кабинета противотуберкулезного диспансера (см. табл. 1). Всем пациентам с установленным и подтвержденным диагно-



Рис. 3. Расположение имитаторов очагов в фантоме:

1, 8 – полусолидные очаги, 2, 5 – солидные очаги, 3, 6 – очаги по типу «матового стекла», 4, 7 – кальцинированные очаги

[Fig. 3. Localization of the imitators in the phantom.

№ 1, 8 – semi-solid nodules, № 2, 5 – solid nodules, № 3, 6 – “ground glass” nodules, № 4, 7 – calcinated nodules]

зом «туберкулез» выполнялась ЦЛТ с периодичностью 1 раз в 2 месяца для оценки динамики заболевания.

Всего в выборку вошло 74 пациента в возрасте от 22 до 84 лет (средний возраст 45 ± 13 лет), которые были разделены на 2 группы:

– первая группа – 44 пациента, которым была выполнена ЦЛТ на стандартных (табл. 4) протоколах

исследования (4 гипостеника, 12 гиперстеников, 28 нормостеников);

– вторая группа – 30 человек, которым была выполнена ЦЛТ на предложенных низкодозовых протоколах (4 гипостеника, 8 гиперстеников, 18 нормостеников).

Антропометрические характеристики для выборок пациентов представлены в таблице 5.

Для каждого пациента фиксировались: структура исследования (число выполненных рентгеновских снимков и ЦЛТ), параметры проведения рентгеногра-

Таблица 4

Параметры проведения исследования для двух выборок пациентов. Данные представлены в формате: среднее $\pm$ стандартное квадратичное отклонение, диапазон выборки

[Table 4]

Imaging protocols and patient doses for both patient samples. Data is presented as: mean $\pm$ SD, min-max]

Параметр [Parameter]	Стандартные режимы ЦЛТ [Standard protocols of digital linear tomography]		Оптимизированные режимы ЦЛТ [Optimized protocols of digital linear tomography]			
	Мужчины [male]	Женщины [female]	Мужчины [male]	Женщины [female]	Мужчины [male]	Женщины [female]
Напряжение, кВ [Tube voltage, kV]	56,9 $\pm$ 2 (50–63)	56,9 $\pm$ 2,6 (51–62)	56,9 $\pm$ 2 (50–63)	56,5 $\pm$ 3,9 (50–60)	58,7 $\pm$ 4 (54–65)	57,2 $\pm$ 3,9 (50–65)
Экспозиция, мАс [Tube current-time product, mAs]	114,8 $\pm$ 27,7 (49–127)	118 $\pm$ 24,3 (49–127)	115,5 $\pm$ 26,7 (49–127)	13,9 $\pm$ 11,6 (7–48)	10,2 $\pm$ 2,9 (7–17)	12,7 $\pm$ 9,8 (7–48)
Время движения трубки, с [Tube movement time, s]	1,8 $\pm$ 0,4 (0,8–3)	1,8 $\pm$ 0,4 (0,8–2)	1 $\pm$ 0,4 (0,8–3)	1,2 $\pm$ 0,4 (0,8–1,2)	1,2 $\pm$ 0,4 (0,8–1,2)	1,2 $\pm$ 0,4 (0,8–1,2)
Количество ЛТ [Number of linear tomograms]	6 $\pm$ 2 (1–9)	7 $\pm$ 2 (3–9)	6 $\pm$ 2 (1–9)	7 $\pm$ 2 (6–11)	6 $\pm$ 1 (6–8)	7 $\pm$ 1 (6–11)
ПДП за 1 ЦЛТ, сГр $\times$ см ² [DAP per 1 tomogram, cGy $\times$ cm ²]	231 $\pm$ 88 (134–483)	217 $\pm$ 83 (103–365)	228 $\pm$ 86 (103–483)	33 $\pm$ 19 (20–106)	33 $\pm$ 16 (18–75)	33 $\pm$ 18 (18–107)
ПДП за исследование, сГр $\times$ см ² [DAP per examination, cGy $\times$ cm ²]	1275 $\pm$ 452 (339–2190)	1627 $\pm$ 918 (310–3285)	1355 $\pm$ 596 (310–3285)	219 $\pm$ 108 (120–639)	211,9 $\pm$ 119 (108–525)	217 $\pm$ 110 (108–639)
ЭД за 1 ЦЛТ, мЗв [Effective dose per 1 tomogram, mSv]	0,4 $\pm$ 0,2 (0,2–0,9)	0,39 $\pm$ 0,15 (0,19–0,66)	0,4 $\pm$ 0,15 (0,18–0,87)	0,05 $\pm$ 0,03 (0,03–0,2)	0,06 $\pm$ 0,03 (0,03–0,14)	0,05 $\pm$ 0,03 (0,03–0,19)
ЭД за исследование, мЗв [Effective dose per examination, mSv]	2,3 $\pm$ 0,8 (0,6–3,9)	2,9 $\pm$ 1,6 (0,5–5,9)	2,4 $\pm$ 1 (0,56–5,9)	0,4 $\pm$ 0,2 (0,2–1,2)	0,4 $\pm$ 0,2 (0,2–0,9)	0,4 $\pm$ 0,2 (0,2–1,15)

Таблица 5

Антропометрические характеристики для выборки пациентов. Данные представлены в формате: среднее $\pm$ стандартное квадратичное отклонение, диапазон выборки

[Table 5]

Anthropometric characteristics of the patient samples. Data is presented as: mean $\pm$ SD, min-max]

Параметр [Parameter]	Стандартные режимы ЦЛТ [Standard protocols of digital linear tomography]			Оптимизированные режимы ЦЛТ [Optimized protocols of digital linear tomography]		
	Мужчины [male]	Женщины [female]	Вся выборка [total sample]	Мужчины [male]	Женщины [female]	Вся выборка [total sample]
Количество пациентов, чел. [Number of patients]	34 (77%)	10 (23%)	44 (59%)	21 (68%)	10 (32%)	30 (41%)
Возраст, лет [Age, years]	41,6 $\pm$ 9,6 (22–62)	50,4 $\pm$ 15,3 (32–82)	44 $\pm$ 11 (22–82)	47,9 $\pm$ 11 (35–72)	47 $\pm$ 21 (27–84)	48 $\pm$ 15 (27–84)
Рост, см [Height, cm]	173 $\pm$ 4 (170–178)	158 $\pm$ 2 (156–160)	169 $\pm$ 8 (156–178)	173 $\pm$ 5 (162–182)	163 $\pm$ 7 (150–170)	170 $\pm$ 7 (150–182)
Масса тела, кг [Body mass, kg]	73 $\pm$ 13 (52–85)	78 $\pm$ 14,5 (64–93)	72 $\pm$ 11 (52–85)	63 $\pm$ 11 (40–88)	70 $\pm$ 16,6 (49–95)	65 $\pm$ 13 (40–95)
ИМТ, кг/м ² [BMI, kg/m ²]	24 $\pm$ 4,5 (17,3–27,7)	31,2 $\pm$ 5 (26,3–36,3)	25,5 $\pm$ 4,5 (17,4–30,8)	21 $\pm$ 3,6 (13,8–27,7)	26,4 $\pm$ 6,9 (19–39)	22,8 $\pm$ 5,5 (13,8–39,1)

фии и ЦЛТ ОГК, ПДП за каждый рентгеновский снимок и ЛТ. ПДП измерялось с использованием поверенного клинического дозиметра ДРК-1, интегрированного в рентгеновский аппарат. Глубина томографического слоя определялась рентгенолаборантом индивидуально для каждого пациента с учетом предыдущих томографических исследований.

Параметры проведения ЦЛТ и измеренное ПДП для каждого пациента фиксировали вручную с использованием специальных анкет. Оценка ЭД пациентов при ЦЛТ производилась с использованием следующих специально разработанных коэффициентов перехода от произведения дозы на площадь к эффективной дозе ($\text{мкЗв/сГр} \times \text{см}^2$): 50 кВ – 1,5; 55 кВ – 1,6; 60 кВ – 1,8; 65 кВ – 1,9; 70 кВ – 2,0. Методика определения коэффициентов перехода представлена в [19].

Цифровые рентгенограммы и ЦЛТ для каждого пациента записывались в формате DICOM и после предварительной анонимизации использовались для экспертной оценки качества изображения и верификации собранных данных.

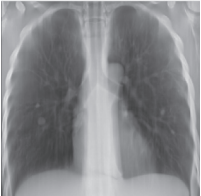
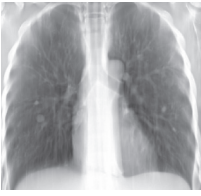
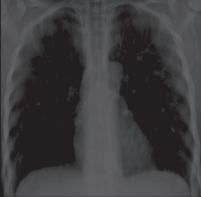
Для экспертной оценки качества полученных ЦЛТ фантома и пациентов были привлечены 6 экспертов-рентгенологов с опытом работы с ЦЛТ от 3 до 15 лет. Врачи были проинформированы о том, как выглядят структура антропоморфного фантома и имитаторы очагов на ЦЛТ и что режимы отличаются напряжением на рентгеновской трубке, углом отклонения трубки и временем сканирования. Экспертами оценивалась возможность визуализировать патологические очаги в легочной паренхиме и оценка изображения по шкале Лайкерта (5-балльная шкала) и субъективно оценить изображения (табл. 6) [21]. Итоговая оценка изобра-

Таблица 6

Критерии оценки качества томографических изображений

[Table 6]

Criteria for the assessment of the tomographic image quality

Образец томографического изображения [Example of the image]	Балл оценки качества изображения [Image quality points]	Качество изображения [Descriptive characteristic]	Визуализация нормальной анатомии фантома [Display of the normal anatomy of the phantom]	Визуализация патологических изменений [Display of the pathologies]	Наличие артефактов [Presence of the artifacts]
	5	Отличное [Excellent]	Максимально четко отображена [Maximally sharp display]	Выявление не вызывает затруднений [Easy detection of the pathologies]	Отсутствуют [Absent]
	4	Хорошее [Good]	Нормальное отображение [Normal display]	Отчетливая визуализация [Sharp and contrast display]	Минимальный уровень (1 на снимок) [Minimal level (1 per image)]
	3	Удовлетворительное [Acceptable]	Визуализация достаточно отчетлива [Acceptably sharp display]	Визуализация достаточно отчетлива [Acceptably sharp display]	Допустимый уровень (2–3 на снимок) [Acceptable level (2–3 per image)]
	2	Неудовлетворительное [Unsatisfactory]	Невозможно визуализировать отдельные мелкие структуры [Impossible to depict single small structures]	Выявление затруднительно [Complicated detection of the pathologies]	Высокий уровень шума; больше 3 артефактов на снимок [High level of noise, more than 3 artifacts per image]
	1	Плохое [Bad]	Невозможно визуализировать крупные анатомические структуры [Impossible to depict large anatomical structures]	Выявление невозможно [Impossible detection of the pathologies]	Выраженные артефакты, высокий уровень шума [High level of noise, multiple major artifacts]

жения производилась по самой низкой оценке для каждого из представленных критериев. Результаты экспертной оценки фиксировались в специально разработанные анкеты и в дальнейшем подвергались статистической обработке.

Работа с изображениями проводилась на стандартной рабочей станции врача-рентгенолога на каждом из рентгеновских аппаратов. Оценка качества изображения проводилась на диагностических мониторах (NEC MD21GS-2MP-BB, диагональ 21 дюйм, разрешение 3000×3000 пикселей), откалиброванных поставщиком рентгеновского оборудования. Работа с изображениями производилась в стандартных для данного рентгеновского кабинета условиях. Экспертам разрешалось использовать стандартные программы цифровой постобработки изображений.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием программного обеспечения Statistica X. Для описания выборок пациентов использовали методы параметрической и непараметрической статистики. Для описания категориальных данных считали абсолютные частоты и проценты от общего количества наблюдений. Для сравнения выборок данных использовали непараметрический критерий Манна – Уитни (для сравнения двух независимых, ненормально распределенных выборок), причём различия считались статистически достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Оценка качества изображений антропоморфного фантома

На рисунке 4 представлены результаты оценки качества изображений с использованием протоколов ЦЛТ для нормостеников (см. табл. 2), в связи с тем, что антропоморфный фантом соответствует нормально-

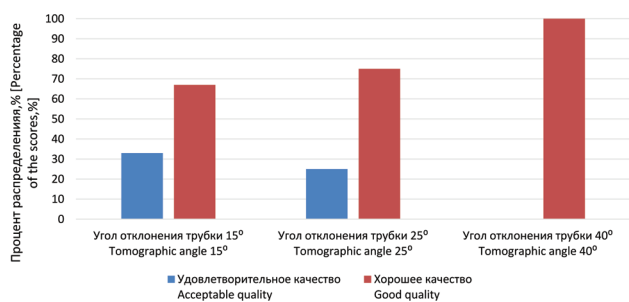


Рис. 4. Распределение балльной оценки качества изображений антропоморфного фантома с использованием низкодозовых протоколов для нормостеников

[Fig. 4. Distribution of the image quality scores for the low-dose protocols for the normosthenic constitution. Results are presented for the anthropomorphic phantom]

му среднему телосложению пациента. Как следует из рисунка 4, все полученные ЛТ обладали как минимум удовлетворительным качеством изображения и были пригодны для визуализации и описания патологии, то есть пригодны для использования в клинической практике. Отсутствие максимальных оценок обусловлено тем, что никто из экспертов не смог определить на ЛТ очаги по типу «матовое стекло» и полусолидный очаг диаметром 4 мм (очаги 1, 3 и 6 на рисунке 3). Тенденция к улучшению качества изображения с увеличением угла отклонения рентгеновской трубки объясняется увеличением пространственного разрешения и контрастности изображений [22, 23].

По результатам оценки качества изображений антропоморфного фантома представленные в таблице 2 протоколы были переданы для клинической апробации в противотуберкулезный диспансер.

Сравнительная оценка доз облучения пациентов, структуры ЦЛТ и диагностического качества изображения для выборок пациентов

Общие сведения о параметрах проведения ЦЛТ для выборок пациентов, обследованных на стандартных и низкодозовых протоколах (см. табл. 2), представлены в таблице 4. Распределение рентгенологических заключений представлено в таблице 7.

Как следует из таблицы 7, обе выборки пациентов однородны по структуре проявления ТБ; достоверные различия отсутствуют.

При использовании низкодозовых протоколов проведения ЦЛТ наблюдается значимое снижение ПДП (см. табл. 4) вплоть до 6 раз, как за 1 ЦЛТ, так и за серию томограмм (все исследование). ЭД за все исследование на стандартных протоколах исследования сопоставима с дозами при КТ органов грудной клетки [21]. Переход на использование низкодозовых режимов приводит к снижению ЭД за исследование вплоть до 6 раз по сравнению со стандартными режимами; за 1 ЦЛТ – до 8 раз. Для таких протоколов ЭД за исследование составила $0,4 \pm 0,2$ мЗв, что сопоставимо с ЭД при рентгенографии ОГК в двух проекциях [7].

Следует отметить, что в отдельных случаях использование низкодозовых протоколов ЦЛТ приводило к увеличению количества серий числа ЦЛТ в исследовании с 6 до 9–11 (см. табл. 4) при снижении ПДП и ЭД, как за 1 томограмму, так и за исследование.

Данное увеличение числа ЦЛТ в исследовании обусловлено двумя факторами. Во-первых, достигнутое снижение доз облучения пациентов за исследование позволяло выполнять большее количество томограмм без дополнительного облучения пациента. Во-вторых, часть томограмм, полученных на новых протоколах, не всегда устраивали врачей-рентгенологов, привыкших к переэкспонированным изображениям, что обуславливало повторное проведение ЦЛТ на стандартных для диспансера, более высокодозовых режимах.

Результаты оценки качества клинических изображений представлены на рисунках 5 и 6.

Таблица 7

Распределения рентгенологических заключений пациентов

[Table 7]

Distribution of the radiological conclusions for the patient samples

Рентгенологическое заключение [radiological conclusion]	Стандартный протокол [Standard protocol]		Оптимизированный протокол [Optimized protocol]	
	Количество человек [Number of patients]	%	Количество человек [Number of patients]	%
Инфильтративные затемнения, фокусы, множественные очаги [Infiltrative shadows, Focuses, Multiple nodules]	16	36	12	40
Фиброзно-кавернозный ТБ: полости деструкции, тяжистая деформация легочного рисунка (фиброз) [Fibrous cavernous tuberculosis, Destruction cavities, Fibrosis]	16	36	11	37
Очаговые изменения [Multiple nodule changes]	3	7	2	7
Диссеминированный ТБ [Disseminated tuberculosis]	2	5	2	7
Цирротический ТБ [Cirrhotic tuberculosis]	3	7	2	6
Посттуберкулезные изменения [Post-tubercular changes]	4	9	1	3

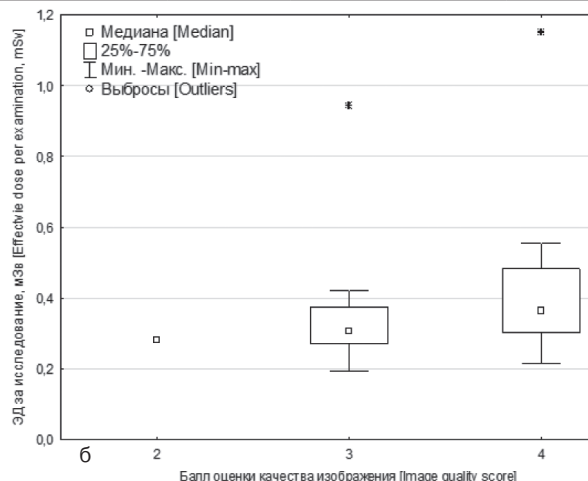
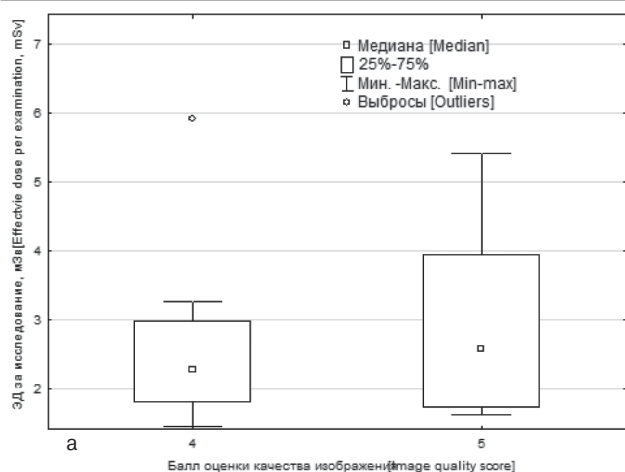


Рис. 5. Распределение оценок качества изображения по ЭД за исследование: а) на стандартных протоколах; б) на низкодозовых протоколах

[Fig. 5. Distribution of the image quality scores by the effective dose per examination: a) for standard protocols; b) for low-dose protocols]

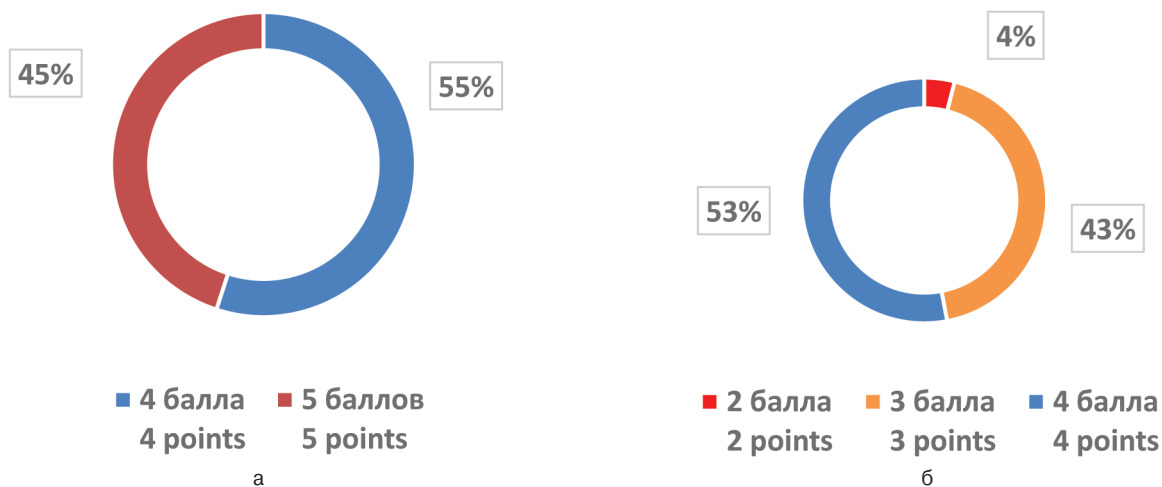


Рис. 6. Распределение балльной оценки качества изображений, полученных на: а) стандартных протоколах; б) оптимизированных протоколах

[Fig. 6. Distribution of image scores: a) for standard protocols; b) for low-dose protocols]

Результаты оценки всех ЦЛТ проверялись на наличие статистически значимых различий с использованием критерия Краскелла – Уоллиса. Статистически достоверных различий между оценками ЦЛТ, выполненными различными экспертами, получено не было; результаты оценки были однородными. Таким образом, для сравнения выборок ЦЛТ, выполненных на стандартных и оптимизированных протоколах, использовались средневзвешенные оценки для всех экспертов.

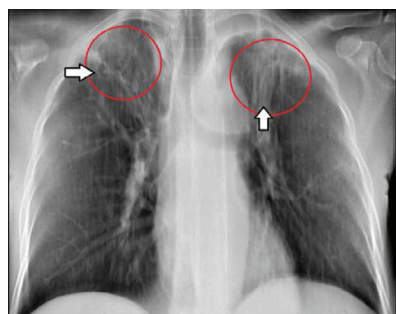
Как следует из данных, представленных на рисунках 7 и 8, на стандартных протоколах экспертная оценка качества изображений находится в диапазоне 4–5 баллов, на низкодозовых протоколах – 2–4 балла. Таким образом, снижение ЭД приводит также к достоверному снижению диагностического качества полученных изображений. Тем не менее, все исследования, за исключением одного, получили оценки 3–4 балла (удовлетворительное/хорошее изображение, см. табл. 6) и были пригодны для описания.

Пример клинического случая, в котором были использованы одновременно стандартные и оптимизированные протоколы исследования, представлен на рисунке 7. Пациент К., 49 лет, вес 52 кг, рост 173 см. На томограммах в бифуркационном срезе (90 мм), выполненных в разных режимах, в верхней доле правого и левого лёгкого одинаково чётко дифференцируются инфильтративные изменения с участками деструкции обоих лёгких в области верхушек лёгких. Однако ЭД на стандартных режимах исследования составила 2,72 мЗв, а на оптимизированных – 0,56 мЗв (в 5 раз ниже).

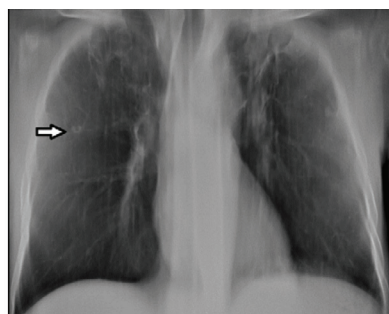
Как следует из рисунка 7, достоверные различия в диагностическом качестве изображений между стандартными и низкодозовыми протоколами отсутствуют; патологические изменения одинаково чётко визуализируются.

Практически все изображения, полученные на предложенных низкодозовых протоколах, были приемлемы для описания, постановки диагноза и оценки динамики процесса в лёгких. Врачам-рентгенологам противотуберкулёзного диспансера было рекомендовано проводить дополнительную постобработку томограмм, полученных в низкодозовом режиме. Использование оптимизации динамического диапазона, подчёркивание контуров, гамма-коррекция позволяют значительно улучшить качество изображений. Представленные низкодозовые протоколы внедрены в практику противотуберкулёзного диспансера.

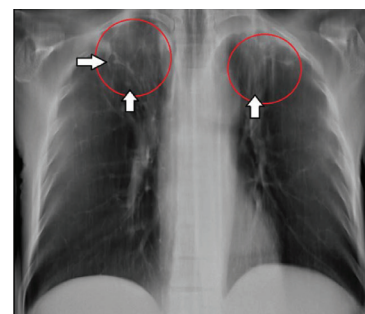
Следует отметить, что представленные результаты были получены при использовании ЦЛТ для оценки динамики уже установленного патологического процесса в лёгких. Использование ЦЛТ для постановки первичного диагноза будет приводить к необходимости проводить поиск патологического очага путем изменения глубины томографического слоя. Данный поиск приводит к увеличению (до 12–15) числа серий томограмм, что негативно сказывается на времени проведения исследования, дозах облучения пациента (ЭД может увеличиться до 0,75–1,2 мЗв) и вероятности получения ложноотрицательного диагноза.



1) ЦЛТ в режиме: U – 50кВ, Э – 11мАс, УОТ 25°, ВДТ 1,2 с, УТС – 110 мм, ЭД – 0,07 мЗв;
[(a) tube voltage 50 kV, exposure – 11 mAs, tomographic angle – 25°, tube movement time 1.2 s, depth of the tomographic layer 110 mm. Effective dose 0.07 mSv]



2) ЦЛТ в режиме: U – 50кВ, Э – 11мАс, УОТ 25°, ВДТ 1,2 с, УТС – 140 мм, ЭД – 0,07 мЗв;
[(b) tube voltage 50 kV, exposure – 11 mAs, tomographic angle – 25°, tube movement time 1.2 s, depth of the tomographic layer 110 mm. Effective dose 0.07 mSv]



3) ЦЛТ в режиме: U – 50 кВ, Э – 125 мАс, УОТ 25°, ВДТ 1,2 с, УТС – 90 мм, ЭД – 0,34 мЗв
[(c) tube voltage 50 kV, exposure – 125 mAs, tomographic angle – 25°, tube movement time 1.2 s, depth of the tomographic layer 90 mm. Effective dose 0.34 mSv]

Рис. 7. Примеры диагностических изображений, выполненных на низкодозовом (1, 3) и стандартном протоколах (2): 1 и 3 – инфильтративные изменения с участками деструкции, дренируемые субсегментарными бронхами в окружении мелких полиморфных очагов с обеих сторон в сегментах I, II, III (стрелки); 2 – в III сегменте правого легкого визуализируется очаг с просветлением в центре (стрелка)

[Fig. 7. Examples of the diagnostic images obtained at low-dose (1,3) and standard (2) protocols. 1) and 3): infiltrative changes with the areas of destruction, drained by the subsegmental bronchi, surrounded by the small polymorph lesions from both sides in segments I, II, III (see corresponding arrows); 2) localization of the lesion in segment III of the right lung (indicated by arrow)]

Заключение

Результаты экспертной оценки качества ЦЛТ антропоморфного фантома, полученных с использованием низкодозовых протоколов, показали, что все рентгеновские изображения обладали как минимум удовлетворительным качеством изображения и были пригодны для описания и дифференцировки патологии. Следует отметить, что на ЦЛТ крайне затруднительно выявить и идентифицировать низкоконтрастные очаги по типу «матового стекла», что является недостатком всех методов лучевой диагностики, позволяющих получать двумерные изображения без использования контрастных средств.

Предложенные низкодозовые режимы проведения ЦЛТ были клинически апробированы на базе противотуберкулезного диспансера. Сравнительная оценка доз облучения пациентов показала, что при использовании стандартных протоколов ЦЛТЭД находились в диапазоне 0,56–5,9 мЗв; низкодозовых протоколов – 0,2–1,15 мЗв. Переход на низкодозовые протоколы позволил снизить ЭД за исследование вплоть до 8 раз по сравнению со стандартными протоколами. Высокие ЭД пациентов в первую очередь обусловлены использованием высоких значений экспозиции – 126 мАс в стандартном режиме по сравнению с 7–11 мАс – в оптимизированном.

Проведенная экспертная оценка качества изображений с использованием разработанных критериев оценки качества показала, что использование оптимизированных протоколов приводит к достоверному снижению качества томограмм. При этом изображения выглядят более «шумными», появляются артефакты движения. Тем не менее, на всех полученных изображениях патологические симптомы в паренхиме легких были выявлены, измерены, оценены и описаны. Переход на новые режимы в отдельных случаях приводил к увеличению числа ЦЛТ в рамках одного исследования, что объясняется отсутствием у персонала опыта работы на новых протоколах и с субъективной возможностью проведения большего количества ЦЛТ без значимого увеличения доз облучения пациентов.

Результаты исследования показали, что ЦЛТ можно применять для оценки динамики патологического процесса в легких в том случае, когда локализация патологии уже известна. Преимуществами ЦЛТ являются широкая доступность метода, так как большинство отечественных рентгеновских аппаратов снабжено приставкой для линейной томографии, а ЭД за исследование относительно мала (в среднем $0,4 \pm 0,2$ мЗв) и сопоставима с дозами при рентгенографии ОГК в двух проекциях. Представленные низкодозовые протоколы внедрены в практику противотуберкулезного диспансера. В настоящее время рассматривается возможность проведения более крупномасштабного исследования на базе нескольких медицинских организаций, в том числе многопрофильных стационаров.

Литература

- Васильева И.А., Белиловский Е.М. Туберкулез, сочетанный с ВИЧ инфекцией, в странах мира и в Российской Федерации // Туберкулез и болезни лёгких. 2017. Т. 95, № 9. С. 8-12.
- Аналитический обзор статистических показателей по туберкулезу, используемых в Российской Федерации 2011 г.: Туберкулез в Российской Федерации. М., 2010. 223 с.
- Всемирная организация здравоохранения. Доклад о глобальной борьбе с туберкулезом 2016 г.: www.who.int/tb/publications/global_report/gtbr2016_executive_summary_ru.pdf (Дата обращения: 03.02.2020)
- World Health Organization. Systematic screening for active tuberculosis. Principles and recommendations. WHO/HTM/TB/2013.04. Geneva, World Health Organization, 2013. P. 137.
- World Health Organization. Tuberculosis Fact Sheet №104. 2017. Available from: www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/en. (Дата обращения: 03.02.2020)
- Здравоохранение в России. 2015: Стат. сб. М.: Росстат, 2015. 174 с.
- Vodovatov A.V., Drozdov A.A., Telnova A.Yu., Bernhardsson C. Management of patient doses from digital X-ray chest screening examinations // Rad. Prot. Dosim. 2016. Vol. 169, No 1-4. P. 232-239.
- Balonov M., Golikov V.Yu., Zvonova I. et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015 // J. Radiol. Prot. Vol. 38. P. 121-140. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>
- Балонов М.И. Голиков В.Ю., Звонова И.А. и др. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 67-79.
- Тюрин И.Е. Одиночные очаги в легких: возможности лучевой диагностики // Практическая пульмонология. 2008. № 2. С. 15-22.
- Тюрин И.Е. Скрининг заболеваний органов дыхания: современные тенденции // Практическая пульмонология. 2011. № 2. С. 12-16.
- Aviram G. Chest radiography for tuberculosis screening: a valuable tool // Isr. Med. Assoc. J. 2015. Vol. 17, No 1. P. 50-51.
- Li Q. Fan L., Cao E.T. et al. Quantitative CT analysis of pulmonary pure ground-glass nodule predicts histological invasiveness // European Journal of Radiology. 2017. Vol. 89. P. 67–71.
- Lee S.W., Jang Y.S., Park C.M. et al. The role of chest CT scanning in TB outbreak investigation // Chest. 2010. Vol. 137, No 5. P. 1057–1064.
- Nakanishi M., Demura Y., Ameshima S. et al. Utility of high-resolution tomography for predicting risk of sputum smear-negative pulmonary tuberculosis // Eur. J. Radiol. 2010. Vol. 73. P. 545–550.
- Chipiga L.A., Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation // Rad. Prot. Dos. 2016. Vol. 169, (1-4). P. 240-244.
- Помозгов А.И., Терновой С.К. Томография грудной клетки. Киев: Здоровья, 1992. 188 с.
- Уваров В.В. Классическая (аналоговая) томография – история, современный статус. Российская ассоциация радиологов. М., 2016. С. 136-142.
- Водоватов А.В., Камышанская И.Г., Борискина А.Н. Оценка эффективных доз при цифровой линейной томографии органов грудной клетки. Материалы Невского Радиологического Форума 2019. Лучевая диагностика и терапия. 2019. №1(9). С. 160-161.
- Водоватов А.В., Камышанская И.Г., Борискина А.Н. Методика малодозовой цифровой линейной томографии органов грудной клетки. Материалы Невского Радиологического Форума 2019. Лучевая диагностика и терапия. 2019. №1(9). С. 161-162.
- Беркович Г.В., Чипига Л.А., Водоватов А.В. и др. Оптимизация низкодозового протокола сканиро-

- вания органов грудной клетки в диагностике очагов по типу «матового стекла» с применением алгоритмов итеративных реконструкций // Лучевая диагностика и терапия. 2019. № 4. С. 20–32. DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32>
22. Aichinger H. Radiation exposure and image quality in x-ray diagnostic radiology: physical principles and clinical applications. Heidelberg: New York: Springer, 2012. 2nd ed – XIV, 307 p.
23. Dance D.R., Chrostofides S., Maidment A.D.A. Diagnostic radiology physics: A Handbook for teachers and students. Ng, Techn. Ed. – Vienna, IAEA: 2014.
- Поступила: 30.01.2020 г.

Камышанская Ирина Григорьевна – кандидат медицинских наук, доцент кафедры онкологии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

Черемисин Владимир Максимович – доктор медицинских наук, профессор кафедры онкологии Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий отделом лучевой диагностики Городской Мариинской больницы, Санкт-Петербург, Россия

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

Борискина Алена Николаевна – ординатор по специальности «Рентгенология» и старший лаборант кафедры онкологии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Камышанская И.Г., Черемисин В.М., Водоватов А.В., Борискина А.Н. Результаты клинической апробации низкодозовых протоколов проведения цифровой линейной томографии органов грудной клетки // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 47-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-47-59

Results of the clinical evaluation of the low-dose protocols of the digital linear tomography of the chest

Irina G. Kamyshanskaya ^{1,2}, Vladimir M. Cheremisin ^{1,2}, Aleksandr V. Vodovатов ³, Alena N. Boriskina ¹

¹Saint-Petersburg state University, Department of Oncology, Saint-Petersburg, Russia

²Urban Mariinsky hospital, Saint-Petersburg, Russia

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

High levels of tuberculosis morbidity in the Russian Federation lead to the extensive use of X-ray diagnostics for the tuberculosis screening and assessment of the effectiveness of treatment. Digital radiography and computed tomography are traditionally used for the diagnostics of tuberculosis. These methods are associated with significant drawbacks: low specificity for radiography, high costs per examination, significant patient doses, and limited availability for computed tomography. As an additional method for the assessment of the effectiveness of the tuberculosis treatment it is possible to use linear tomography performed on the digital X-ray units. The aim of the current study was to evaluate the possibility of utilization of the digital linear tomography for the control of the effectiveness of tuberculosis treatment in a dedicated antitubercular medical facility. The study was divided in two stages. The first stage was aimed at the assessment of the diagnostic image quality of the digital linear tomograms obtained using the previously developed low-dose imaging protocols. Image quality assessment was performed using an anthropomorphic chest phantom and dedicated imitators of the lung lesions. Image quality was assessed by the experts (radiologists) based on the developed image quality criteria. Results of the first stage of the study indicate that all low-dose protocols allow obtaining images with at least acceptable image quality. Hence it was possible to propose low-dose protocols for clinical evaluations. The second stage of the study was performed as a prospective cohort survey aimed at the evaluation of the structure of X-ray examinations, patient doses and clinical image quality of the digital linear tomograms in antitubercular early treatment center. The cohort survey included two patient samples, uniform by age and gender composition, anthropometric characteristics and structure of diagnosis. One of the samples was imaged using standard (vendor) digital linear protocols, other – using the proposed low-dose protocols. Dose data collection (measurement of dose-area product and subsequent calculation of effective dose) and expert image quality assessment was performed for each patient. The results of the second stage of the study indicate that the use of the low-dose protocols allow reducing the patient effective doses per examination up to a factor of 6–8 (0.56 – 5.9 mSv for standard protocols; 0.2 – 1.15 mSv for low-dose protocols) due to the reduction in tube current-time product (126 mean mAs and 11 mean mAs, respectively). The dose reduction

Aleksandr V. Vodovатов

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

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

is accompanied by the reduction in the image quality of the linear tomograms (from “excellent” or “good” for standard protocols to “acceptable” for low-dose protocols). However, that dose not hinder the conclusion decision and identification of pathologies. Results of the study indicate that digital linear tomography can be used for the evaluation of the dynamics of the pathological process in the lungs with the previously defined localization of the pathology. The presented low-dose protocols were implemented into radiological practice of the antitubercular early treatment center. Currently, the proposed low-dose protocols are under evaluation for the large-scale study on the base of general practice hospitals.

Key words: digital linear tomography, tuberculosis, effective dose, optimization, diagnostic image quality assessment.

References

1. Vasilieva IA, Belilovsky EM. Tuberculosis combined with HIV infection in the countries of the world and in the Russian Federation. *Tuberkulez i bolezni legkikh=Tuberculosis and lung diseases*. 2017;95(9): 8-12. (In Russian)
2. The analytical review of the statistical indicators for tuberculosis used in the Russian Federation in 2011: Tuberculosis in the Russian Federation. Moscow; 2010. 223 p. (In Russian)
3. World Health Organization. 2016 Global Tuberculosis Control Report / World Health Organization. Available from: www.who.int/tb/publications/global_report/gtbr2016_executive_summary_en.pdf [Accessed 3 February 2020] (In Russian)
4. World Health Organization. Systematic screening for active tuberculosis. Principles and recommendations. WHO/HTM/TB/2013.04. Geneva, World Health Organization. 2013: 137.
5. World Health Organization. Tuberculosis Fact Sheet No. 104. 2017 / World Health Organization: Available from: www.who.int/mediacentre/factsheets/fs104/en. [Accessed 2 March 2020]
6. Health care in Russian Federation. 2015: Stat. Sat. Moscow: Rosstat; 2015. 174 p. (In Russian)
7. Vodovатов AV, Drozdov AA, Telnova AY, Bernhardsson C. Management of patient doses from digital X-ray chest screening examinations. *Rad. Prot. Dosim.* 2016;169(1-4): 232-239.
8. Balonov M, Golikov V, Zvonova I, Chipiga L, Kalnitsky S, Sarycheva S, et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015. *J. Radiol. Prot.*; 38: 121-140. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa9b99>
9. Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA, Kalnitsky SA, Repin VS, Sarycheva SS, et al. Current levels of medical exposure in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation hygiene*. 2015;8(3): 67-79. (In Russian)
10. Tyurin IE. Single nodules in lungs: the possibility of radiation diagnostics. *Prakticheskaya pulmonologiya= Practical pulmonology*. 2008;(2): 15-22. (In Russian)
11. Tyurin IE. Screening of respiratory diseases: current trends. *Prakticheskaya pulmonologiya= Practical pulmonology*. 2011;(2): 12-16. (In Russian)
12. Aviram G. Chest radiography for tuberculosis screening: a valuable tool. *Isr. Med. Assoc. J.* 2015;17(1): 50-51.
13. Li Q, Fan L, Cao ET, Li QC, Gu YF, & Liu SY. Quantitative CT analysis of pulmonary pure ground-glass nodule predicts histological invasiveness. *European Journal of Radiology*. 2017;89: 67–71.
14. Lee SW, Jang YS, Park CM, et al. The role of chest CT scanning in TB outbreak investigation. *Chest*. 2010;137(5): 1057-1064.
15. Nakanishi M, Demura Y, Ameshima S, et al. Utility of high-resolution tomography for predicting risk of spu-tum smear-negative pulmonary tuberculosis. *Eur. J. Radiol.* 2010;73: 545-550.
16. Chipiga LA, Bernhardsson C. Patient doses in Computed Tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Rad. Prot. Dos.* 2016; 169(1-4): 240-244.
17. Pomozev AI, Ternova SK. Tomography of chest. Kiev: Health; 1992: 188. (In Russian)
18. Uvarov VV. Classical (analogue) tomography – history, current status. Russian Association of Radiologists. Moscow; 2016: 136-142. (In Russian)
19. Vodovатов AV, Kamyshanskaya IG, Boriskina AN. Evaluation of effective doses in digital linear tomography for chest. Proceedings of Nevsky Radiological Forum 2019. Radiation diagnostics and therapy. 2019;1(9): 160-161. (In Russian)
20. Vodovатов AV, Kamyshanskaya IG, Boriskina AN. The technique of low-dose digital linear tomography for chest. Proceedings of Nevsky Radiological Forum 2019. Radiation diagnostics and therapy. 2019;1(9): 161-162. (In Russian)
21. Berkovich GV, Chipiga LA, Vodovатов AV, Silin AY, Karatetskiy AA, Trufanov GE. Optimization of low-dose chest CT protocols for the evaluation of the ground glass nodules using different iterative reconstruction algorithms. *Luhevaya diagnostika i terapiya= Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2019;(4): 20-32. (In Russian) <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32>
22. Aichinger H. Radiation exposure and image quality in x-ray diagnostic radiology: physical principles and clinical applications. Heidelberg: New York: Springer, 2012. 2nd ed – XIV. 307 p.
23. Dance DR, Chrostofides S, Maidment ADA, McJean ID. Diagnostic radiology physics: A Handbook for teachers and students. Ng, Techn. Ed. – Vienna, IAEA: 2014.

Received: January 30, 2020

Irina G. Kamyshanskaya – Ph. D. Med., Docent of Radiation Diagnostics and Radiotherapy of Oncology Department of Medical Faculty of St. Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

Vladimir M. Cheremisin – M.D. Med., Professor of Radiation Diagnostics and Radiotherapy of Oncology Department of Medical Faculty of St. Petersburg State University, radiologist of the highest category, Head of Radiology Department SPb GBUZ «Mariinsky City Hospital», Saint-Petersburg, Russia

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

Alena N. Boriskina – Resident in “X-ray diagnostics”; chief departmental assistant, department of oncology, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Kamyshanskaya I.G., Cheremysin V.M., Vodovатов A.V., Boriskina A.N. Results of the clinical evaluation of the low-dose protocols of the digital linear tomography of the chest. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No. 1. P. 47-59. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-47-59

Влияния ингибитора синтаз оксида азота T1023 на развитие лучевого пневмофиброза у крыс

А.С. Сабурова, М.В. Филимонова, В.В. Южаков, Л.И. Шевченко,
Н.Д. Яковлева, Л.Н. Бандурко, А.Е. Корецкая, Н.К. Фомина, В.О. Сабуров,
А.С. Филимонов

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Целью работы являлось изучение способности ингибитора синтаз оксида азота T1023 к профилактике поздних лучевых повреждений. Методы работы включали гистопатологические и морфометрические исследования влияния радиозащитного действия соединения T1023 (75 мг/кг, однократно внутривентриально за 30 мин до облучения) на развитие постлучевого пульмонита и пневмофиброза у крыс при торакальном воздействии γ -излучения в дозе 12,5 Гр. Результаты исследований показали, что радиозащитное действие соединения T1023 не оказывало существенного объективного влияния на раннем этапе (9 недель) развития радиационно-индуцированных повреждений легких. Но на этапе полного развития лучевой реакции легких (26 недель) превентивное радиозащитное действие T1023 сопровождалось объективно выраженным и статистически значимым ограничением патоморфологических проявлений постлучевого пульмонита, разрастания соединительной ткани и развития фиброзных изменений в паренхиме легких. На этом сроке действие T1023 отчетливо способствовало сохранению нормальной гистоструктуры легких, снижая на 40% содержание в паренхиме зон уплотнения. Показанная в работе способность ингибитора синтаз оксида азота T1023 существенно ограничивать развитие поздней лучевой реакции легких подтверждает перспективность дальнейшей разработки этого соединения в качестве средства профилактики осложнений лучевой терапии.

Ключевые слова: ингибиторы синтаз оксида азота, радиозащитное действие, поздние лучевые повреждения, лучевой пневмофиброз.

Введение

Несмотря на существенные успехи последних десятилетий в медицине и фармакологии, проблемы профилактики и лечения осложнений радиотерапии опухолей не утратили своего масштаба и актуальности. Так, только в России в настоящее время имеется более 3 миллионов онкологических больных, и около 60% из них получают лучевую терапию [1]. У 10–15% таких пациентов (а при некоторых локализациях – у 40%) развиваются осложнения, обусловленные лучевыми повреждениями нормальных тканей.

В ряду таких осложнений серьезную клиническую проблему представляют поздние лучевые повреждения, в основе которых лежат хронические иммуновоспалительные процессы, приводящие к развитию фиброза. Такие патологии имеют торпидное, во многом необратимое течение, слабо поддаются консервативному лечению и при полной выраженности могут приводить к недостаточности внутренних органов и смерти [2, 3].

Ранее в своих исследованиях мы показали, что ингибитор синтаз оксида азота (NOS) T1023 (1-изобутаноил-2-изопропилизотиомочевина гидробромид) является

гипоксическим радиопротектором, эффективным как в профилактике острой лучевой болезни (ФИД – 1,6–1,9) [4, 5], так и в профилактике наиболее распространенных осложнений радиотерапии – острых лучевых повреждений кожи (ФИД – 1,4–1,7) [6–8], которую T1023 при лечении солидных неоплазий реализует селективно – без ослабления противоопухолевой эффективности лучевой терапии.

Цель исследования – изучение способности ингибитора синтаз оксида азота T1023 к профилактике поздних лучевых повреждений.

Задачи исследования

Изучение влияния соединения T1023 на развитие постлучевого пневмофиброза у крыс.

Материалы и методы

Лабораторные животные. Исследование выполнено на 30 самцах крыс Wistar в возрасте 2,5–3 мес с массой тела 190–230 г на начало эксперимента. Животные были получены из питомника ФГБУН НЦБМТ ФМБА России и включались в опыт после 2 недель карантина в виварии

Сабурова Алина Сергеевна

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба

Адрес для переписки: 249036, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4;

E-mail: alinasamsonova.515@gmail.com

МРНЦ. Содержались крысы в клетках Т-3 при естественном освещении в помещении вивария в условиях с принудительной 10-кратной вентиляцией, при температуре 18–20 °С и относительной влажности воздуха 40–70%, на подстилке из простерилизованных древесных стружек, со свободным доступом к питьевой воде и брикетированному корму ПК-120-1 (Лабораторснаб, РФ). Все работы с животными выполнены на основе стандартных операционных процедур, принятых в Медицинском радиологическом научном центре им. А.Ф. Цыба (МРНЦ), которые соответствуют правилам Европейской конвенции ETS 123.

Исследуемое соединение. Субстанция Т1023 была разработана и стандартизирована в лаборатории радиационной фармакологии МРНЦ. Содержание 1-изобутаноил-2-изопропилизотиомочевин гидробромида в субстанции было не менее 95%, содержание сопутствующих и постоянных примесей – менее 1%. Применялось соединение Т1023 в виде 0,75% асептического раствора, который изготавливали непосредственно *ex tempore* на основе 0,9% раствора натрия хлорида (Дальхимфарм, РФ).

Схема эксперимента. Крысы методом рандомизации были распределены в три экспериментальные группы по 10 особей в каждой – группу биологического контроля и две опытных группы. Крысам группы биологического контроля было проведено однократное внутрибрюшинное введение растворителя – 0,9% асептического раствора натрия хлорида (Дальхимфарм, РФ) в объеме 0,1 мл на 10 г массы тела. В дальнейшем животные этой группы не получали каких-либо воздействий. Крысы опытных групп получали торакальное воздействие γ -излучения. При этом особям первой опытной группы за 30 мин до облучения вводили однократно внутрибрюшинно растворитель в объеме 0,1 мл на 10 г массы тела, а особям второй опытной группы в эти же сроки вводили однократно внутрибрюшинно 0,75% раствор Т1023 в объеме 0,1 мл на 10 г массы тела. Использованный объем раствора Т1023 обеспечивал оптимальную дозу этого соединения – 75 мг/кг, эффективную в профилактике ОЛБ и острого лучевого ожога кожи [5, 8]. Однократное облучение γ -излучением ^{60}Co области грудной клетки крыс опытных групп проводили на установке «Рокус» (РФ) в дозе 12,5 Гр при мощности дозы 16,7 мГр/с с полем облучения 40×30 мм в вентродорсальном направлении.

Патоморфологические исследования животных экспериментальных групп были проведены через 9 и через 26 недель после начала опыта. На первом сроке было исследовано по 3 особи каждой группы, на втором сроке – по 7 особей. Крыс выводили из опыта путем внутрибрюшинного введения 5% раствора тиопентала натрия (0,7–1,0 мл на особь). После макроскопического описания у всех животных, подвергнутых вскрытию на станции вырезки для гистологических исследований (LEEC Ltd., Германия), выделяли легкие, взвешивали их на аналитических весах HR-150AG (A&D, Япония) и оценивали их относительную массу – *отношение (в %) массы органа к массе тела*.

Выделенные легкие фиксировали 24 ч в 10% забуференном формалине (Sigma, США). После стандартной гистологической проводки на гистопроцессоре Leica

TP1020 (Германия) ориентированные фрагменты тканей заключали в парафиновую среду Гистомикс (Биовитрум, РФ) на станции заливки HistoStar (Thermo FS, США). Гистологические срезы толщиной 5 мкм, окрашенные гематоксилином и эозином и по Ван Гизону, изучали под микроскопом Leica DM 1000 (Германия) с микрофото съемкой на цифровую камеру Leica ICC50 HD (Германия) при 4 уровнях увеличений.

Количественные оценки содержания зон уплотнения паренхимы легких с признаками фиброза выполнены с помощью системы анализа микроскопических изображений LAS (Leica, Германия), согласно основным принципам стереологии в морфометрии. Объемное содержание зон уплотнений определяли как отношение (в %) суммарной площади зон уплотнений на исследуемом срезе легких к общей площади среза легких на гистологическом препарате.

Статистическая обработка. По всем количественным показателям проведен расчет параметров вариационной статистики, и их величины приведены в виде $M \pm SD$. Оценку значимости межгрупповых различий показателей проводили путем дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса с применением q-критерия Ньюмена – Кейлса. Различия полагали статистически значимыми при $p < 0,05$. Расчеты выполнены с помощью программного пакета BioStat 2007 (AnalystSoft, США).

Результаты и обсуждение

В течение всего срока наблюдения внешний вид животных всех экспериментальных групп оставался без особенностей. Шерстный покров и видимые слизистые оболочки без изменений. Пищевая активность и динамика массы тела в экспериментальных группах не различалась и соответствовала возрастным нормам. На поздних сроках наблюдения (2–6-й месяц) у крыс, получавших лучевое воздействие, отмечено снижение спонтанной двигательной и поведенческой активности, особенно выраженное в первой опытной группе (контроль облучения).

Хотя крысы группы биологического контроля в течение всего эксперимента выглядели здоровыми, активными, подвижными, результаты патоморфологических исследований этих животных на обоих сроках наблюдения показали, что гистоструктура их легких не в полной мере соответствовала вариантам возрастной нормы. У ряда особей этой группы (15–30%) в отдельных долях легких, наряду с зонами с нормальной гистоструктурой паренхимы имеющими свободные альвеолы с тонкими стенками азрогематического барьера, были видны, чаще в субплевральной области, небольшие локальные уплотнения паренхимы (рис. 1А). В таких зонах отмечалось усиление кровенаполнения сосудов микроциркуляции, снижение площади респираторной поверхности, повышенное содержание фибробластов и небольшие группы альвеолярных макрофагов, выявлялись коллагеновые волокна (рис. 1Б). По данным морфометрического анализа, относительное содержание зон уплотнения легочной паренхимы у крыс биологического контроля составило $9,5 \pm 7,8\%$ (табл.).

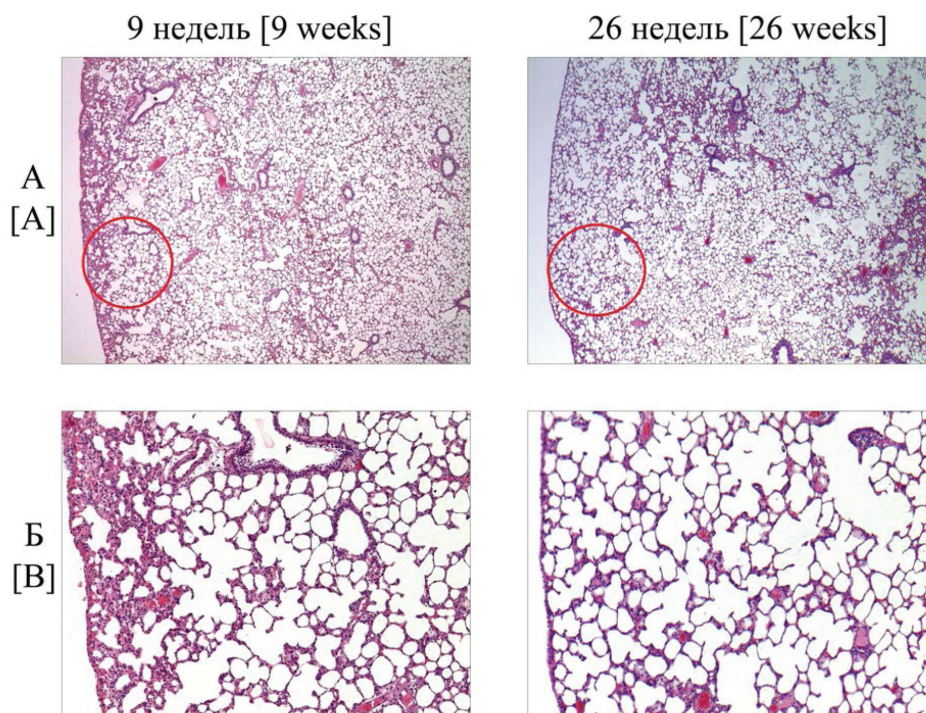


Рис. 1. Мелкоочаговые уплотнения паренхимы легких крыс группы биологического контроля. Окраска гематоксилином и эозином: А – обзор, ув. $\times 35$; Б – фрагменты А, ув. $\times 50$

[Fig. 1. Small focal compactions of rats lungs parenchyma in the biological control group. Staining with hematoxylin and eosin. A. View, $\times 35$. B. Fragments A, $\times 50$]

Морфометрические показатели в экспериментальных группах на этапах наблюдения

Таблица

Morphometric indicators in the experimental groups at the stages of observation

Table

Показатели [Indicators] (M $\pm$ SD)	Биологический контроль [Biological control]	12,5 Гр [12,5 Gy]	T1023 + 12,5 Гр [T1023 + 12,5Gy]
9 недель (n = 3) [9 weeks (n=3)]			
Относительная масса легких, % [Relative weight of the lungs, %]	0,55 $\pm$ 0,03	0,71 $\pm$ 0,12 *	0,62 $\pm$ 0,09
26 недель (n = 7) [26 weeks (n = 7)]			
Относительная масса легких, % [Relative weight of the lungs, %]	0,56 $\pm$ 0,11	0,59 $\pm$ 0,09	0,56 $\pm$ 0,06
Содержание зон уплотнения в легких, % [Content of com- paction zones in the lungs, %]	9,54 $\pm$ 7,81	33,39 $\pm$ 12,04 *	20,01 $\pm$ 6,75 * #

Статистически значимое различие ($p < 0,05$) по критерию Ньюмена – Кейлса: * – с биологическим контролем; # – с группой контроля облучения [Notes. Statistically significant difference ($p < 0,05$) according to the Newman-Keuls method: * – with biological control group; # – with the irradiation control group].

В целом, выявленные в биологическом контроле патоморфологические изменения в легких свидетельствовали о наличии у ряда этих животных вялотекущего очагового интерстициального пульмонита неясной этиологии, протекающего в легкой форме с невыраженными клиническими проявлениями.

Использованная в работе экспериментальная модель воспроизводила основные закономерности развития поздней лучевой реакции легких. Выраженность влияния превентивного введения ингибитора NOS T1023 на этапах развития этой патологии существенно различалась.

9 недель

По данным микроскопических исследований, к этому сроку у крыс обеих опытных групп развивались проявления радиационно-индуцированных повреждений легких в виде многочисленных локальных очагов постлучевого пульмонита. В легких облученных крыс в этот срок исследования как в субплевральной области, так и в центральных частях паренхимы легких выявлялись очаги уплотнения легочной ткани (рис. 2А), сопровождающиеся снижением площади респираторного отдела и застойными явлениями в сосудах микроциркуляции в зонах уплотнения. Стенки аэрогематического барьера были утолщены за счет полнокровия сосудов и инфильтрации круглоклеточными элементами, альвеолярными и пенистыми макрофагами (рис. 2Б). К этому сроку у животных обеих опытных групп выявлялись и начальные признаки развития фиброзных изменений в паренхиме легких – появление клеток соединительной ткани и слабоокрашенных коллагеновых волокон (рис. 2В).

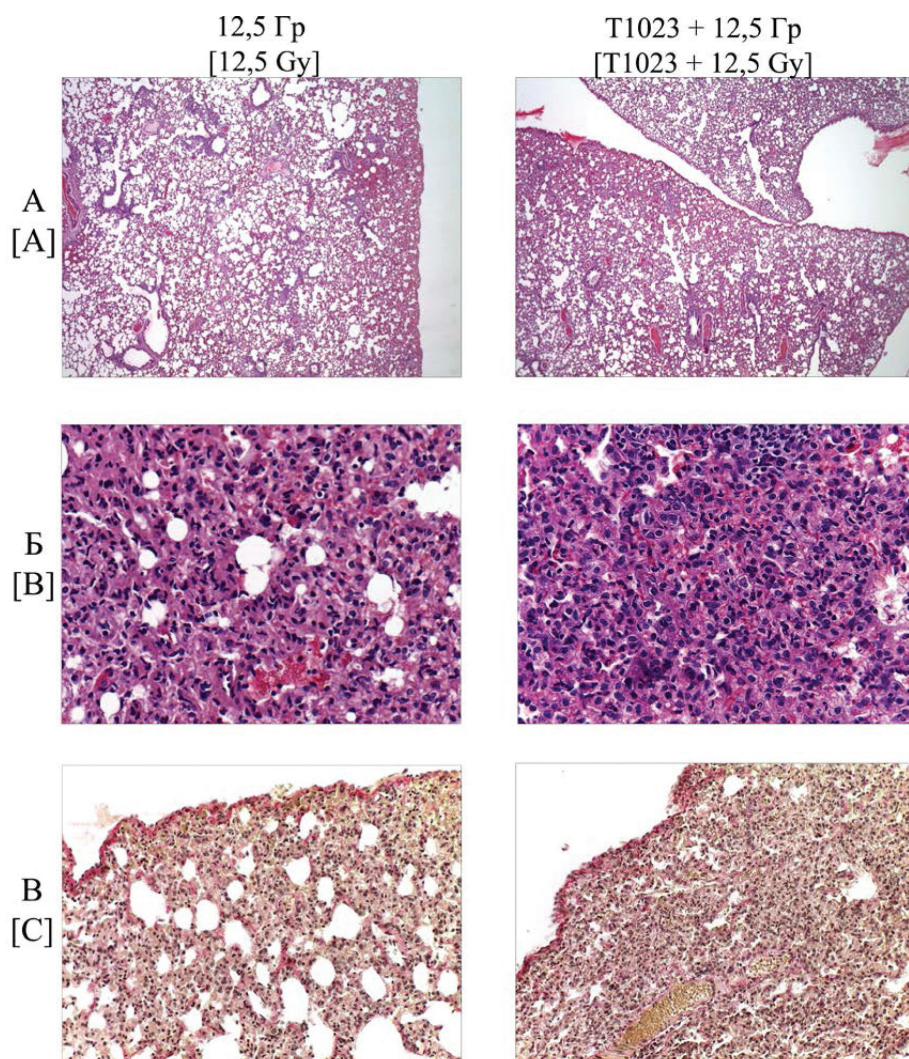


Рис. 2. Морфология паренхимы легких облученных крыс через 9 недель после лучевого воздействия: А – обзор, окраска гематоксилином и эозином, ув. $\times 35$; Б – очаги разрастания соединительной ткани в паренхиме легких облученных крыс, окраска гематоксилином и эозином, ув. $\times 200$; В – разрастание интерстициальной соединительной ткани в паренхиме облученных крыс, окраска по Ван Гизону, ув. $\times 100$. Коллагеновые волокна окрашены красным

[Fig. 2. Morphology of rats' lungs parenchyma in 9 weeks after irradiation. A. View, staining with hematoxylin and eosin, $\times 35$. B. Focals of proliferation of connective tissue in the lungs parenchyma of irradiated rats, staining with hematoxylin and eosin, $\times 200$. C. The proliferation of interstitial connective tissue in the parenchyma of irradiated rats, Van Gieson staining, $\times 100$. Collagen fibers are stained red]

Сопоставление объективной патоморфологической картины в легких крыс первой и второй опытных групп свидетельствовало, что превентивное радиозащитное действие соединения T1023 слабо влияло на ранний этап развития лучевой реакции легких. Отчетливым позитивным эффектом T1023 в этот срок являлось только то, что ингибитор NOS предотвращал существенное (на 30%) возрастание относительной массы облученных легких (см. табл.), обусловленное пролиферативным характером постлучевого пульмонита.

26 недель

Через полгода после воздействия γ -излучения у всех крыс первой опытной группы в респираторном отделе легких отмечалось снижение содержания альвеол. В паренхиме выявлялись обширные очаги уплотнения или спадение целых долей в виде ателектазов (рис. 3А), и у значительной части животных (43%) выявлялась очаговая бронхопневмония. По данным морфометрии, содержание зон уплотненной легочной паренхимы у этих крыс резко, статистически значимо увеличилось относительно биологического контроля до $33,4 \pm 12,0\%$ (см. табл.).

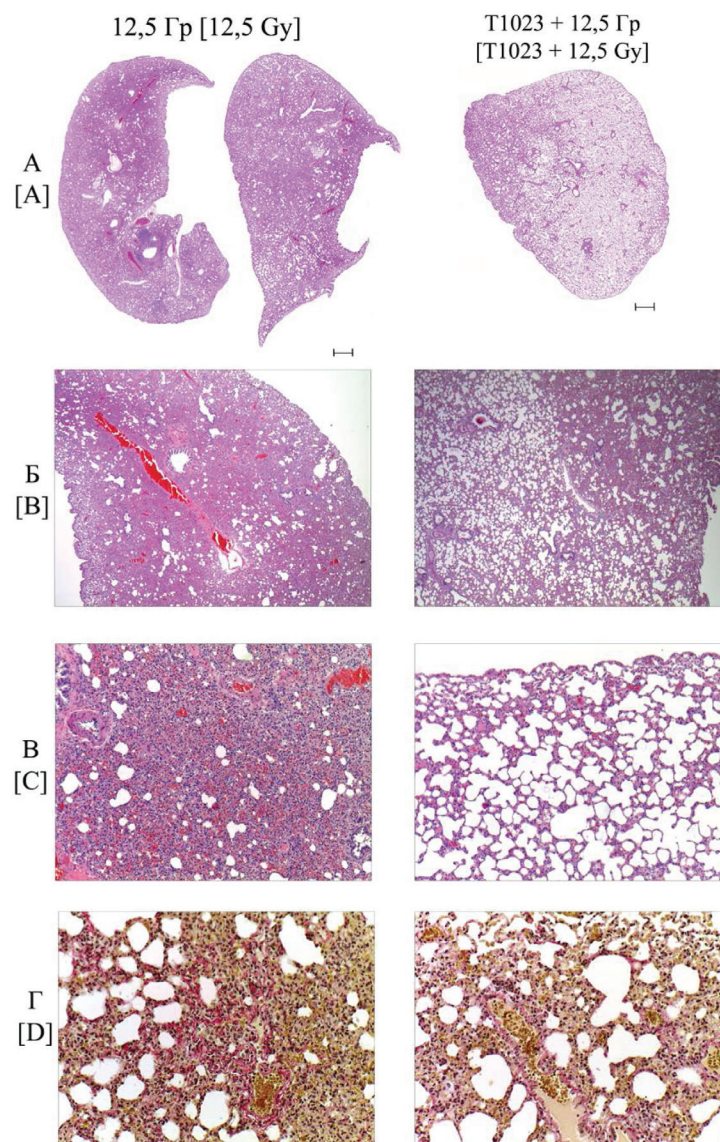


Рис. 3. Морфология паренхимы легких облученных крыс через 26 недель после лучевого воздействия: А – сканы органов, окраска гематоксилином и эозином; Б – зоны уплотнения паренхимы в легких облученных крыс, окраска гематоксилином и эозином, ув. $\times 35$; В – слева очаг разрастания соединительной ткани в легких крысы первой опытной группы; справа – зона паренхимы легких крысы второй опытной группы с относительно нормальной гистоструктурой. Окрашивание гематоксилином и эозином, ув. $\times 50$; Г – коллагеновые волокна в очагах уплотнения легочной паренхимы облученных крыс, окраска по Ван Гизону, ув. $\times 100$

[Fig. 3. Morphology of rats' lungs parenchyma in 26 weeks after irradiation. A. Scans of organs, staining with hematoxylin and eosin. B. Content of compaction zones in the parenchyma of irradiated rats, staining with hematoxylin and eosin, $\times 35$. C. On left – focal of proliferation of connective tissue in the rats' lungs in the first experimental group; on right – zone of the rats' lung parenchyma in the second experimental group with a relatively normal histostructure. Staining with hematoxylin and eosin, $\times 50$. D. Collagen fibers in the foci of compaction of the pulmonary parenchyma of irradiated rats, Van Gieson staining, $\times 100$]

В зонах уплотнения наблюдалось уменьшение просвета респираторных альвеол, разрастание соединительной ткани и появление многочисленных альвеолярных макрофагов, полнокровие сосудов микроциркуляции (см. рис. 3Б, 3В). При окрашивании препаратов по Ван Гизону в зонах уплотнения, периваскулярных и перибронхиальных пространствах отмечалось выраженное разрастание интерстициальной соединительной ткани и коллагеновых волокон (см. рис. 3Г).

На этот срок исследований патоморфологические изменения в легких крыс, которым перед облучением был введен Т1023, в целом, носил однонаправленный характер с первой опытной группой. Вместе с тем, у этих животных объективно и количественно регистрировалось снижение распространения и масштаба очагов постлучевого пульмонита, и выраженности фиброзных изменений паренхимы легких (см. рис. 3А). Содержание зон уплотненной легочной паренхимы у этих крыс было статисти-

чески значимо ниже (на 40%), чем в группе облученного контроля – $20,0 \pm 6,8\%$ (см. табл.), и очаговая бронхопневмония выявлялась существенно реже – лишь у 14%.

Как и у контрольных облученных животных первой опытной группы, в зонах уплотнений наблюдалось полное кровие сосудов микроциркуляторного русла и скопления пенистых макрофагов. Но обращали на себя внимание распространенные зоны варьирующей ширины, имевшие строение нормального спавшегося легкого, и зоны с относительно нормальной гистоструктурой (см. рис. 3Б, 3В). При окрашивании препаратов по Ван Гизону формирование фиброзных изменений визуальнее менее выражено, чем у особей первой опытной группы (см. рис. 3Г).

Сопоставление патоморфологической картины в легких крыс первой и второй опытных групп свидетельствовало, что на данном сроке исследования превентивное радиозащитное действие соединения T1023 объективно выражено, статистически значимо ограничивало развитие радиационно-индуцированного пульмонита и фиброза и способствовало сохранению нормальной гистоструктуры легких.

Заключение

Данные, полученные в этом исследовании, согласуются с результатами работ, в которых показана способность некоторых радиозащитных средств, в частности, амифостина, мелатонина и СОД-миметиков, снижающих альтерацию тканей в момент лучевого воздействия, ограничивать последующее развитие отдаленных лучевых повреждений, в том числе, поздней лучевой реакции легких [9–12].

Таким образом, результаты работы подтверждают безусловную перспективность дальнейшей разработки соединения T1023 в качестве средства профилактики осложнений лучевой терапии.

Литература

- Каприн А.Д., Старинский В.В., Петрова В.Г. Злокачественные новообразования в России в 2015 году (заболеваемость и смертность). М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2017. 250 с.
- Лушников Е.Ф., Абросимов А.Ю. Современная лучевая патология человека: проблемы методологии исследования, этиологии, патогенеза и классификации. Обнинск: ФГБУ МРНЦ МЗ РФ, 2012. 235 с.
- Satyamitra M.M., DiCarlo A.L., Taliaferro L. Understanding the pathophysiology and challenges of development of medical countermeasures for radiation-induced vascular/endothelial cell injuries: Report of a NIAID workshop, August 20, 2015 // Radiat. Res. 2016. Vol. 186, № 2. P. 99–111.
- Филимонова М.В., Шевченко Л.И., Трофимова Т.П., и др. К вопросу о механизме радиозащитного действия ингибиторов NO-синтаз // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 5. С. 500–506.
- Филимонова М.В., Шевченко Л.И., Макачук В.М., и др. Радиозащитные свойства ингибитора NO-синтаз T1023: I. Показатели противолучевой активности и взаимодействия с другими радиопротекторами // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 3. С. 250–259.
- Филимонова М.В., Ульяненко С.Е., Шевченко Л.И., и др. Радиозащитные свойства ингибитора NO-синтаз T1023: II. Способность к селективной защите нормальных тканей при лучевой терапии новообразований // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 3. С. 260–266.
- Филимонова М.В., Самсонова А.С., Корнеева Т.С., и др. Исследование способности нового ингибитора синтаз оксида азота INOS1 селективно защищать нормальные ткани на модели лучевой терапии карциномы Эрлиха // Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 2. С. 37–45.
- Филимонова М.В., Самсонова А.С., Корнеева Т.С., и др. Противолучевые эффекты ингибитора синтаз оксида азота T1023 в нормальных и малигнизированных тканях. Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 4. С. 155–169.
- Yazbeck V.Y., Villaruz L., Haley M., Socinski M.A. Management of normal tissue toxicity associated with chemoradiation (primary skin, esophagus, and lung) // Cancer J. 2013. Vol. 19, No 3. P. 231–237.
- Gurses I., Ozeren M., Serin M., et al. Histopathological efficiency of amifostine in radiation-induced heart disease in rats // Bratisl. Lek. Listy. 2018. Vol. 119, No 1. P. 54–59.
- Farhood B., Aliasgharzadeh A., Amini P., et al. Mitigation of radiation-induced lung pneumonitis and fibrosis using metformin and melatonin: a histopathological study. Kaunas: Medicina. 2019. Vol. 55, No 8. P. E417. doi: 10.3390/medicina55080417.
- Shrishrimal S., Kosmacek E.A., Chatterjee A., et al. The SOD-mimic, MnTE-2-PyP, protects from chronic fibrosis and inflammation in irradiated normal pelvic tissues. Antioxidants (Basel). 2017. Vol. 6, No 4. P. E87. doi: 10.3390/antiox6040087.

Поступила: 14.01.2020 г.

Сабурова Алина Сергеевна – научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба. Адрес для переписки: 249036, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4;

E-mail: alinasamsonova.515@gmail.com

Филимонова Марина Владимировна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Южаков Вадим Васильевич – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Шевченко Людмила Ивановна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Яковлева Нина Дмитриевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Бандурко Любовь Николаевна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Корецкая Анастасия Евгеньевна – младший научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Фомина Наталья Константиновна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Сабуров Вячеслав Олегович – инженер Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Филимонов Александр Сергеевич – научный сотрудник Медицинского радиологического научного центра им. А.Ф. Цыба, Обнинск, Россия

Для цитирования: Сабурова А.С., Филимонова М.В., Южаков В.В., Шевченко Л.И., Яковлева Н.Д., Бандурко Л.Н., Корецкая А.Е., Фомина Н.К., Сабуров В.О., Филимонов А.С. Влияния ингибитора синтаза оксида азота T1023 на развитие лучевого пневмофиброза у крыс // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 60–67.

DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-60-67

The influence of nitric oxide synthases inhibitor T1023 on the development of radiation pneumofibrosis in rats

Alina S. Saburova, Marina V. Filimonova, Vadim V. Yuzhakov, Lyudmila I. Shevchenko, Nina D. Yakovleva, Lyubov N. Bandurko, Anastasiya E. Koretskaya, Natalya K. Fomina, Vyacheslav O. Saburov, Alexandr S. Filimonov

A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

The purpose of the work was to study the ability of the NOS inhibitor T1023 to prevent late radiation injuries. Methods: the effects of T1023 (75 mg / kg, once i.p. 30 minutes before the irradiation) on the development of post-radiation pneumonitis and pneumofibrosis in rats with thoracic exposure to g-radiation at a dose of 12.5 Gy were studied histopathologically and morphometrically. The results of the studies showed that there wasn't a significant objective effect of T1023 on the development of early radiation-induced lung injuries (9 weeks after irradiation). But it prevented late radiation induced lung injuries (26 weeks after irradiation) – there were a significant lesser pathomorphological manifestations of post-radiation pneumonitis, proliferation of connective tissue and the development of fibrotic changes in the lung parenchyma. At this stage, the action of T1023 clearly contributed to the preservation of the normal histostructure of the lungs, reducing by 40% the content of compaction zones in the parenchyma. The ability of the NOS inhibitor T1023 to significantly limit the development of lungs late radiation reaction confirms the promise of further development of this compound as a means for prevention radiation therapy complications.

Key words: NO synthase inhibitors, radioprotective effects, late radiation injuries, radiation pneumofibrosis.

References

1. Kaprin AD, Starinsky VV, Petrova VG. Malignant neoplasms in Russia in 2015 (morbidity and mortality). Moscow: P. Herzen MORI.; 2017: 250 (in Russian).
2. Lushnikov EF, Abrosimov AY. Modern radiation pathology of a person: the problems of the methodology of research, etiology, pathogenesis and classification. Obninsk: MRCC; 2012 (in Russian).
3. Satyaputra MM, DiCarlo AL, Taliaferro L. Understanding the pathophysiology and challenges of development of medical countermeasures for radiation-induced vascular/endothelial cell injuries: Report of a NIAID workshop, August 20, 2015. *Radiat. Res.* 2016;186(2): 99-111.
4. Filimonova MV, Shevchenko LI, Trofimova TP, Makarchuk VM, Shevchuk AS, Lushnikova GA. On the mechanism of radioprotective effect of NO-synthase inhibitors. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology.* 2014;54(5): 500-506 (in Russian).
5. Filimonova MV, Shevchenko LI, Makarchuk VM, Chesnakova EA, Izmeteva OS, Korneeva TS, et al. Radioprotective properties of NO-synthase inhibitor T1023: I. Indicators of radioprotective activity and interaction with other radioprotectors. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology.* 2015;55(3): 250-259 (in Russian).
6. Filimonova MV, Ulyanenko SE, Shevchenko LI, Kuznetsova MN, Makarchuk VM, Chesnakova EA, et al. Radioprotective properties of NO-synthase inhibitor T1023: II. The ability for selective protection of normal tissue during radiotherapy of tumors. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology.* 2015;55(3): 260-266 (in Russian).

Alina S. Saburova

A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Address for correspondence: Korolev street, 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: alinasamsonova.515@gmail.com

7. Filimonova MV, Samsonova AS, Korneeva TS, Shevchenko LI, Filimonov AS. Study of the ability of a new nitric oxide synthase inhibitor INOS1 to selectively protect the normal tissue in the Ehrlich carcinoma radiotherapy model. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2018;27(2): 37-45 (in Russian).
8. Filimonova MV, Samsonova AS, Korneeva TS, Shevchenko LI, Saburov VO, Filimonov AS. The radioprotective effects of nitric oxide synthase inhibitor T1023 on normal and malignant tissues. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2018;27(4): 155-169 (in Russian).
9. Yazbeck VY, Villaruz L, Haley M, Socinki MA. Management of normal tissue toxicity associated with chemoradiation (primary skin, esophagus, and lung). *Cancer J*. 2013;19(3): 231-237.
10. Gurses I, Ozeren M, Serin M, Yucel N, Erkal HS. Histopathological efficiency of amifostine in radiation-induced heart disease in rats. *Bratisl. Lek. Listy*. 2018;119(1): 54-59.
11. Farhood B, Aliasgharzadeh A, Amini P, Rezaeyan A, Tavassoli A, Motevaseli E, et al. Mitigation of radiation-induced lung pneumonitis and fibrosis using metformin and melatonin: a histopathological study. *Kaunas: Medicina*. 2019;55(8): E417. doi: 10.3390/medicina55080417.
12. Shrishrimal S, Kosmacek EA, Chatterjee A, Tyson MJ, Oberley-Deegan RE. The SOD-mimic, MnTE-2-PyP, protects from chronic fibrosis and inflammation in irradiated normal pelvic tissues. *Antioxidants (Basel)*. 2017;6(4): E87. doi: 10.3390/antiox6040087.

Received: January 14, 2020

For correspondence: Alina S. Saburova – Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center (Korolev street, 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: alinasamsonova.515@gmail.com)

Marina V. Filimonova – Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Vadim V. Yuzhakov – Candidate of Medicine Sciences, Head of Laboratory, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Lyudmila I. Shevchenko – Candidate of Chemistry Sciences, Leading Research, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Nina D. Yakovleva – Candidate of Biological Sciences, Leading Research, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Lyubov N. Bandurko – Candidate of Medicine Sciences, Leading Research, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Anastasiya E. Koretskaya – Junior Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Natalya K. Fomina – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Vyacheslav O. Saburov – Engineer, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

Alexandr S. Filimonov – Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia

For citation: Saburova A.S., Filimonova M.V., Yuzhakov V.V., Shevchenko L.I., Yakovleva N.D., Bandurko L.N., Koretskaya A.E., Fomina N.K., Saburov V.O., Filimonov A.S. The influence of nitric oxide synthases inhibitor T1023 on the development of radiation pneumofibrosis in rats. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 60-67. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-60-67

Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана

У.М. Мирсаидов¹, Х.М. Назаров¹, Ш.Г. Шосафарова¹, М.М. Махмудова²

¹Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

²Таджикский государственный медицинский университет им. Абуали ибн Сино, Душанбе, Таджикистан

В статье приведены результаты радонового мониторинга на территории Северного Таджикистана. Анализ результатов выполненных работ показывает, что в настоящее время на обследованной территории относительно высокие значения объемной активности радона в атмосферном воздухе наблюдаются в зонах расположения урановых хвостохранилищ, в первую очередь в г. Истиклол и Дигмайском хвостохранилище. Данное обстоятельство обусловлено прежде всего отсутствием защитных покрытий на поверхности хвостового материала, что превращает эту местность по сути в радоноопасные территории техногенного происхождения. Так, на разных участках действующего Дигмайского хвостохранилища объемная активность радона в атмосферном воздухе варьирует в пределах 200–1000 Бк/м³, а плотность потока радона с поверхности достигает 65 000 мБк/(м²·с). На территории хвостохранилищ г. Истиклол значение объемной активности радона в атмосферном воздухе находится в пределах 44–195 Бк/м³. В то же время установлено, что потенциальная радоноопасность территории хвостохранилищ, поверхность которых имеет защитное покрытие, гораздо ниже. Например, плотность потока радона на территории хвостохранилища г. Гафуров, поверхность которого покрыта лёссовидными суглинками толщиной до 2,5–3,0 м, не превышает 100 мБк/(м²·с) при средних значениях 40–60 мБк/(м²·с), а объемная активность радона в атмосферном воздухе составляет в среднем 55 Бк/м³. Несмотря на высокое выделение радона с поверхности некоторых хвостохранилищ, их территория не является на данный момент селитебной зоной и, соответственно, не оказывает влияния на радоновую обстановку в зданиях, расположенных, вблизи населенных пунктов: в городах Худжанд, Бустон, Гафуров, Истиклол и поселке Адрасман средние значения объемной активности радона в воздухе помещений соответствуют установленным нормативам. Для улучшения радоновой обстановки на территории Северного Таджикистана с учетом возможного расширения территории застройки населенных пунктов рекомендуется провести комплекс мероприятий по рекультивации территории объектов уранового наследия, в первую очередь урановых хвостохранилищ г. Истиклол и Дигмайского хвостохранилища.

Ключевые слова: хвостохранилище, урановое наследие, радон, объемная активность, плотность потока радона, мониторинг, интегральный трековый детектор, территория, здание, джамоат.

Введение

Интенсивная переработка урановых руд на территории Северного Таджикистана в советский период привела к накоплению значительного количества отходов с высокими концентрациями радионуклидов (в основном, ряда ²³⁸U) [1].

Дигмайское хвостохранилище относится к категории действующих объектов гидрометаллургической переработки радиоактивных руд. В эксплуатацию введено в 1963 г. Хвостохранилище расположено на территории Бободжан-Гафуровского района на Дигмайской возвышенности, на расстоянии 1,5 км от ближайшего населенного пункта (пос. Гоziён) и на расстоянии 10 км от областного центра (г. Худжанд), занимает площадь 90 га. В нем накоплено 21 млн т рудных отходов уранового производства, 500 тыс. т забалансовой руды урана и 5,7 млн т отходов переработки ванадийсодержащего сырья.

На 1991 г. в чаше хвостохранилища было накоплено 50·10⁶ м³ пульпы, часть которой в течение 8–10 лет испарилась, а часть дренировалась. За прошедшие годы хвостовой материал высох, почва подвергалась эрозии, и образовались трещины шириной 20–50 см, способствующие интенсивному радоновыделению.

В г. Истиклол (бывший г. Табашар) находятся 5 урановых хвостохранилищ. Отходы образовались в период с 1945 по 1965 г. в результате деятельности двух гидрометаллургических заводов по переработке урановых руд. Город Истиклол был основной сырьевой базой ГУП «Таджиккредмет» (бывшего Ленинабадского горно-химического комбината) до 1965 г. Добыча урановых руд велась как открытым способом (в карьере № 1), так и подземным.

Цель исследования – оценка радоновой обстановки на территории Северного Таджикистана.

Мирсаидов Улмас Мирсаидович

Агентство по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан

Адрес для переписки: 734025, Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33; E-mail: ulmas2005@mail.ru

Материалы и методы

Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана проводился с применением как интегрального метода измерения объемной активности (ОА) радона, так и мгновенного метода.

Мгновенные измерения ОА радона проводились с помощью радиометра радона РРА-01М-03. Измерительный комплекс, состоящий из радиометра РРА-01М-03 и пробоотборного устройства ПОУ-04, был использован для измерений плотности потока радона (ППР) по методике [2].

Интегральные измерения проводились с использованием твердотельных трековых детекторов на основе аллилдигликолькарбоната (CR-39) производства венгерской компании «Radosys, Ltd.» двух типов: RSKS и RSFV.

Детекторы типа RSKS наиболее часто применяются при радоновых обследованиях. Продолжительность экспонирования может составлять от 20 дней до 3 месяцев. Диапазон регистрируемых экспозиций составляет от 40 до 8000 КБк·ч/м³, предел насыщения составляет порядка 12 000 КБк·ч/м³.

Детекторы типа RSFV предназначены для проведения измерений в тех случаях, когда возможный диапазон значений ОА радона неизвестен и непредсказуем. Диапазон регистрируемых экспозиций составляет до 80 000 КБк·ч/м³, а предел насыщения составляет порядка 100 000 КБк·ч/м³, что позволяет во многих случаях избежать необходимости проведения повторных измерений из-за превышения предела насыщения стандартного детектора RSKS.

Для определения ОА радона на территории Северного Таджикистана было установлено более 770 трековых детекторов (табл. 1).

В районе Дигмайского хвостохранилища и пос. Гоziён были установлены 265 трековых детекторов. По периметру хвостохранилища с шагом 50 м около основной дамбы и далее через 100 м размещены трековые детекторы типа RSFV в количестве 52 шт., по продольному и поперечному профилям через чашу хвостохранилища закреплены 43

шт., по саю с выходом к пос. Гоziён – 24 шт. Поверхность Дигмайского хвостохранилища площадью 90 га до сих пор остается открытой. Эксхалляция радона в атмосферу существенно увеличилась после полного испарения воды в прудке и образования множества протяженных хаотично расположенных трещин высыхания глубиной от 1 до 3 м. В трещинах были размещены 10 детекторов типа RSKS, предел насыщения которых оказался в итоге превышен.

На южной окраине пос. Гоziён, ул. П. Бобокалонова и Т. Нурбоева, которые удалены на расстояние примерно 1–2 км от дамбы Дигмайского хвостохранилища, в помещениях жилых домов, с учетом количества проживающих там людей, были установлены 76 детекторов типа RSKS и еще 60 детекторов того же типа на открытом воздухе возле жилых домов.

В районах расположения санитарно-защитной зоны хвостохранилища «Карта 1–9» всего были установлены 30 детекторов типа RSKS. В центральной части хвостохранилища на глубину 1 м в специально пробитом шурфе были помещены 3 детектора типа RSKS, и предел их насыщения также был превышен. Один детектор был установлен внутри помещения охраны.

В жилых и общественных зданиях г. Бустон (бывший г. Чкаловск) были установлены 70 детекторов типа RSKS. Детекторы были размещены в медицинском диагностическом центре с 1 по 4 этаж (6 шт.), в гинекологическом отделении больницы (2 шт.), в клинической лаборатории медсанчасти (6 шт.), в аналитической лаборатории НПЦ «Технология» на двух этажах и в рабочей зоне полуподвального помещения (11 шт.), в общежитии и учебном корпусе Горно-металлургического института Таджикистана (11 шт.).

Для расчета средней суммарной годовой эффективной дозы облучения населения от радона и его дочерних продуктов распада, 20 детекторов типа RSKS были размещены сроком на один год в жилых массивах г. Бустон на первых этажах и 10 детекторов – в близлежащем индивидуальном секторе, расположенном на расстоянии около 1 км от хвостохранилища «Карта 19», северо-западнее пос. Окарык.

Таблица 1

Количество трековых детекторов, установленных в районах расположения радиационно-опасных объектов северного Таджикистана

[Table 1]

Number of track detectors installed in areas where radiation-hazardous sites are located in Northern Tajikistan]

№ п/п [No.]	Место установки детекторов [Detectors installation location]	Количество, шт. [Number, pcs.]
1	Дигмайское хвостохранилище, пос. Гоziён [Dehmoy tailings dam, Goziyon village]	265
2	Хвостохранилище «Карты 1–9», г. Бустон [Tailings dam "Dumps 1–9", Buston city]	100
3	Гафуровское хвостохранилище, г. Гафуров [Gafurov tailings dam, Gafurov city]	100
4	Хвостохранилища г. Истиклол и пос. Старый Табошар [Tailings dam of Istiklol city and Old Taboshar village]	167
5	Хвостохранилище № 2, пос. Адрасман [Tailings dam No.2, Adrasman village]	59
6	Отвалы месторождения Киик-Тал, г. Худжанд [Tailings of the Kiik-Tal deposit, Khujand city]	80
	Итого [Total]	771

В г. Гафуров в зданиях, расположенных поблизости от Гафуровского хвостохранилища, были установлены 100 детекторов типа RSKS. Из них 64 шт. были размещены в жилых помещениях и на балконах четырехэтажного дома на 32 квартиры, который расположен наиболее близко к хвостохранилищу. В трех одноэтажных двухквартирных домах по ул. Лахути были установлены 6 детекторов, еще 30 детекторов были размещены в жилом доме на 50 квартир и в комплексе зданий районной больницы, которые расположены к северу от хвостохранилища вдоль авто-

магистрали Худжанд – Гафуров. Детекторы были установлены, в основном, на первых этажах зданий.

На территории г. Истиклол были установлены 167 детекторов, из них 20 шт. – на поверхности хвостохранилища I–II очереди, 20 шт. – на поверхности хвостохранилища III очереди, 20 шт. – на поверхности хвостохранилища IV очереди, 20 шт. – на поверхности отвалов фабрики бедных руд, 12 шт. – вокруг карьера, а остальные 75 шт. – в жилых помещениях г. Истиклол и пос. Старый Табошар.

Таблица 2

Средние значения ОА и ЭРОА радона в атмосферном воздухе и воздухе помещений на исследованных территориях Северного Таджикистана

[Table 2]

Average values of outdoor and indoor radon concentration and radon equilibrium equivalent concentration (EEC) on the studied territories of the Northern Tajikistan

Место установки детекторов [Detectors installation location]	Количество, штук [Number, pcs.]	ОА радона, Бк/м ³ [Radon concentration, Bq/m ³]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]
Дигмайское хвостохранилище, пос. Гоziён [Dehmoy tailings dam, Goziyon village]			
Дигмайское хвостохранилище [Dehmoy tailings dam]	105	600	360
пос. Гоziён [Goziyon village]	160	42	25
Хвостохранилище «Карты 1–9», г. Бустон [Tailings dam "Dumps 1–9", Buston city]			
Хвостохранилище «Карты 1–9» [Tailings dam "Dumps 1–9"]	34	38	23
г. Бустон [Buston city]	56	47	19
пос. Окарык [Okaryk village]	10	37	22
Гафуровское хвостохранилище, г. Гафуров [Gafurov tailings dam, Gafurov city]			
Гафуровское хвостохранилище [Gafurov tailings dam]	30	55	33
г. Гафуров [Gafurov city]	70	61	24
Хвостохранилища г. Истиклол и пос. Старый Табошар [Tailings dam of Istiklol city and Old Taboshar village]			
Хвостохранилища г. Истиклол [Tailings dams of Istiklol city]	92	28	17
пос. Старый Табошар [Old Taboshar village]	26	140	56
Горный район на расстоянии 4 км от г. Истиклол [Mountainous area at 4 km distance from Istiklol city]	10	12	7
г. Истиклол [Istiklol city]	35	118	47
Здание бывшего полуразрушенного завода [Building of the former semi-destroyed plant]	4	1319	528
Хвостохранилище №2, пос. Адрасман [Tailings dam No.2, Adrasman village]			
Хвостохранилище №2 [Tailings dam No.2]	9	150	90
пос. Адрасман [Adrasman village]	50	88	35
Отвалы месторождения Киик-Тал, г. Худжанд [Tailings of the Kiik-Tal deposit, Khujand city]			
Отвалы месторождения Киик-Тал [Tailings of the Kiik-Tal deposit]	4	42	25
г. Худжанд [Khujand city]	76	32	13

В пос. Адрасман были установлены 59 трековых детекторов типа RSKS, из которых 9 шт. на поверхности хвостохранилища № 2, 3 шт. в производственном помещении (склад готовой продукции), а остальные в жилых зданиях поселка, расположенных на улицах Б. Гафурова (15 шт.), Фирдавси (15 шт.), Рудаки (9 шт.), Горького (4 шт.), Муминова (4 шт.).

Учитывая близость отвалов месторождения Киик-Тал к правобережным жилым микрорайонам г. Худжанд (около 2 км), а также с целью выявления возможного влияния материала рекультивированных отвалов из горных выработок рудника №3 на проживающее поблизости население города было размещено дополнительно вне плана 80 детекторов типа RSKS в жилых помещениях зданий правобережных микрорайонов г. Худжанд.

После окончания экспонирования трековых детекторов их обработка проводилась в аналитической лаборатории Научно-производственного центра «Технология» Государственного унитарного предприятия «Таджредмет» с использованием оборудования производства компании «Radosys, Ltd.».

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного на территории северного Таджикистана радонового мониторинга с использованием твердотельных трековых детекторов обобщены в таблице 2.

Необходимо отметить, что для пересчета ОА радона в эквивалентную равновесную объемную активность радона (ЭРОА) использовалось значение коэффициента радиоактивного равновесия F_{eq} , равное 0,4 для воздуха помещений и 0,6 для атмосферного воздуха, в соответствии с данными Научного

комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) 2000 и 2006 гг. и рекомендациями Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ).

Было установлено, что ОА радона в атмосферном воздухе вблизи «Карты 1–9» с увеличением высоты уменьшается. Если принять за 100% ОА радона на высоте 10 см от поверхности хвостохранилища, то на высоте 10 м ОА радона составит 87%, на высоте 20 м – менее 80%.

Результаты радиационного мониторинга на территории Дигмайского хвостохранилища показали, что средняя мощность амбиентной дозы на поверхности хвостохранилища достигает 20 мкЗв/ч, а ППР с поверхности хвостового материала достигает 65 000 мБк/(м²·с), при этом ОА радона в атмосферном воздухе над хвостохранилищем на разных участках варьирует от 200 до 1000 Бк/м³. Также установлено, что удельная активность ²³⁸U в хвостовом материале достигает 980 Бк/кг, а ²²⁶Ra – 7620 Бк/кг [3].

Результаты интегральных измерений на территории г. Бустон показывают, что среднее значение ОА радона в воздухе помещений составляет 47 Бк/м³ (см. табл. 2). В ходе исследования обнаружена некоторая связь между возрастом зданий и ОА радона в помещениях. Так, в помещении сравнительно нового здания (1987 г., ул. Мира) ОА радона составила всего 22 Бк/м³. В то же время в старом здании Горно-металлургического института Таджикистана (1945 г.), в котором не проводился капитальный ремонт более 70 лет, зарегистрированы самые высокие значения ОА радона – 47 Бк/м³.

Поверхность Гафуровского хвостохранилища покрыта лёссовидными суглинками толщиной до 2,5–3,0 м, и ППР с поверхности не превышает 100 мБк/(м²·с) при средних

Таблица 3

Средние значения ОА и ЭРОА радона в атмосферном воздухе на территории населенных пунктов Бободжан-Гафуровского района

[Table3]

Average values of outdoor radon concentration and radon EEC on the territory of settlements of the Bobojon-Gafurov district

Место измерения [Place of measurement]	Число мгновенных измерений [Number of instant measurements]	ОА радона, Бк/м ³ [Radon concentration, Bq/m ³]	ЭРОА радона, Бк/м ³ [Radon EEC, Bq/m ³]
Джамоат Гозиён [Goziyon jamoat]	34	42	25
Джамоат Ёва [Yova jamoat]	21	66	40
Джамоат Исмоил [Ismoil jamoat]	18	71	43
Джамоат Исфисор [Isfisor jamoat]	20	42	25
Джамоат Зарзамин [Zarzamin jamoat]	14	55	33
Джамоат Хистеварз [Khistevarz jamoat]	43	48	29
Джамоат Овчи-калacha [Ovchi-qalacha jamoat]	10	68	41
Джамоат Дадобой Холматов [Dadoboy Kholmatov jamoat]	30	47	28
Джамоат Унджи [Unji jamoat]	22	58	35
Джамоат Чашмасор [Chashmasor jamoat]	18	86	34
Джамоат Хайдар Усмонов [Haydar Usmonov jamoat]	12	69	41

значениях 40–60 мБк/(м²·с). Эти значения в 10–20 раз ниже предельных норм, установленных для территории хвостохранилищ, – 1000 мБк/(м²·с).

Результаты дополнительных мгновенных измерений ОА радона в атмосферном воздухе на территории населенных пунктов Бободжан-Гафуровского района с помощью радиометра радона PPA-01M-03 представлены в таблице 3.

Заключение

Анализ результатов выполненных работ показывает, что в настоящее время на территории Северного Таджикистана относительно высокие значения ОА радона в атмосферном воздухе наблюдаются в зонах расположения урановых хвостохранилищ, в первую очередь в г. Истиклол и Дигмайском хвостохранилище. Данное обстоятельство обусловлено прежде всего отсутствием защитных покрытий на поверхности хвостового материала, что превращает эту местность по сути в радоноопасные территории техногенного происхождения. Тем не менее, несмотря на высокое радоновыделение с поверхности хвостохранилищ, их территория не является на данный момент селитебной зоной и, соответственно, не оказывает влияния на радоновую обстановку в зданиях, расположенных поблизости населенных пунктов.

Для улучшения радоновой обстановки на территории Северного Таджикистана с учетом возможного расширения территории застройки населенных пунктов рекомендуется провести комплекс мероприятий по рекультивации территории объектов уранового наследия, в первую очередь урановых хвостохранилищ г. Истиклол и Дигмайского хвостохранилища.

Литература

1. Khakimov N., Nazarov Kh.M., Mirsaidov I.U. Physico-Chemical and Manufacturing Basis for Uranium Concentrator Production from Wastes of Hydrometallurgical Plants and Technical Waters. Dushanbe; 2012. 210 p.
2. Методика экспрессного измерения плотности потока радона с поверхности земли с помощью радиометра радона типа PPA. М.: ЦНИИ ГП «ВНИИФТРИ», 2006. 20 с.
3. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Саломов Д.А. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности бывших урановых объектов для населения г. Истиклол Республики Таджикистан // Радиационная гигиена. 2018. Т.11, №2. С. 83–90.
4. Назаров Х.М., Эрматов К.А., Бахронов С.М. и др. Оценка потенциальной радиационной опасности хвостохранилища Дигмай (Таджикистан) для населения, проживающего вокруг него // Радиационная гигиена. 2019. Т.12, №1. С. 115–121.

Поступила: 27.01.2020 г.

Мирсаидов Улмас Мирсаидович – доктор химических наук, академик Академии наук Республики Таджикистан, научный консультант Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан.
Адрес для переписки: 734025, Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33; E-mail: ulmas2005@mail.ru

Назаров Холмурод Марипович – главный научный сотрудник Филиала Агентства по ядерной и радиационной безопасности АН Республики Таджикистан в Согдийской области, Душанбе, Таджикистан

Шосафарова Шоира Гулмахмадовна – ведущий инженер Сектора контроля профессионального облучения Отдела научно-исследовательских и технических услуг Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан, Душанбе, Таджикистан

Махмудова Манижа Махкамовна – ассистент кафедры детских болезней Таджикского государственного медицинского университета им. Абуали ибн Сино, Душанбе, Таджикистан

Для цитирования: Мирсаидов У.М., Назаров Х.М., Шосафарова Ш.Г., Махмудова М.М. Радоновый мониторинг на территории Северного Таджикистана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 68–73.
DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73

Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan

Ulmas M. Mirsaidov¹, Kholmurod M. Nazarov¹, Shoir G. Shosafarova¹, Manizha M. Mahmudova²

¹Nuclear and Radiation Safety Agency of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan,

²Avicenna Tajik State Medical University, Dushanbe, Republic of Tajikistan

The article presents the results of radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan. Analysis of the results of the monitoring shows that at present, relatively high values of radon concentration in the atmospheric air are found in the areas where uranium tailings are located, primarily in the city of Istiklol and the Dehmoy tailings dam. This is primarily due to the lack of protective coatings on the surface of the tail material, which turns this area, in fact, into radon-prone areas of technogenic origin. In different parts of the Dehmoy tailings dam, the radon concentration in the atmospheric air varies between 200 and 1000 Bq/m³, and the radon flux density from the surface reaches 65,000 mBq/(m²·s). On the territory of tailings dam in the city of Istiklol, the value of radon concentration in the atmospheric air is in the range of 44–195 Bq/m³. At the same time, it was found that the radon potential of the tailings dams, where the surface has a protective coating, is

Ulmas M. Mirsaidov

Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy Sciences of the Republic of Tajikistan

Address for correspondence: prosp. Rudaki, 33, Dushanbe, 734025. Tadzhikistan; E-mail: ulmas2005@mail.ru

much lower. For example, the radon flux density from the surface of the Gafurov tailings dam, where surface is covered with loess-like loams up to 2.5–3.0 m thick, does not exceed 100 mBq/(m²·s), with average values of 40–60 mBq/(m²·s); the radon concentration in the atmospheric air is about 55 Bq/m³. Despite the intense exhalation of radon from the surface of some tailings dams, their territory is not currently a residential zone and, accordingly, does not affect the radon situation in buildings located in the settlements nearby. In the cities of Khujand, Buston, Gafurov, Istiklol and the village of Adrasman, the average values of indoor radon concentration do not exceed maximum permissible levels. It is recommended to conduct a full rehabilitation of uranium legacy sites, primarily uranium tailings dams in the city of Istiklol and Dehmoy tailings dam, for the improvement of the radon situation in Northern Tajikistan with consideration for possible expansion of the settlements.

Key words: tailings dam, uranium legacy, radon, concentration, radon flux density, monitoring, SSNTD, territory, building, jamoat.

References

1. Khakimov N, Nazarov KhM, Mirsaidov IU. Physico-Chemical and Manufacturing Basis for Uranium Concentrates Production from Waste of Hydrometallurgical Plants and Technical Waters. Dushanbe. 2012. 210 p.
2. Method for the rapid measurement of the radon flux density from the earth's surface using a RRA-type radon radiometer. Moscow: TsNII GP «VNIIFTRI»; 2006. 20 p. (In Russian)
3. Nazarov KM, Ermatov KA, Salomov DA, Bahronov SM, Mirsaidov UM. Assessment of potential radiation hazard of the former uranium facilities for the population of the Istiklol city of the republic of Tadjikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 83–90. (In Russian).
4. Nazarov KM, Ermatov KA, Bakhronov SM, Mukhamedova SG, Mirsaidov UM. Assessment of the potential radiation hazard of the Dehmoy tailings pond (Tajikistan) for the population living around it. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 115–121. (In Russian).

Received: January 27, 2020

For correspondence: Ulmas M. Mirsaidov – Doctor of chemical sciences, academic of the Academy of Sciences of the Tadjikistan Republic, scientific consultant of the Agency of the nuclear and radiation safety of the Academy of Sciences of the Tajikistan Republic (prosp. Rudaki, 33, Dushanbe, 734025. Tadjikistan; E-mail: ulmas2005@mail.ru)

Kholmurod M. Nazarov – principal researcher, Nuclear and Radiation Safety Agency of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Branch in Sogd region, Dushanbe, Tajikistan

Shoira G. Shosafarova – Lead engineer of the Sector of the control of the staff exposure of the Department of the scientific-research and technical services of the Agency of the nuclear and radiation safety of the Academy of Sciences of the Tajikistan Republic, Dushanbe, Tajikistan

Manizha M. Makhmudova – assistant of the chair of children diseases Abuali ibn Sino Tajik State Medical University, Dushanbe, Tajikistan

For citation: Mirsaidov U.M., Nazarov Kh.M., Shosafarova Sh.G., Mahmudova M.M. Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 68-73. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73

Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации тяжеловодного исследовательского ядерного реактора НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ

И.В. Медников¹, В.В. Васильев¹, А.С. Бусыгин¹, А.А. Собко²

¹ Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Акционерное общество «РАОПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Россия

В статье приведено краткое описание организационных и технических мер, направленных на обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации тяжеловодного исследовательского ядерного реактора Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Представлена информация об истории и особенностях эксплуатации реактора, в том числе параметры и характеристики, значимые для планирования и проведения работ. Приведены особенности нормативно-правового регулирования в области обеспечения радиационной безопасности, также рассмотрены нормативные акты и правила, сопутствующие прочим работам при выводе из эксплуатации и непосредственно связанные с радиационной безопасностью. Описаны выполненные работы по подготовке к демонтажу, исходное и текущее состояние установки, предстоящие работы с приведением примеров демонтируемого оборудования. Рассмотрены методы обращения с радиоактивными отходами, возникающими в ходе работ по выводу из эксплуатации, в том числе способы фрагментации крупных элементов конструкций (приведены примеры механических устройств), способы сортировки в соответствии с различной удельной активностью (высокоактивные, низкоактивные), радионуклидным составом и физическими свойствами (твердые, металлические, неметаллические, жидкие). Приведена информация о порядке радиационного контроля на всех этапах работ по демонтажу и на заключительных этапах вывода из эксплуатации, включая контроль помещений, персонала, оборудования, отходов различного типа, атмосферного воздуха.

Ключевые слова: исследовательская ядерная установка, вывод из эксплуатации, радиационная безопасность, радиоактивные отходы, радиационный контроль.

Введение

Тяжеловодный исследовательский ядерный реактор (далее – ТВР) расположен в Институте теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ), в Юго-западном административном округе г. Москвы. В 1987 г., после 37 лет эксплуатации, ТВР был остановлен. Поскольку реактор находится в густонаселённом районе, вблизи от исторического центра города, наиболее приемлемым вариантом вывода из эксплуатации является его полный демонтаж. Финансирование мероприятий по выводу из эксплуатации ТВР осуществляется в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

Реактор ТВР является первым тяжеловодным исследовательским реактором, созданным в Советском Союзе. Спроектированный и созданный в тяжёлых условиях по-

слевоенных лет, ТВР стал прототипом установок военного назначения, обеспечивших весомый вклад в обороноспособность страны на протяжении многих десятилетий. Сооружением ТВР были заложены основы для создания эффективных тяжеловодных реакторов с целью производства плутония, трития, освоения ториевого цикла и производства энергии. Научное руководство конструированием ТВР осуществлял возглавлявший лабораторию № 3 академик А.И. Алиханов. Значительный вклад в создание проекта реактора внесли В.В. Владимирский, С.Я. Никитин, С.А. Гаврилов, Л.Л. Гольдин, П.И. Христенко, Б.И. Шелкович (ОКБ Гидропресс, г. Подольск). Физический пуск установки состоялся 19 апреля 1949 г. Первоначальная мощность реактора составляла 0,5 МВт, в качестве топлива использовался естественный уран. С момента пуска на установке проводились работы по физике и технике реакторов; с 1951 г. начались эксперименты на нейтронных пучках и облучение образцов для получения искусственных радио-

Медников Иван Викторович

Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Адрес для переписки: 117218 Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25; E-mail: mednikov@itep.ru

изотопов [1, 2]. В дальнейшем аналогичные установки были построены советскими специалистами в Югославии (1959 г., тяжеловодный реактор RA в Институте ядерных исследований «Винча», Сербия) и Китайской Народной Республике (1957 г., HWR-101, Китайский институт атомной энергии) [3].

В 1957 г. была осуществлена реконструкция реактора. Были заменены внутренний корпус, технологические каналы, системы контроля и управления, усилена биологическая защита. Мощность возросла до 2,5 МВт; топливо – уран с обогащением 2% по урану-235. В 1963 г. реактор был переведен на топливо с обогащением 80% по урану-235 без изменения мощности. В 1978 г. была осуществлена замена трубопроводов 1 контура; в 1987 г. реактор был окончательно остановлен [1].

Нормативно-правовое регулирование в области обеспечения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации ТВР

Законодательство Российской Федерации определяет правовую основу и принципы регулирования отношений, возникающих при использовании атомной энергии, направлено на защиту здоровья и жизни людей, охрану окружающей среды, защиту собственности при использовании атомной энергии, призвано способствовать развитию атомной науки и техники, содействовать укреплению международного режима безопасного использования атомной энергии согласно Федеральному закону от 21.11.1995 г. № 170-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.) «Об использовании атомной энергии» [Federal Law of 11/21/1995 170-FZ (as amended on 07/26/2019) «On the use of atomic energy» (In Russ.)].

Согласно ст. 4, 26 Федерального закона «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 № 170-ФЗ, вывод из эксплуатации ядерной установки является одним из видов деятельности в области использования атомной энергии, подлежащих лицензированию. Правовые основы обеспечения радиационной безопасности населения определены Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 г. № 3-ФЗ.

Работы по выводу из эксплуатации исследовательской ядерной установки (далее – ИЯУ) должны выполняться в соответствии с принципами обеспечения безопасности, установленными в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии:

- «Общие положения обеспечения безопасности исследовательских ядерных установок» (НП-033-11);
- «Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения» (НП-091-14);
- «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации исследовательских ядерных установок» (НП-028-16);
- «Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации» (НП-067-16).

Кроме того, требования к обеспечению радиационной безопасности регламентированы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) и СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)». Радиационно-гигиенические требования по обеспечению

безопасности персонала и населения при проектировании, эксплуатации и выводе из эксплуатации исследовательских реакторов определяются санитарными правилами «Гигиенические требования к проектированию и эксплуатации ядерных реакторов исследовательского назначения СП ИР-03».

В связи с тем, что отработавшее ядерное топливо из активной зоны ТВР было вывезено ранее, на сегодняшний день вопросы обеспечения ядерной безопасности и обращения с ядерными материалами при выводе из эксплуатации ТВР неактуальны.

В соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации исследовательских ядерных установок» (НП-028-16) [Federal rules and regulations in the field of nuclear energy use «Safety rules for decommissioning of nuclear research installations» (NP-028-16) (In Russ.)], реализуемые на ИЯУ организационные и технические мероприятия должны обеспечивать:

- непревышение регламентируемых нормами радиационной безопасности основных пределов доз облучения работников (персонала) и населения, нормативов выбросов (сбросов) радиоактивных веществ (далее – РВ);
- снижение радиационного воздействия при выводе из эксплуатации на работников (персонал), население и окружающую среду до минимально возможных значений с учетом экономических и социальных факторов;
- исключение применения в хозяйственной деятельности материалов повторного использования, имеющих радиоактивное загрязнение выше установленных пределов.

Исходное состояние ТВР

Реактор ТВР – гетерогенный, корпусной с тяжеловодным замедлителем, отражателем и теплоносителем; номинальная мощность установки составляет 2,5 МВт. Общий вид реактора представлен на рисунке.

Графитовый отражатель толщиной 1 м заключен во внешний корпус. Боковая защита реактора состоит из бетона толщиной несколько метров. Защита верха реактора выполнена из четырех секций вертикального кольцевого бака, на который опираются два горизонтальных полукольцевых бака. Баки из стали СТ-3 заполнялись водопроводной водой. Горизонтальные баки имеют в центре разборную защиту в виде круглых дисков, а на стыке – 2 прямоугольных пенала, которые при съеме образуют щели для транспортировки технологических каналов. Диски и пеналы заполнены парафином. Нижняя часть защиты верха реактора выполнена в виде кольцевой чугунной плиты толщиной 550 мм, массой более 10 тонн, с пробкой в центре массой 5 тонн.

Наработка радиоактивных изотопов осуществлялась в 55 вертикальных каналах реактора; для выпуска нейтронных пучков служила тепловая колонна сечением 1,5 м и 9 горизонтальных каналов. Через бетонную защиту и графитовый отражатель до активной зоны проходят 3 горизонтальных канала. Все горизонтальные экспериментальные каналы имеют стальные шибера поворотного типа с дистанционным управлением и табло над устьем канала с указанием положения шибера.

С 1988 г. по настоящее время выполнены следующие работы по выводу из эксплуатации ТВР:

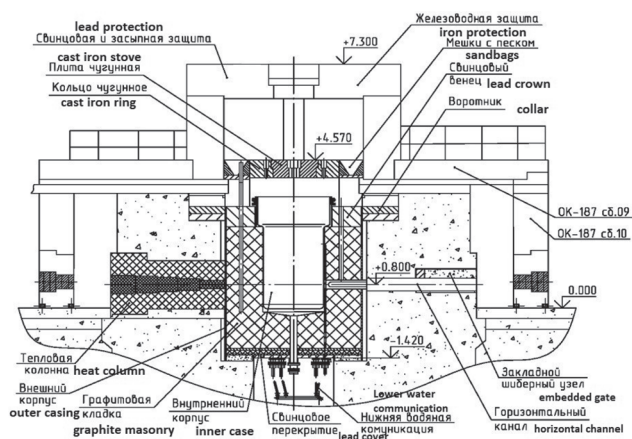


Рис. Общий вид реакторной установки ТВР
[Fig.] General view of the TVR reactor

- проведена частичная дезактивация территории, прилегающей к зданию ТВР;
- отработавшее ядерное топливо выгружено из активной зоны в бассейн выдержки и после трехлетней выдержки вывезено на ПО «Маяк»;
- тяжеловодный замедлитель удалён из активной зоны;
- демонтированы следующие конструкционные элементы:
 - трубопроводы и оборудование первого контура;
 - трубопроводы, оборудование и емкости газового контура;
 - системы вакуумирования бака реактора, первого и газового контуров;
 - загрязнённое радионуклидами оборудование системы контроля и систем управления защитой (СУЗ);
 - загрязнённое радионуклидами экспериментальное оборудование;
 - системы загрузки/выгрузки облучаемых изделий и изотопов;
 - во внутреннем корпусе реактора исполнительные органы системы управления и защиты (СУЗ), вертикальные экспериментальные каналы, засыпная защитная пробка;
 - бассейн выдержки [4, 5].

Общий вид реакторной установки изображен на рисунке.

На сегодняшний день остался незавершенным демонтаж оборудования, находящегося в пределах бетонной защиты реактора: железобетонная защита; свинцовая, чугунная и засыпная защита; вентиляционный короб; воротники; нижняя водяная коммуникация; внутренний алюминиевый корпус; свинцовый венец; элементы горизонтальных исследовательских каналов; тепловая колонна; графитовая кладка корпуса реактора; внешний стальной корпус; закладные шибберные узлы горизонтальных исследовательских каналов.

В период 2016–2018 гг. было проведено комплексное инженерное и радиационное обследование (КИРО) ТВР и прилегающей территории; разработана принципиальная программа вывода из эксплуатации ТВР и проект вывода из эксплуатации (далее – проект). Технологические решения, предусмотренные проектом, обеспечивают

безопасное проведение работ на всех этапах вывода из эксплуатации ТВР в соответствии с действующим законодательством в области использования атомной энергии. В период до 2025 г. запланировано выполнение следующих работ по выводу из эксплуатации ТВР:

- завершение подготовительного этапа: поставка оборудования для вывода из эксплуатации, строительно-монтажные работы (подготовка прилегающей территории, коммуникаций и здания реактора);
- основной этап: демонтаж конструкций реактора, сбор и вывоз радиоактивных отходов (РАО);
- заключительный этап: демонтаж оборудования, использовавшегося при выводе из эксплуатации, заключительное радиационное обследование, благоустройство территории.

В соответствии с разработанным проектом вывода из эксплуатации радиационная обстановка на площадке ТВР после окончания работ по выводу из эксплуатации должна отвечать следующим критериям:

- мощность дозы гамма-излучения на расстоянии 10 см от поверхности грунта – не более 0,3 мкЗв/ч;
- поверхностное загрязнение альфа-активными радионуклидами (плотность потока альфа-частиц) – не более 0,04 см²·с⁻¹;
- поверхностное загрязнение бета-активными радионуклидами (плотность потока бета-частиц) – не более 0,4 см²·с⁻¹.

Приведенные критерии соответствуют положениям МУ 2.6.1.2398-08 «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности» [Radiation monitoring and sanitary-epidemiological assessment of land for the construction of residential houses, buildings and structures for public and industrial purposes in terms of radiation safety. Methodical instructions 2.6.1.2398-08 (In Russ.)] и МУ 2.6.5.032-2017 «Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей» [Surface contamination control. Methodical instructions 2.6.5.032-2017 (In Russ.)].

Обращение с радиоактивными отходами, образующимися при выводе из эксплуатации ТВР

В соответствии с действующим законодательством, основными целями при обращении с радиоактивными отходами (далее – РАО) являются:

- обеспечение надежной защиты работников (персонала) и населения от радиационного воздействия РАО сверх установленных нормами радиационной безопасности уровней;
- обеспечение надежной изоляции жидких и твердых РАО от окружающей среды, защита настоящего и будущих поколений, биологических ресурсов от радиационного воздействия сверх пределов, установленных нормами радиационной безопасности;
- предотвращение при обращении с РАО выбросов (сбросов) радиоактивных веществ в окружающую среду в количествах, превышающих пределы, установленные в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» (НП-058-14)

[Federal Rules and Regulations in the Field of Nuclear Energy Use «Safety in Radioactive Waste Management. «General Provisions» (NP-058-14) (In Russ.)].

Особое внимание при выполнении работ по выводу из эксплуатации ТВР уделяется вопросам обеспечения радиационной безопасности. В соответствии с разработанным проектом вывода из эксплуатации с помощью специальных средств технологического оснащения предполагается осуществить фрагментацию крупногабаритных конструкций ТВР и их последующую передачу на захоронение. Все работы по резке радиоактивно загрязнённых конструкций выполняются при строгом соблюдении соответствующих мер безопасности; в частности, проектом предусмотрена система пылеподавления («шатер» и локальная система вытяжной вентиляции), а разрезка графитовой кладки производится под слоем воды во избежание образования радиоактивной графитовой пыли. Вытяжная вентиляция, обеспечивающая отток воздуха из реакторного зала, оборудована фильтрами, предотвращающими попадание радиоактивных веществ в окружающую среду, а также системой радиационного контроля.

Обращение с твёрдыми радиоактивными отходами

Разрезку большей части демонтируемого оборудования на транспортабельные элементы предполагается производить с помощью машины для резки Braun-BKS12, разборку графитовой кладки реактора – при помощи роботизированной демонтирующей машины BROKK 110 под слоем воды. Вода используется для предотвращения пыления графита при его фрагментации.

При сборе образующихся твёрдых радиоактивных отходов (далее – ТРО) проектом предусмотрена их сортировка в соответствии с удельной активностью, радионуклидным составом и физической природой. Сбор ТРО проводится в последовательности, обеспечивающей минимально возможное облучение работников, и осуществляется в специально отведенных и соответствующим образом оборудованных местах [6, 7]:

- высокоактивные ТРО размещаются в защитных контейнерах для высокоактивных радиоактивных отходов (далее – ВАО) и вывозятся на хранение в специализированную организацию;

- низкоактивные ТРО упаковываются в многослойные бумажные и полиэтиленовые мешки или пленку (крупногабаритные фрагменты), которые затем складываются в контейнеры. Упаковки РАО проходят паспортизацию и вывозятся на хранение в специализированную организацию с последующей передачей на захоронение;

- металлические ТРО больших размеров, подлежащие переработке, дезактивируются и покрываются в несколько слоёв полиэтиленовой пленкой, предотвращающей распространение радионуклидов в окружающую среду. Размещаются в контейнерах УКТН-24000 и направляются к месту переработки в специализированную организацию с последующей передачей на захоронение.

Основным методом переработки образующихся ТРО на месте при выводе из эксплуатации ТВР является измельчение (фрагментация). Данный вид переработки ТРО обеспечивает уменьшение объема РАО. Фрагментирование металлических ТРО производится путем плазменной, газовой или механической резки. При резке ТРО предусмотрены технические средства (пыле-

отсосы) для очистки воздуха в помещении от радиоактивной пыли и аэрозолей. Дополнительно производится удаление пыли с помощью штатной или местной спецвентиляции, оснащенной фильтрами.

Обращение с жидкими радиоактивными отходами

При выводе из эксплуатации ТВР, помимо твердых, образуются жидкие радиоактивные отходы (далее – ЖРО). Для предотвращения распространения графитовой пыли по помещению экспериментального зала демонтаж графитовой кладки предполагается осуществлять под слоем воды. При демонтаже графитовой кладки реактора образуется несколько кубометров низкоактивных жидких радиоактивных отходов. Заполнение емкости реактора с графитовой кладкой производится из системы хозяйственно-питьевого водоснабжения один раз с использованием гибких шлангов.

Для сбора жидких радиоактивных отходов в корпусе 7 (ТВР) предусмотрена система сбора ЖРО, состоящая из самотечных, отводящих трубопроводов с запорной арматурой и емкостями для сбора ЖРО, установленными в подвальном помещении корпуса 7.

Доступ к хранилищу ЖРО осуществляется через технологические проемы с люками, расположенными в ремонтном коридоре горячей лаборатории. Существующее хранилище представляет собой четыре заглубленных емкости из бетонных резервуаров, облицованных нержавеющей сталью, объемом 10 м³ каждая. Опорожнение емкости реактора производится постепенно в одну из емкостей через систему, включающую в себя трубопровод, механический фильтр для удаления графитовых частиц, запорную арматуру. Применяемый механический фильтр позволяет осуществить фильтрацию всего объема ЖРО без промывок.

Из емкостей для сбора ЖРО при помощи насосов стоки перекачиваются в цистерну спецавтотранспорта и направляются на переработку в специализированную организацию. После завершения сбора ЖРО система демонтируется; все её элементы являются низкоактивными РАО.

Организационно-технические мероприятия, обеспечивающие радиационную безопасность при проведении работ по выводу из эксплуатации ТВР. Ожидаемые дозы облучения персонала

Разработана система технических и организационных мер защиты, учитывающая возможное радиационное воздействие объекта на персонал, население и окружающую среду [8].

Работы по демонтажу конструкций ТВР проводятся персоналом, отнесенным к группе А, предел дозы для которого составляет 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год, согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [Radiation safety standards (NRB-99/2009): SanPiN 2.6.1.2523-09 (In Russ.)]

Исходя из проведенной оценки радиационной обстановки на рабочих местах, ожидаемая доза облучения персонала при выполнении работ по демонтажу конструкций реактора не превысит предельных значений, установленных НРБ 99/2009.

При подготовке к работам учитывается имеющаяся информация о загрязнённости места проведения работ.

Исходя из этих данных, принимается решение об использовании тех или иных средств индивидуальной защиты (СИЗ) персонала, проводящего работу, а также комплекта средств, инструментов и агрегатов для проведения работ.

Основной комплект СИЗ состоит из:

- комбинезона или костюма (куртка, брюки);
- шапочки или шлема;
- спецбелья;
- носков или портянок;
- спецобуви;
- хлопчатобумажных и резиновых перчаток;
- полотенца и носовых одноразовых платков.

Дополнительные СИЗ – из пленочных материалов и материалов с полимерным покрытием (полухалаты, полукombineзоны, фартуки, чехлы, бахилы).

Средства защиты органов дыхания – респираторы.

Средства защиты глаз – защитные очки, защитные щитки.

При необходимости (аварийные ситуации и работы с высокоактивными отходами) используется мобильный радиационно-защитный комплект. Для обмыва костюма применяется переносной мобильный саншлюз (дегазационная кабина «ДЕКОН»).

Полы по пути транспортирования груза к транспортному шлюзу от участка упаковки выстилаются дезактивационными матами для предотвращения распространения радиоактивных веществ. Дезактивационные маты являются эффективным средством борьбы с загрязнением обуви и транспортных средств на выходе из «грязной» зоны; их размер составляет 116×45 см, материал – полиуретан с адгезивным слоем. На обратной стороне комплекта располагаются фиксирующие липкие элементы. Каждый мат представляет собой пакет из 30 листов. Средний срок использования каждого листа составляет 1–4 дня в зависимости от интенсивности движения. Листы в комплекте пронумерованы, что облегчает их учёт.

Все работы по демонтажу и дезактивации внутри помещений производятся с использованием специализированного инструмента с пылеотсосами (эффективность 95%) и передвижной фильтровентиляционной установки по месту производства работ. Мероприятия по дезактивации позволяют снизить дозовые нагрузки на персонал при проведении демонтажных работ, а также препятствуют распространению радиоактивных веществ.

В ходе вывода из эксплуатации ТВР будут проведены работы, обеспечивающие радиационную безопасность персонала, которые включают дезактивацию поверхностей технологического оборудования, строительных конструкций, воздухопроводов и электротехнического оборудования, загрязнённых радионуклидами.

В ходе выполнения работ по выводу из эксплуатации ТВР предполагается применение следующих методов дезактивации:

- механическая;
- пенная;
- дезактивация плёнообразующими составами.

Механические методы используются, в основном, для дезактивации поверхностей строительных конструкций. Дезактивация поверхностей происходит за счет механического удаления поверхностного слоя материала с содержащимися в нем радионуклидами. Краска, штукатурка или бетонная стяжка в местах, где имеется радио-

активное загрязнение, снимается при помощи углошлифовальной машины со специальными насадками, оснащенной системой пылеудаления (удаление 95% от общего количества пыли) при работающей фильтровентиляционной установке.

Дезактивация поверхностей пеной моющих растворов значительно сокращает расход реагентов и позволяет исключить образование ЖРО. Малоотходным методом дезактивации является применение *легкосъемных защитных и дезактивирующих полимерных покрытий*, которые одновременно являются изолирующими. Для дезактивации оборудования, элементов инженерных систем используются растворы, не являющиеся легковоспламеняющимися жидкостями, в соответствии с ТУ на применяемые дезактивирующие растворы: ТУ 2381-006-78102670-2009, ТУ2381-008-78102670-2009, ТУ 6991-005-78102670-2009. Жидкостная дезактивация раствором проводится протиркой тканью, смоченной в растворе. Образующиеся вторичные отходы (ветошь) являются ТРО.

Критериями окончания дезактивации считаются установившиеся значения радиоактивного загрязнения (допустимые уровни радиоактивного загрязнения поверхностей рабочих помещений и находящегося в них оборудования, кожных покровов, спецодежды, спецобуви и других средств индивидуальной защиты персонала), согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09)[Radiation safety standards (NRB-99/2009) SanPiN 2.6.1.2523-09 (In Russ.)]. Указанные критерии приведены в таблице 1.

Таблица 1
Критерии радиоактивного загрязнения поверхностей
[Table 1
Criteria for radioactive contamination of surfaces]

Объект загрязнения [Contamination object]	Альфа-активные нуклиды [Alpha active nuclides]		Бета- активные нуклиды [Beta active nuclides]*
	Отдельные [separate]	Прочие [other]	
Поверхности помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования [The surface of the premises of the permanent stay of personnel and equipment located in them]	5	20	2000

В ходе проведения комплексного инженерного и радиационного обследования на территории, прилегающей к зданию ТВР, были выявлены участки радиоактивно загрязнённого грунта, общий объём которого оценивается в несколько десятков кубометров. Мощность дозы гамма-излучения на загрязнённых участках достигает 5,2 мкЗв/ч; наиболее весомый вклад в активность грунта вносят следующие радионуклиды: Cs-137 (удельная активность достигает 184 кБк/кг), Co-60 (до 1,2 кБк/кг). Таким образом, уровень загрязнения грунта превышает величины, допускающие использование площадки для дальнейшего целевого назначения (земельные участки под строительство зданий и сооружений общественного

назначения), и проектом вывода из эксплуатации предусмотрены мероприятия по реабилитации территории.

Перед началом проведения работ по удалению грунта будет производиться радиационное обследование участка с определением мощности дозы гамма-излучения на расстоянии 0,1 м от поверхности грунта. По результатам обследования определяется общая площадь загрязнений и границы залегания радиоактивных отходов и грунтов. Производится разбивка территории на участки.

Территория вокруг участка радиоактивного загрязнения застилается полиэтиленовой пленкой толщиной не менее 300 мкм, что позволяет предотвратить неконтролируемое распространение радионуклидов за границы участка радиоактивного загрязнения. На пленку устанавливается транспортный контейнер типа КРАД [9]; его поверхность обрабатывается стрейч-пленкой для исключения радиоактивного загрязнения. В качестве первичной упаковки используются металлические бочки.

Удаление загрязненного грунта производится шанцевым инструментом. Для уменьшения пыления в рабочей зоне предусматривается пылеподавление полимерным составом ВА-501. Персонал обеспечивается средствами индивидуальной защиты.

Во время проведения работ по выемке грунта в режиме реального времени производится непрерывное гамма-сканирование территории портативным гамма-спектрометром. По результатам сканирования определяются области однородных загрязнений, которые затем разрабатываются.

Заполненные контейнеры закрывают крышкой, освобождают от стрейч-пленки и проводят радиационный контроль наружной поверхности контейнера на предмет поверхностного загрязнения; при необходимости проводится дезактивация поверхности контейнеров тканью, смоченной дезраствором ДЕЗ-4. После проведения радиационного контроля заполненные контейнеры транспортируют погрузчиком на участок паспортизации, а затем на площадку временного хранения контейнеров, где они остаются до формирования транспортной партии и вывоза на переработку и захоронение на специализированное предприятие. Удаление загрязненного грунта

производится до «чистого» грунта. Замеры активности производятся переносными приборами.

После удаления всех участков радиоактивного загрязнения производится выравнивание территории с восстановлением плодородного слоя почвы для сохранения отметок и планировки, установленных генпланом, восстановление нарушенных автомобильных проездов (при необходимости) и получение заключения о радиоактивном состоянии площадки.

Радиационный контроль при проведении работ по выводу из эксплуатации ТВР

Для обеспечения радиационного и дозиметрического контроля в ходе выполнения работ по выводу из эксплуатации ТВР в НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ создана и аккредитована лаборатория радиационного контроля, укомплектованная квалифицированными специалистами согласно штатному расписанию и располагающая оборудованием, необходимым для выполнения соответствующих измерений. Радиационный контроль осуществляется на всех этапах вывода из эксплуатации ТВР [8].

Предусматривается радиационный контроль в следующем объеме:

- контроль радиационной обстановки в помещениях;
- контроль уровня загрязнения радиоактивными веществами поверхностей помещений и оборудования, кожных покровов, спецодежды и обуви работников;
- контроль эффективности работы воздухоочистного оборудования вентиляции;
- радиационный контроль ТРО и ЖРО, образующихся в процессе дезактивационных и демонтажных работ;
- контроль уровня загрязнения транспортных средств;
- индивидуальный контроль облучения персонала;
- контроль окружающей среды.

Для проведения радиационного контроля используются:

- мобильные, переносные и носимые средства контроля;
- средства пробоотбора.

Периодичность контроля представлена в таблице 2.

Периодичность радиационного контроля при обращении с РАО

Таблица 2

[Table 2]

The frequency of radiation monitoring during the management of radioactive waste]

Наименование объекта [Object name]	Вид РК [Type of radiation monitoring]	Периодичность контроля [Frequency of control]	Количество измерений [Number of measurements]
Оборудование, строительные конструкции [Equipment, building constructions]	Контроль мощности дозы гамма-излучения [Gamma radia- tion dose rate control]	Ежедневно [Daily]	9000
Оборудование, строительные конструкции [Equipment, building constructions]	Контроль загрязнения альфа- и бета-радионуклидами поверхностей [Alpha and beta ra- dionuclide contamination control of surfaces]	Ежедневно [Daily]	9000
Персонал [Staff]	ИДК [Dosimetric control]	Ежедневно [Daily]	27 000

Наименование объекта [Object name]	Вид РК [Type of radiation monitoring]	Периодичность контроля [Frequency of control]	Количество измерений [Number of measurements]
Производственные помещения [Industrial premises]	Контроль мощности дозы гамма-излучения [Gamma radia- tion dose rate control]	Ежедневно [Daily]	2700
Производственные помещения [Industrial premises]	Контроль альфа- и бета- загрязнения [Alpha and Beta contamination control]	Ежедневно [Daily]	5400
Производственные помещения [Industrial premises]	Контроль объемной активности аэрозолей в воздухе [Monitoring aerosol volumetric activity in air]	Ежедневно [Daily]	2700
Газоаэрозольные выбросы в атмосферу [Aerosol emissions]	Контроль радиоактивного загрязнения выбросов в атмосферу [Air pollution control]	Ежедневно [Daily]	900

При проведении обследования объекта для получения заключения о признании объекта радиационно безопасным необходимо произвести 34 200 замеров (сетка с шагом 1 м по стенам, полам и потолкам). Вид и количество замеров, которые необходимо осуществить при обращении с РАО, приведены в таблице 3.

Таблица 3

**Вид и количество измерений,
проводимых при обращении с РАО**

[Table 3]

**The type and number of measurements taken when handling
radioactive waste]**

№ п/п	Вид измерений [Type of measurement]	Количество измерений [Number of measurements]
1	Замеры поверхностного за- грязнения транспортных контей- неров [Measurement of surface contamination of transport containers]	350
2	Измерения на установке паспорти- зации контейнеров [Measurements at the container certification system]	235
3	Замеры поверхностного загрязнения транспортного средства для пере- возки контейнеров [Measurement of surface contamination of a container transport vehicle]	140
4	Контроль индивидуальных доз пер- сонала [Control of individual doses of personnel]	27 000

Контроль радиационной обстановки в помещениях включает в себя:

- контроль мощности дозы (МД) гамма-излучения с помощью дозиметра-радиометра МКС-1117М с блоками детектирования БДПС-02, БДКГ-05;
 - обнаружение и идентификацию радионуклидов с помощью носимого спектрометра МКС-АТ6102А;
 - определение объемной активности альфа- и бета-активных аэрозолей в воздухе помещений:
- а) непрерывно с помощью мобильной установки для измерения объемной активности радиоактивных аэрозолей УДА-1АБ;

б) методом осаждения аэрозолей на фильтры АФА-РМП(РСП)-20 с помощью портативного расходомера-пробоотборника газоаэрозольных смесей ПВП-06 с последующим радиометрическим и спектрометрическим анализом (отбор – непрерывный, контроль – периодический).

С целью контроля уровня радиоактивного загрязнения поверхностей строительных конструкций, демонтируемого оборудования до и после дезактивации, фрагментов ТРО, первичной упаковки и контейнеров с ТРО, спецавтотранспорта применяется носимый дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоками детектирования БДПА-01 и БДПБ-01.

Контроль загрязнения радиоактивными веществами кожных покровов, обуви, одежды персонала осуществляется в санпропускнике. Для контроля эффективности воздухоочистного оборудования производится определение объемной активности радиоактивных аэрозолей в воздухе до и после фильтров вентсистем с помощью мобильной установки для измерения объемной активности радиоактивных аэрозолей УДА-1АБ (отбор – непрерывный, контроль – периодический).

Для определения удельной активности и радионуклидного состава ТРО и ЖРО применяется установка спектрометрическая СКС-99 «Спутник» с комплектами оборудования для измерения содержания альфа-, бета- и гамма-излучающих нуклидов.

Индивидуальный контроль внешнего облучения персонала производится с помощью микропроцессорных прямопоказывающих сигнализирующих индивидуальных дозиметров ДКГ-АТ2503А. Предусматривается 100% резервирование дозиметров.

Радиационный контроль территории защищенной зоны (измерение мощности дозы гамма-излучения, плотности потока бета-излучения, в случае обнаружения радиационных загрязнений – плотности потока альфа-излучения) осуществляется с использованием носимых дозиметров-радиометров ДКС-96 с блоками детектирования БДЗБ-96, БДКС-96с, БДПГ-96, БДЗА-96т и спектрометра МКС-АТ6102А.

Все применяемые средства измерения имеют возможность подключения к ПЭВМ для автоматизации сбора, хранения и представления полученной информации.

Заключение

Вывод из эксплуатации тяжеловодного исследовательского ядерного реактора, расположенного на площадке НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, подразумевает проведение работ по демонтажу конструктивных элементов установки и вывозу образующихся РАО при безусловном соблюдении мер радиационной безопасности.

Разработанный проект вывода из эксплуатации предусматривает комплекс мероприятий, направленных на обеспечение радиационной безопасности персонала, осуществляющего работы по выводу из эксплуатации, и населения прилегающих районов. Непрерывный радиационный контроль при выполнении работ гарантирует нераспространение радионуклидов за пределы рабочих помещений в количествах, превышающих предельно допустимые значения.

В конечном итоге реализация данного проекта позволит избавиться от рисков, обусловленных нахождением неиспользуемого радиационно-опасного объекта в густонаселенном районе г. Москвы.

Литература

1. Кочуров Б.П., Селиверстов В.В. Разработка тяжеловодных ядерных реакторов. Научные исследования и разработки ИТЭФ. Сборник статей «Становление и деятельность института. Тяжеловодные реакторы. Исследования

при низких энергиях» (часть 1). М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, 2017. С. 44-62.

2. Выдающиеся ученые ИТЭФ. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. 76 с.
3. Круглов А.К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. 2-е изд., испр. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1995. 380 с.
4. Волков Е.Б., Шведов О.В., Гаврилин Н.Д. и др. Вывод из эксплуатации исследовательского тяжеловодного реактора ТВР ИТЭФ. М.: ИТЭФ, 2003. 18 с.
5. Шведов О.В. и др. Проблемы вывода из эксплуатации исследовательского тяжеловодного реактора ТВР ИТЭФ. Доклады конференции «Усовершенствованные тяжеловодные реакторы». Москва, 18-20 ноября 1997 г. М.: ИТЭФ, 1998. С. 112-119.
6. Абалкина И.Л., Линге И.И. Особенности обращения с РАО от вывода из эксплуатации // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 6–15.
7. Гатауллин Р.М., Медеяев И.А., Шарафутдинов Р.Б. Перспективные технологии для решения проблем безопасного обращения с радиоактивными отходами // Ядерная и радиационная безопасность. 2008. № 4(50). С. 68–75.
8. Оценка воздействия на окружающую среду. Книга 1. СПб.: АО «РАОПРОЕКТ», 2017. 231 с.
9. Сорокин В.Т. и др. Контейнеры для радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности // Ядерная и радиационная безопасность. 2013. № 2 (68). С. 15-22.

Поступила: 26.12.2019 г.

Медников Иван Викторович – исполняющий обязанности заместителя директора по научной работе, заместитель главного инженера по ядерной и радиационной безопасности, начальник отдела Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Адрес для переписки: 117218, Россия, Москва, ул. Большая Черемушkinsкая, 25; E-mail: mednikov@itep.ru

Васильев Валерий Васильевич – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

Бусыгин Алексей Сергеевич – инженер Института теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

Собко Александр Анатольевич – генеральный директор акционерного общества «РАОПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Медников И.В., Васильев В.В., Бусыгин А.С., Собко А.А. Обеспечение радиационной безопасности при выводе из эксплуатации тяжеловодного исследовательского ядерного реактора НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ. Радиационная гигиена. 2020. Т.13, № 1. С. 74–83. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-74-83

Provision of the radiation safety for the decommissioning of the heavy-water research nuclear reactor NRC «Kurchatov Institute» – ITEP

Ivan V. Mednikov¹, Valeriy V. Vasilyev¹, Aleksey S. Busygin¹, Aleksandr A. Sobko²¹Institute for Theoretical and Experimental Physics after A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute»²Joint Stock Company «RAOPROEKT»

The article provides a brief description of organizational and technical measures aimed at ensuring radiation safety during the decommissioning of the heavy-water research nuclear reactor of Institute for Theoretical and Experimental Physics after A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute». Information is provided on the history and features of the operation of the reactor, including parameters and characteristics that are significant for planning and conducting work. The peculiarities of legal regulation in the field of ensuring radiation safety are given; regulatory acts and rules accompanying other activities during decommissioning and directly related to radiation safety are also considered. The paper describes the work done in preparation for dismantling, the initial and current state of the installation, forthcoming work with examples of dismantled equipment. Methods for handling radioactive waste arising during decommissioning are considered, including methods for fragmentation of large structural elements (examples of mechanical devices are given), methods for sorting according to different specific activity (high activity, low activity), radionuclide composition and physical properties (solid, metallic, non-metallic, liquid). A special method for handling liquid radioactive waste is described, which includes the collection and temporary storage system. To assess the radiation situation at workplaces during the dismantling of the reactor structures, calculations of radiation transfer were carried out on the running and shutdown reactor, during which it was established that the expected dose to the personnel when performing activities on decommissioning of TBR is much lower than the limit values, established by regulatory documents. In accordance with the estimated radiation doses, rules and instructions for personnel were determined, including the procedure for using personal protective equipment, the necessary measures for surface decontamination, etc. Information is given on the procedure for radiation monitoring at all stages of dismantling and at the final stages of decommissioning including control of premises, personnel, equipment, waste of various types, atmospheric air.

Key words: nuclear research facility, decommissioning, radiation safety, radioactive waste, radiation monitoring.

References

1. Kochurov BP, Seliverstov VV. Development of heavy water nuclear reactors. ITEP research and development. Collection of articles «The Formation and Activities of the Institute. Heavy water reactors. Research at low energies». Part 1. NRC «Kurchatov Institute» – ITEP. 2017: 44-62. (in Russian).
2. Outstanding IEF Scientists. NRC «Kurchatov Institute» – ITEP. 2015: 76 (in Russian).
3. Kruglov AK. How the nuclear industry was created in the USSR – 2nd ed., Rev. Atominform. 1995: 380 (in Russian).
4. Volkov EB, et al. Decommissioning of the ITEP TVR heavy water research reactor. NRC «Kurchatov Institute» – ITEP. 2003: 18 (in Russian).
5. Shvedov OV, et al. Problems of decommissioning the ITEP TVR heavy water research reactor. Reports of the conference «Advanced Heavy Water Reactors». 1997 November 18 – November 20; Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – ITEP. 1998: 112-119. (in Russian).
6. Abalkina IL, Linge II. Features of the radioactive waste management for the decommissioning. *Radioactive Waste*. 2018;3(4): 6-15. (in Russian).
7. Gataullin RM. Perspective technologies for the management of the issues of the safe radioactive waste handling. *Yadernaya i radiatsionnaya besopasnost=Nuclear and Radiation Safety Journal*. 2008;4(50): 68-75. (in Russian).
8. Environmental impact assessment. Book 1. RAOPROEKT JSC. 2017; 231 (in Russian).
9. Sorokin V.T. Containers for the radioactive waste of the low and average level of activity. *Yadernaya i radiatsionnaya besopasnost=Nuclear and Radiation Safety Journal*. 2013;2(68): 15-22. (in Russian).

Received: December 26, 2019

For correspondence: Ivan V. Mednikov – Acting deputy director on the scientific work, deputy chief engineer on the nuclear and radioactive safety, head of the department, Institute for Theoretical and Experimental Physics name A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute». (Bolshaya Cheremushkinskaya ul., 25, Moscow, 117218, Russia; E-mail: mednikov@itep.ru)

Ivan V. Mednikov

Institute for Theoretical and Experimental Physics name A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute»

Address for correspondence: Bolshaya Cheremushkinskaya ul., 25, Moscow, 117218, Russia; E-mail: mednikov@itep.ru

Valeriy V. Vasilyev – PhD, scientific secretary, Institute for Theoretical and Experimental Physics name A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Aleksey S. Busygin – engineer, Institute for Theoretical and Experimental Physics name A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Aleksandr A. Sobko – Director general of the Joint Stock Company «RAOPROEKT», Saint-Petersburg, Russia

For citation: Mednikov I.V., Vasilyev V.V., Busygin A.S., Sobko A.A. Provision of the radiation safety for the decommissioning of the heavy-water research nuclear reactor NRC «Kurchatov Institute» – ITEP. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 74-83. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-74-83

Профессор Федор Григорьевич Кротков – главный гигиенист Красной армии

В.Ф. Панин¹, В.И. Чередникова²

¹ Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Рязань, Россия

² Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Рязанской области, Рязань, Россия

В статье дается краткая информация о жизненном пути и деятельности первого заведующего кафедрой радиационной гигиены Центрального института усовершенствования врачей, академика, доктора медицинских наук, профессора, генерал-майора медицинской службы Ф.Г. Кроткова в области военной гигиены в период ее становления в советском здравоохранении, в предвоенные годы и во время Великой Отечественной войны. Показано направление научной работы Ф.Г. Кроткова на кафедре гигиены Военно-медицинской академии и вклад в основание авиационного научно-исследовательского санитарного института Рабоче-крестьянской Красной армии и специального НИИ питания Красной армии, а также его роль в повышении боеспособности армии и Военно-морского флота в качестве руководителя гигиенического отдела Главного военно-санитарного управления Красной армии. Отражена также деятельность профессора Ф.Г. Кроткова по развитию радиационной гигиены в качестве руководителя первой в стране профильной кафедры в Центральном институте усовершенствования врачей. Излагаются сведения об увековечивании имени профессора Кроткова на его малой родине в с. Мосолово Рязанской области и в городе Москве, где он работал долгие годы.

Ключевые слова: Кротков Федор Григорьевич, радиационная гигиена, военная гигиена, санитарно-гигиенические и противоэпидемические мероприятия в войсках.

Введение

Уроженец с. Мосолово Спасского уезда Рязанской губернии, академик Академии медицинских наук СССР, доктор медицинских наук, профессор, генерал-майор медицинской службы, Герой Социалистического Труда, лауреат Государственной премии Федор Григорьевич Кротков (1896–1983) оставил яркий след в истории отечественной профилактической медицины.

Его талант ученого, педагога и государственного деятеля особенно ярко проявился в области военной, авиационной и радиационной гигиены, организации академической медицинской науки и работы государственной санитарной инспекции страны в трудные послевоенные годы, в развитии государственной санитарно-эпидемиологической службы и Всесоюзного научного общества гигиенистов.

Становление ученого–исследователя в области военной и авиационной гигиены

Федор Григорьевич был участником нескольких войн. Первую мировую он прошел от рядового до подпоручика – командира взвода на Германском фронте. После де-

мобилизации, вернувшись с фронта и имея гражданскую специальность «Аптечное дело, фармацевт», Кротков становится заведующим здравотделом в родном Спасском уезде. Отсюда в 1919 г. он уходит на Восточный фронт в составе Рязанского коммунистического полка. Пройдя Гражданскую войну комиссаром различных санитарных частей, он завершил ее в 11-й отдельной Кавказской армии под командованием легендарного М.В. Фрунзе.

После разгрома А.В. Колчака, являясь до 1924 г. комиссаром санитарной части Вооруженных сил Украины и Крыма, Ф.Г. Кротков одновременно проходил обучение на вечернем отделении Харьковского медицинского института. Его – студента третьего курса, по рекомендации командарма М.В. Фрунзе, направили в Ленинград на учебу в Военно-медицинскую академию (ВМА), которую он окончил в 1926 г.

Здесь, на кафедре общей и военной гигиены Федор Григорьевич под руководством выдающегося гигиениста Г.В. Хлопина начал свою научную деятельность. В своих воспоминаниях о том времени Ф.Г. Кротков писал: «Я был и остался неисправимым гигиенистом. Наш руководитель Г.В. Хлопин не препятствовал каждому из нас избрать в пределах обширного комплекса вопросов, составляющих

Панин Владимир Федорович

Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области

Адрес для переписки: 390046, Россия, Рязань, ул. Свободы, д. 89; E-mail: panin@cgerzn.ru



Ф.Г. Кротков. 1965 г.

(Военно-медицинский музей МО РФ, Ф-89426. ФВФ-19883)

[F.G. Krotkov. 1965.

(Military Medical Museum of the Russian Defense Ministry, F-89426. FVF-19883)]

гигиену, какой-либо специальный раздел. Я выбрал военную гигиену. Я хорошо понимал, окончив академию, что такое гигиена и санитарная работа врача в годы войны» [1].

Работая сначала младшим преподавателем, а потом доцентом, он принимает активное участие в гигиенических исследованиях различного вида воинского обмундирования и походного снаряжения воинов Рабоче-крестьянской Красной армии (РККА), в том числе в горных, лыжных и механизированных частях, а также в изучении условий труда в бронетанковых войсках. Большое внимание коллективом кафедры уделялось и новой отрасли военной гигиены – полевой санитарии. Кротков вместе с другими учеными занимался разработкой гигиенических требований к маршу, условиям размещения войск в казармах и лагерях, организации их водоснабжения, методами исследований безопасности воды, ее осветления и обезвреживания. Проводилось также научное обоснование пищевых рационов в войсках с учетом особенностей труда и быта военнослужащих с разработкой рекомендации по составу пайков и организации питания летчиков, моряков и подводников. На основании данных научных разработок для Красной армии были созданы инструкции и наставления по гигиеническому обеспечению войск в мирное и военное время.

За период с 1927 по 1940 г. Ф.Г. Кротковым лично и в соавторстве с другими авторами было опубликовано более 35 научных статей по различным вопросам военной гигиены. В войсках особой популярностью пользовались его «Справочник по военной гигиене» (1929) и книги «Военно-санитарный справочник РККА» (1932, 1941), «Руководство по военной гигиене» (1933, 1933), «Военная гигиена» (1942, 1959), в создании которых он принимал самое деятельное участие.

В декабре 1931 г. решением Государственного ученого совета Наркомата просвещения РСФСР Ф.Г. Кроткову присваивается ученое звание «профессор» и он назнача-

ется на должность профессора кафедры общей и военной гигиены Военно-медицинской академии.

С именем Ф.Г. Кроткова связано зарождение и развитие новых направлений в военной медицине.

В 1930-е гг. в стране гигантскими темпами развивается авиация. Быстро увеличиваются высоты, скорости и дальность полетов отечественных самолетов. Соответственно, существенно усложняются условия учебно-боевой подготовки личного состава авиации и повседневной эксплуатации растущего парка современных самолетов.

Для решения этих проблем на базе научно-исследовательской лаборатории авиационной медицины Военно-воздушных сил в Москве организуется Авиационный научно-исследовательский санитарный институт РККА (с 1936 г. – Институт авиационной медицины РККА имени академика И.П. Павлова).

В 1935 г. профессор, бригадный врач Ф.Г. Кротков возглавил этот институт и фактически новую отрасль гигиенической науки – авиационную гигиену [2].

Молодой и энергичный профессор имел к тому времени опыт проведения современных физиолого-гигиенических исследований, большой опыт организации военно-медицинских учреждений в период Гражданской войны и в годы организации РККА.

Как и в бытность свою в Военно-медицинской академии, Ф.Г. Кротков большое внимание уделял научным изысканиям в области авиационной медицины. В 1936 г. сотрудники института опубликовали 21 работу, в 1937 г. – 13 работ, в 1938 г. – 20 работ. Прочный научный фундамент, заложенный Ф.Г. Кротковым, во многом позволил институту успешно развиваться и в последующие годы. Он сыграл большую роль в подготовке ВВС к Великой Отечественной войне и в решении актуальных вопросов авиационной медицины в условиях самой войны. Самим Ф.Г. Кротковым в период 1935–1941 гг. было опубликовано более 15 работ, посвященных вопросам авиационной медицины.

Напряженная работа в области авиационной медицины и гигиены не помешала Федору Григорьевичу уделять внимание развитию других отраслей военной гигиены, в области которой он становится ведущим консультантом.

Деятельность по повышению боеспособности Красной армии в предвоенные годы

Считая военную гигиену в основном наукой прикладной, Федор Григорьевич добивался, чтобы все новые научные разработки проходили тщательную проверку на войсковых учениях, причем в различных климато-географических условиях, с моделированием типовых тактических ситуаций. Так, на учениях, проводившихся в 1936 г. на Украине, в чрезвычайно неблагоприятных погодных условиях была опробована вся система гигиенического обеспечения наступающей армии.

В 1937 г. Ф.Г. Кротков получил новое назначение – в Научно-исследовательский испытательный санитарный институт РККА (НИИСИ РККА), бывший в то время учреждением, обеспечивавшим все многогранные потребности военно-медицинской службы Красной армии.

В январе 1938 г. он назначается помощником начальника гигиенического отдела НИИСИ, а с ноября 1938 г. по октябрь 1942 г. являлся начальником этого отдела.

Обширный научный материал позволял разрабатывать новые и уточнять существующие к тому времени гигиенические нормативы и методы гигиенических и бактериологических исследований, составлять указания и методические материалы по санитарному надзору.

Ф.Г. Кротков много времени уделял доскональному изучению состояния гигиенического обеспечения в армиях передовых капиталистических государств того времени и требовал такого же подхода и от своих сотрудников. Так, когда началась итальянская агрессия в Абиссинии (ныне Федеративная Демократическая Республика Эфиопия), Федор Григорьевич предпринял меры для того, чтобы его сотрудник смог изучить опыт водоснабжения итальянской армии на безводном театре военных действий, а затем предложил его описать.

В целях проверки конкретного военного опыта и взаимобогащения знаниями он организовал в испытательном санитарном институте специальный семинар, занятиями в котором мастерски руководил. Когда еще только развертывались события у реки Халхин-Гол, Ф.Г. Кротков, обдумывая особенности гигиенического обеспечения войск в этих условиях, обратил внимание на обедненность Монголии источниками водоснабжения и рекомендовал сделать акцент на обеспечение войск тканевыми резервуарами для хранения, транспортирования и хлорирования воды. На Халхин-Голе впервые в довольно широких масштабах были применены доставка воды, спуск авиацией на парашютах «мешков-бочек» и других тканевых резервуаров, обеззараживание воды индивидуально-групповым методом и консервация ее микродозами серебра.



Ф.Г. Кротков (в центре с картой) в составе комиссии ЦК ВКП (б), проверяющий работу санитарной службы во время событий на реке Халхин-Гол, 1939 г

(Военно-медицинский музей МО РФ, Ф-41873)

[F. G. Krotkov (in the center with a map) as a member of the Commission of the Central Committee of the CPSU (b), checking the work of the sanitary service during the events on the Khalkhin-Gol river, 1939.

(Military Medical Museum of the Russian Defense Ministry, F-41873)]

В предвоенные годы были разработаны разнообразные предметы табельного оснащения войск: гигиенические лаборатории и укладки, полевые наборы для исследования воды и пищевых продуктов, индикаторные наборы, укладки для определения доз хлора и коагулянта.

Современники отмечали «особенное чуткое, поистине отеческое отношение» Федора Григорьевича к военным

изобретениям в области гигиены. Любая перспективная новинка заинтересовывала его настолько, что, несмотря на загруженность, он мобилизовывал коллектив гигиенического отдела на ее внеплановое изучение. В этом отношении показателен пример с химической грелкой, которую один летчик привез из Испании. Благодаря Кроткову ее аналог был разработан и очень востребован на театре военных действий [3].

Во время Советско-финляндской войны наши войска оказались слабо подготовленными к действиям в суровых зимних условиях, что привело к неоправданно высоким потерям в живой силе. Вскоре десятки вагонов с грелками различных размеров стали поступать в действующую армию, и в лютые морозы, достигавшие 40–45 °С, это спасло от обморожения и смерти многих солдат, особенно раненых и больных.

Ф.Г. Кротков внес большой вклад в создание материальной базы санитарно-эпидемиологической службы. По его инициативе были созданы подвижные лаборатории, укладки и полевые наборы для проведения санитарно-гигиенических исследований в дивизиях, армиях и на фронтах.

В результате работы советских военных гигиенистов, в отличие от Первой мировой войны, к началу Великой Отечественной войны Красная армия располагала научно обоснованными наставлениями и необходимым лабораторным оснащением по всем разделам профилактической работы военного врача.

Созданная в предвоенные годы система санитарного и противоэпидемического обеспечения армии и населения оправдала себя и в военное время. К началу Великой Отечественной войны в стране было 1760 санэпидстанций. В них работали 11 500 врачей: эпидемиологов, гигиенистов, маляриологов, бактериологов. Санитарная служба страны имела 2288 дезинфекционных станций, пунктов и отрядов, 2945 противомаларийных станций и пунктов, сотни домов и пунктов санитарного просвещения [4].

Руководство гигиенической службой

В годы Великой Отечественной войны Федор Григорьевич руководил гигиенической службой Красной армии.

Все свои знания и богатый опыт, полученный на фронтах Первой мировой войны, во время учебы и работы в ВМА, профессор Ф.Г. Кротков направляет на обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия войск и флота, а также населения в тылу.

Уже первый год войны показал необходимость укрепления санитарно-гигиенического звена медицинской службы армии. Если в Первую мировую войну видные гигиенисты страны привлекались к решению санитарных задач лишь от случая к случаю, то в период Великой Отечественной войны был создан институт санитарных инспекторов по питанию и водоснабжению.

В качестве армейских и фронтовых гигиенистов в годы войны успешно работали прибывшие в действующую армию в большинстве своем с научно-педагогической работы Е.Е. Аксенов, П.А. Вавилин, А.И. Волков, Б.Л. Гордон, А.Я. Губкин, Н.В. Дмитриев, Л.Г. Житомирский, Д.Н. Калужный, М.Г. Маркарян, К.С. Петровский и др. [5].

В октябре 1942 г. в составе Главного военно-санитарного управления (ГВСУ) Красной армии создается гиги-

енический отдел во главе с Ф.Г. Кротковым. Как главный гигиенист Красной армии он одновременно входит в президиум Ученого медицинского совета ГВСУ Красной армии. На пленумах и в секциях совета обсуждались наиболее актуальные вопросы санитарно-гигиенического обеспечения войск. Ежегодно проводились заседания гигиенической секции совета с обязательным участием армейских и фронтовых инспекторов, а также гигиенистов внутренних округов. Участники пленумов и заседаний секции знакомились с новыми указаниями по вопросам санитарно-гигиенического обеспечения войск и привлекались к обсуждению проектов новых руководящих документов и инструкций по санитарно-гигиеническому обеспечению.

За годы войны таких документов было издано около пятидесяти, в том числе по питанию, водоснабжению, профилактике отморожений, санитарной очистке населенных мест прифронтовой зоны. Особое внимание в этих документах обращалось на личную гигиену бойца: профилактику отморожений и потертостей, предотвращение гнойничковых поражений кожи, борьбу со вшивостью.

В военные годы для оказания практической помощи на местах Ф.Г. Кротков неоднократно выезжал на различные фронты (Донской, Сталинградский, Калининский, Северо-Западный, Западный, Волховский, 1-й и 2-й Украинские, 1-й и 2-й Прибалтийские). Под его руководством или при непосредственном участии в войсках действующей армии проводился широкий комплекс санитарно-гигиенических и санитарно-противоэпидемических мероприятий: медицинский контроль за размещением, питанием, водоснабжением войск, обеззараживанием воды, санитарной очисткой мест расположения и боевых действий войск, включая их гигиеническую оценку, профилактика авитаминозов и др. [6].

В Великую Отечественную войну особенно строго решался вопрос питания войск. В области медицинского контроля за питанием войск Отечественная война поставила перед военными гигиенистами ряд задач: строгое выполнение санитарного надзора за доставкой и хранением пищевых продуктов, участие военных врачей в составлении меню и раскладок, наблюдение за приготовлением пищи, организация лабораторного контроля за ее химическим состоянием, витаминностью и калорийностью, санитарные мероприятия по предупреждению пищевых отравлений и токсикоинфекций в войсках. В действующей армии было введено обязательное горячее питание не реже одного раза в день, разработан достаточный по калорийности солдатский паек [7].

В годы войны к разрешению вопросов питания войск привлекались и научные учреждения страны: Центральный научно-исследовательский институт питания Народного комиссариата здравоохранения (в последующем – Институт питания Академии наук СССР), Всесоюзный витаминный институт Народного комиссариата пищевой промышленности, Институт биохимии Академии наук СССР [6].

В 1944 г. по инициативе Федора Григорьевича был создан специальный Научно-исследовательский институт питания Красной армии, который он возглавлял вплоть до 1946 г. Научная тематика института была тесно связана с нуждами здравоохранения фронта и тыла. Она была направлена на предупреждение пищевых отравле-



Ф.Г. Кротков. 1947 г.
(Военно-медицинский музей МО РФ, Ф-89424)
[F.G. Krotkov. 1947
(Military Medical Museum of the Russian Defense Ministry,
F-89424)]

ний, профилактику заболеваний из-за недостаточного питания, внедрения в питание дополнительных источников питательных веществ, рационализацию питания рабочих оборонных предприятий и др. [8].

Благодаря проведенным гигиеническим мероприятиям, в Красной армии практически не было массовых инфекционных заболеваний, связанных с недостатком санитарно-гигиенического обеспечения.

Начальник ГВСУ Красной армии генерал-полковник медицинской службы Е.И. Смирнов (с 1947 по 1952 г. министр здравоохранения СССР) высоко ценил работу своего помощника по гигиеническим вопросам. В служебной характеристике от 21 сентября 1943 г так оценивается деятельность Ф.Г. Кроткова: «Профессор, доктор медицинских наук Ф.Г. Кротков является крупнейшим специалистом в области военной гигиены. За 16-летнюю педагогическую деятельность в Военно-медицинской академии и на курсах усовершенствования врачей он подготовил много специалистов, которые успешно борются в войсках с потерями, связанными с дефектами в организации питания и водоснабжения войск. Его книга «Военная гигиена» выдержала уже несколько изданий и является основным руководством, по которому воспитываются военные врачи. Возглавляемый им гигиенический отдел противозаразительного управления за короткий срок проделал большую работу по внедрению в практику принципов полевого водоснабжения и питания войск, организовал гигиеническую систему в санитарной службе Красной армии, и эта система уже приносит свой благоприятный результат. Организованная им гигиеническая служба имеет огромное значение в предупреждении инфекционных заболеваний среди личного состава во-

йск. Настойчиво проводит практические мероприятия в войсках по предупреждению авитаминозов и дистрофий. Часто выезжал на фронты для организации этой работы на месте и непосредственной помощи фронтовым и армейским специалистам. Достоин присвоения воинского звания "генерал-майор медицинской службы"» [9].

Ф.Г. Кротковым были сформулированы основные принципы военной гигиены и санитарно-гигиенического обеспечения войск:

- Сохранение боеспособности войск достигается путём своевременного проведения комплекса основных санитарно-гигиенических мероприятий.

- Санитарно-гигиенические мероприятия должны быть регламентированы воинскими уставами и наставлениями. К их осуществлению необходимо привлекать все звенья медицинской службы, командование, службы материально-бытового обеспечения и весь личный состав в соответствии с конкретными обязанностями, определенными уставами и наставлениями.

- Для квалифицированного проведения санитарно-гигиенического обеспечения войск в составе медицинской службы Вооруженных сил должна быть специальная гигиеническая организация.

- Санитарно-эпидемиологическая служба Вооруженных сил должна быть оснащена специальным табельным лабораторным оборудованием, имуществом и подвижной техникой, приспособленной к использованию в полевых условиях.

- Военная гигиена должна базироваться на достижениях гигиенической науки и военной медицины. Научная организация санитарно-гигиенического обеспечения войск является непременным условием успешного решения практических задач военной гигиены.

10 октября 1943 г. Ф.Г. Кроткову было присвоено звание генерал-майора медицинской службы. В 1955 г. выходит 35-томный труд «Опыт советской медицины в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.». Являясь редактором тома № 33 этого издания, Ф.Г. Кротков лично пишет несколько глав раздела «Гигиена».

В годы Великой Отечественной войны к наградам, ранее полученным Ф.Г. Кротковым за обеспечение боеспособности РККА, прибавились ордена Ленина (1943, 1944), Красного Знамени (1942, 1944) и медали.

Вклад Ф.Г. Кроткова в развитие радиационной гигиены

Федор Григорьевич известен как эксперт с мировым именем в области медико-гигиенических вопросов ионизирующей радиации, работавший по первому атомному проекту по проблемам защиты войск и населения от ядерного оружия, а впоследствии по изучению влияния на состояние здоровья радиоактивных веществ и ионизирующего излучения, используемых в медицине и промышленности.

В 1946 г. первый заместитель министра здравоохранения СССР, действительный член Академии медицинских наук, генерал-майор медицинской службы Ф.Г. Кротков возглавляет советскую делегацию на конференции Организации Объединенных Наций, принявшей Устав Всемирной организации здравоохранения. «В Соединенные Штаты Америки, – вспоминал Федор Григорьевич, – я поехал военным гигиенистом, а возвра-

тился оттуда гигиенистом радиационным. Произошло это вот как. Вместе с сотрудниками советского представительства при ООН мы смотрели американскую кинохронику. На экране с множеством жутких подробностей перед нами проходили испытания атомного оружия в районе атолла Бикини и все приготовления к этому устрашающему спектаклю. Я смотрел на документальные кадры глазами гигиениста, и мне стало ясно, что в мире появился новый фактор опасного воздействия на здоровье человека и загрязнения окружающей среды».

В 1957 г. Ф.Г. Кротков создал и возглавил в Центральном институте усовершенствования врачей (ЦИУВ) первую в СССР кафедру радиационной гигиены, которой руководил вплоть до 1976 г., а в последние годы жизни являлся ее профессором-консультантом.

Работа кафедры была тесно скоординирована с Ленинградским НИИ радиационной гигиены и с аналогичными кафедрами, которые позднее были организованы в Киевском и Ленинградском институтах усовершенствования врачей. При этом головным учреждением всей системы подготовки специалистов в области радиационной гигиены всегда оставалась кафедра Ф.Г. Кроткова. С 1970 г. на ней, кроме специализации и усовершенствования руководителей и врачей радиологических групп санэпидстанций, началась подготовка инженеров-физиков, радиохимиков и специалистов рентгенологической службы ЛПУ. Под руководством профессора Ф.Г. Кроткова коллективом кафедры было подготовлено более 4 тысяч врачей-гигиенистов и свыше 25 тысяч клиницистов различных специальностей [11].

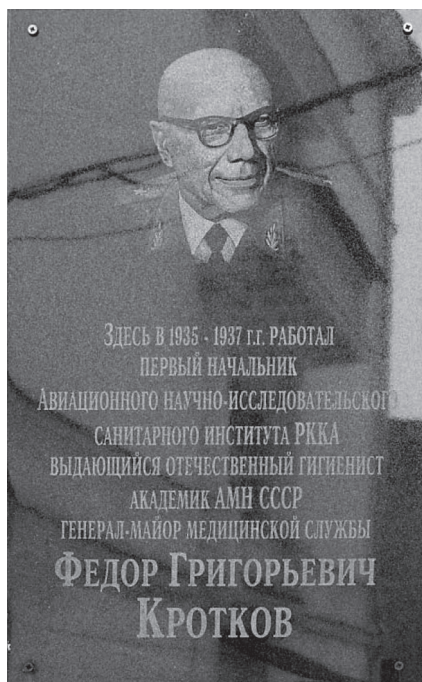
Вместе с учеными Института гигиены труда профзаболеваний АМН СССР, Института биофизики Минздрава СССР, Ленинградского института радиационной гигиены Минздрава РСФСР кафедра радиационной гигиены ЦИУВ внесла значительный вклад в становление и развитие молодой науки – радиационной гигиены. При активном участии сотрудников кафедры были подготовлены первые общесоюзные нормативы по радиационной гигиене. В 1981 г. группе ученых во главе с академиком Ф.Г. Кротковым за цикл работ по обеспечению радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в народном хозяйстве была присуждена Государственная премия СССР в области науки и техники.

Заключение

Указом Президиума Верховного совета СССР в 1966 г. «за большие заслуги в развитии медицинской науки и здравоохранения и в связи с семидесятилетием со дня рождения» Ф.Г. Кроткову было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

За большие заслуги перед Родиной Ф.Г. Кротков награжден золотой медалью «Серп и Молот», тремя орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Красного Знамени, орденом Отечественной войны I степени, орденом Трудового Красного Знамени, орденом Красной Звезды, орденом «Знак Почета», 12 медалями.

Учитывая большие заслуги Ф.Г. Кроткова в развитии медицинской науки и советского здравоохранения, Совет министров СССР Постановлением от 13 мая 1986 г. № 550 учредил премию имени Ф.Г. Кроткова, присуждаемую



Памятная доска на здании Института авиационной и космической медицины
[Memorial plate on the building of the Institute of Aviation and Space Medicine]

Академией медицинских наук СССР один раз в четыре года за лучшую научную работу по общей и радиационной гигиене. За прошедший период решение о присуждении премии имени Ф.Г. Кроткова принималось дважды.

Имя Ф.Г. Кроткова увековечено памятными досками в Москве на здании Государственного научно-исследовательского испытательного института авиационной и космической медицины Минобороны СССР, где он был первым начальником Авиационного научно-исследовательского санитарного института РККА, и на здании школы в селе Мосолово Шиловского района Рязанской области, где он родился [10].

В сентябре 2019 г. решением ученого совета кафедре радиационной гигиены Российской медицинской академии непрерывного профессионального образования присвоено имя академика Федора Григорьевича Кроткова.

Литература

1. Измеров Н.Ф. Академик Ф.Г. Кротков в развитии отечественной и мировой гигиенической науки // Мед. труд. 1996. № 9. С. 1–5.

Панин Владимир Федорович – заместитель главного врача, Центр гигиены и эпидемиологии в Рязанской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Адрес для переписки: 390046, Россия, Рязань, ул. Свободы, д.89; E-mail: panin@cgerzn.ru

Чередникова Валентина Ивановна – кандидат медицинских наук, главный специалист-эксперт Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Рязанской области, Рязань, Россия

Для цитирования: Панин В.Ф., Чередникова В.И. Профессор Федор Григорьевич Кротков – главный гигиенист Красной армии // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 84–90.

DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-84-90



Памятная доска на здании Мосоловской средней школы Шиловского района Рязанской области (2016 г)
[Memorial plate on the building of the Mosolovskaya high school in the Shilovsky district of the Ryazan region (2016)]

2. Чвырев В.Г., Мельниченко П.И., Жолиус Б.И., и др. Видный отечественный гигиенист // Воен.-мед. журн. 1996. № 2. С. 71–73.
3. Габович Р.Д. Кротков Федор Григорьевич. Грани таланта // Гиг. и сан. 1986. № 2. С. 43–46.
4. Кротков Ф.Г. Проблемы питания войск в годы Великой Отечественной войны // Вопр. пит. 1975. № 3. С. 3–8.
5. Кротков Ф.Г. Великая победа // Гиг. и сан. 1970. № 5. С. 3–6.
6. Кнопов М.Ш. Военная медицина в годы Великой Отечественной войны (люди, события, итоги). М.: Издательская группа «Граница». 2014. 856 с.
7. Кротков Ф.Г. Санитарно-гигиеническое обеспечение войск в годы Великой Отечественной войны // Воен.-мед. журн. 1975. № 4. С. 42–46.
8. Организация Научно-исследовательского института питания Красной Армии // Красная Звезда. 1944, 20 сент. С.2.
9. Голиков В.Я., Алексанян И.В., Кнопов М.Ш. Кротков и отечественная военная гигиена (к 100-летию со дня рождения) // Гиг. и сан. 1966. № 2. С. 47–51.
10. Панин В.Ф., Сафонкин С.В., Чередникова В.И. Федор Григорьевич Кротков – выдающийся гигиенист-исследователь, педагог, государственный деятель (к 120-летию со дня рождения). Шацк: Шацкая типография, 2016. 464 с.
11. Панин В.Ф., Сафонкин С.В., Чередникова В.И. Наш знатный земляк Ф.Г. Кротков – основатель кафедры радиационной гигиены. Радиационная гигиена и радиационная безопасность государства: история, современное состояние и перспективы развития: материалы научно-практической конференции. М., 2017. 136 с.

Поступила: 14.02.2020 г.

Professor Fedor Grigoryevich Krotkov – chief hygienist of the Red Army

Vladimir F. Panin ¹, Valentina I. Cherednikova ²

¹ Federal Hygiene and Epidemiology Centre of the Ryazan Region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Ryazan, Russia

² Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being of the Ryazan region, Ryazan, Russia

The article provides brief information about the life and working activities of the first head of the Department of Radiation Hygiene of the Central Institute for Advanced Medical Training, academician, Doctor of Medical Sciences, Professor, Major General of the medical service F. G. Krotkov in the field of military hygiene during its formation in the Soviet health care, in the pre-war years and during the great Patriotic War. The direction of the scientific work of F. G. Krotkov at the Department of hygiene of the Military Medical Academy and contribution to the basis of the Aviation Scientific Research Institute of Sanitary in the Worker-Peasant Red Army and the Special Food Research Institute of the Red Army and its role in improving the combat capability of the Army and Navy as the head of the sanitary Department of the Main military-sanitary Directorate of the Red Army. It also reflects the activities of Professor F. G. Krotkov on the development of radiation hygiene as the head of the country's first specialized Department in the Central Institute for Advanced Medical Training. The paper provides information on perpetuate the name of Professor Krotkov on his small Home in S. Mosolovo, the Ryazan oblast and in Moscow city, where he worked for many years.

Key words: Fedor Krotkov, radiation hygiene, military hygiene, sanitary and anti-epidemic measures in the military.

References

1. Izmerov NF. Academician F.G. Krotkov in the development of domestic and world hygiene science. *Med. labour*. 1996;9: 1-5. (In Russian)
2. Chvyrev VG, Melnichenko PI, Zholius BI, Aleksanyan IV, Knopov MSh. Prominent domestic hygienist. *Voенно-медицинский журнал*. 1996;2: 71-73. (In Russian)
3. Gabovich R.D. Krotkov Fedor Grigoryevich. Facets of talento *Gig. and San*. 1986;2: 43-46. (In Russian)
4. Krotkov FG. Problems of feeding troops during the great Patriotic war. *pete*. 1975;3: 3-8. (In Russian)
5. Krotkov FG. Velikaya Pobeda. *Gig. and San*. 1970; No. 5: 3-6. (In Russian)
6. Knopov MSh. Military medicine during the great Patriotic war (people, events, results). Moscow: Border Publishing group. 2014: 856 p. (In Russian)
7. Krotkov FG. Sanitary and hygienic support of troops during the great Patriotic. *Voенно-медицинский журнал*. 1975; 4: 42-46. (In Russian)
8. Organization of the research Institute of nutrition of the red Army. *Krasnaya Zvezda*. 1944, September 20: 2. (In Russian)
9. Golikov Vy., Aleksanyan IV, Knopov MSh. Krotkov and domestic military hygiene (to the 100th anniversary of birth). *Gig. and San*. 1966; 2: 47-51. (In Russian)
10. Panin VF, Safonkin SV, Cherednikova VI. Fedor Grigoryevich Krotkov-outstanding hygienist-researcher, teacher, statesman (to the 120th anniversary of his birth). Shatsk: Shatsk printing house;2016: 464. (In Russian)
11. Panin VF, Safonkin SV, Cherednikova VI. Our noble countryman F. G. Krotkov-founder of the Department of radiation hygiene. Radiation hygiene and radiation safety of the state: history, current state and prospects of development: materials of the scientific and practical conference. Moscow; 2017: 136. (In Russian)

Received: February 14, 2020

For correspondence: Vladimir F. Panin – Deputy chief physician of the Federal medical Institution – Center for hygiene and epidemiology in the Ryazan region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (: ul. Svobody, d. 89, Ryazan, 390046, Russia; E-mail: panin@cgerzn.ru)

Valentina I. Cherednikova – candidate of medical Sciences, chief specialist-expert of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being in the Ryazan region, Ryazan, Russia

For citation: Panin V.F., Cherednikova V.I. Professor Fedor Grigoryevich Krotkov – chief hygienist of the Red Army. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 84-90. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-84-90

Vladimir F. Panin

Federal Hygiene and Epidemiology Centre of the Ryazan Region

Address for correspondence: ul. Svobody, d. 89, Ryazan, 390046, Russia; E-mail: panin@cgerzn.ru

Уральская когорта населения, облученного в детском возрасте

С.А. Шалагинов, Л.Ю. Крестинина

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

Объектом исследования являются лица, облучённые на Южном Урале в 1950-е гг. в возрасте 0–19 лет. Актуальность формирования когорты лиц, облучённых в детском и подростковом возрасте, определяется их высокой чувствительностью к радиационному воздействию и связана с необходимостью дифференцированных оценок радиационного риска заболеваемости и смертности для лиц, облучившихся на различных стадиях онтогенеза. В работе дано определение когорты, описаны критерии включения и исключения из когорты. Сформированная когорта по данным на 01.01.2019 г. включает 32 461 потенциальных членов, облученных в результате проживания в прибрежных пунктах реки Теча и на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, период наблюдения за когортой составляет 70 лет (с 1950 по 2019 г.). Когорта имеет практически равную численность мужчин и женщин, в ней представлены две этнические группы (славяне и турки), диапазон достигнутого возраста составляет от 0 до 91 года. Сформированная когорта может быть использована для оценки радиационно-индуцированного канцерогенного риска заболеваемости и смертности и риска широкого круга нераковых заболеваний при облучении в диапазоне малых и средних доз.

Ключевые слова: детский возраст, когорта, малые дозы, хроническое облучение, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС).

Введение

Необходимость изучения особенностей радиационного воздействия на детский организм связана с его высокой чувствительностью к ионизирующему излучению, которая в значительной степени определяется процессами интенсивного роста и продолжающейся дифференцировкой тканей. Чувствительность к облучению в детском возрасте может превышать таковую для взрослых в 2–3 раза [1], при этом в разные периоды детского и подросткового возраста различные показатели состояния здоровья могут значительно различаться, что требует дифференцированных оценок радиационного риска для отдельных патологических проявлений в разные возрастные периоды.

Цель исследования – определение критериев формирования и описание основных характеристик когорты населения, облучённого в детском возрасте в 1950-е гг. в двух радиационных инцидентах, произошедших на Южном Урале.

Материалы и методы

Основой для формирования когорты лиц, облучённых в детском возрасте, стал регистр облучённого на Южном Урале населения и медико-дозиметрическая база данных, созданная в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины и поддерживаемая около 70 лет. Описание источников и методов сбора информации представлено в публикациях [2].

Результаты и обсуждение

Определение когорты

Уральская когорта облучённых в детском возрасте (УКОД) включает лиц, постнатально облученных на территории Челябинской или Курганской области в результате двух радиационных ситуаций на Южном Урале (сброс отходов в реку Течу и образование Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа)) в возрасте 0–19 лет в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г.

Критерии включения в когорту:

- облучение в возрасте от 0 до 19 лет;
- проживание на территории Челябинской или Курганской области в 41 населенном пункте на реке Тече в период с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г. и (или) в 34 населенных пунктах ВУРСа в период с 29.09.1957 г. по 31.12.1960 г.

В обозначенные периоды было накоплено более 97% дозы облучения.

Критерии исключения из аналитической когорты

Неточная или противоречивая информация о сроках и местах проживания, не позволяющая рассчитать дозы облучения и возраст на момент облучения.

Впервые в одну когорту объединены лица, облучившиеся в детском возрасте в двух радиационных инцидентах, включая лиц как с облученными, так и с необлученными родителями. При этом было учтено, что в ранее проведенных исследованиях не зафиксировано радиогенных клинических эффектов, обусловленных облучением го-

Шалагинов Сергей Александрович

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454076, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: shalaginov@urcrm.ru

над родителей [3–4]. Такой подход позволяет увеличить выборку облученных в детском возрасте без явного риска искажения эффектов.

Облученные в детском возрасте на реке Тече составили 71%, облученные на ВУРСе – 29% сформированной когорты. Полученные различия связаны с тем, что период облучения на реке Тече был более длительным (с 1950 г. по 1960 г.), чем на ВУРСе (с конца 1957 г. по 1960 г.). В связи с этим можно также отметить высокую долю лиц (32%), начало облучения которых приходится на первый год жизни. Прослеживается снижение доли мужчин с увеличением возраста начала облучения от 0 до 19 лет, что связано с более высокой мужской смертностью в молодом возрасте. В выборке преобладают лица славянской этнической принадлежности, составляющие 68%. Колебания численности членов детской когорты в зависимости от даты рождения среди славян и тюркитов имеют одни и те же закономерности, которые соответствуют изменению региональных показателей рождаемости.

Заключение

Таким образом, сформированная когорта насчитывает 32 461 человека, облученных в детском возрасте на реке Тече и в зоне ВУРСа, включает мужчин и женщин в равных пропорциях, в ней преобладают лица славянской этнической принадлежности, достигнутый возраст за 70 лет наблюдения включает все возрастные группы, накопленные дозы относятся к разряду малых и средних доз облучения

(менее 1 Гр). Когорта облученного в детском возрасте населения может быть использована в эпидемиологических и иных исследованиях в области радиобиологии.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заведующему базы данных «Человек» Н.В. Старцеву за работу по поддержке медико-дозиметрической базы данных «Человек» в актуальном состоянии и за помощь в формировании аналитических когорт и выборки из БД.

Литература

1. UNSCEAR 2013. Report. Volume II. SCIENTIFIC ANNEX B: Effects of radiation exposure of children. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. VOLUME II Scientific Annex B. V. 13-87320. October 2013. 271 p.
2. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / под ред. А.В. Акеева, М.Ф. Киселева. М.: Медбиоэкстрем, 2000. 532 с.
3. Остроумова Е.В., Акеев А.В., Холл П., Гранат Ф. Анализ смертности у потомства родителей, подвергшихся хроническому радиационному воздействию в прибрежных селах реки Теча. Мат. III межд. симп. Хроническое радиационное воздействие: медико-биологические эффекты, 24-26 октября 2005г., Челябинск. С. 94-95.
4. Крестинина Л.Ю., Косенко М.М., Костюченко В.А. Летальные пороки развития у потомства населения проживающего на территории радиоактивного следа // Медицинская радиология. 1991. № 6. С. 30-32.

Поступила: 11.10.2019 г.

Шалагинов Сергей Александрович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: shalaginov@urcrm.ru

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

Для цитирования: Шалагинов С.А., Крестинина Л.Ю. Уральская когорта населения, облученного в детском возрасте // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 91–93. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-91-93

Ural cohort of the population exposed in childhood

S.A. Shalaginov, L.Yu. Krestinina

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

The object of the study is the cohort of individuals exposed in the Southern Urals in the 1950s at the age of 0–19 years. The relevance of the creation of the cohort of individuals exposed in childhood and adolescence is determined by their high sensitivity to radiation exposure and is associated with the need for differentiated

Sergey A. Shalaginov

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

assessments of the radiation risk of morbidity and mortality for individuals exposed at different stages of ontogenesis. The work includes definition of the cohort, the criteria for inclusion and exclusion from the cohort. According to the data as of 01.01.2019, the created cohort includes 32,461 potential members exposed as a result of living in the riverside villages of the Techa River and on the territory of the East Ural radioactive trace; the follow-up period of the cohort is 70 years (from 1950 to 2019). The cohort has an almost equal number of men and women, includes two ethnic groups (Slavs and Turks), the age range is from 0 to 91 years. The formed cohort can be used to assess the radiogenic risk of cancer and non-cancer morbidity and mortality for the low and medium doses of exposure.

Key words: *childhood, cohort, low doses, chronic exposure, Techa River, East Ural Radioactive Trace (EURT).*

References

1. UNSCEAR 2013. Report. Volume II. SCIENTIFIC ANNEX B: Effects of radiation exposure of children. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. VOLUME II Scientific Annex B. V.13-87320. October 2013. 271 p.
2. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Ed. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem. 2000. 532 p. (in Russian).
3. Ostroumova EV, Akleyev AV, Hall P, Granat F. Analysis of mortality in the offspring of parents exposed to chronic radiation exposure in the riverside villages of the Techa River. Chronic radiation exposure: biomedical effects, materials of the III int. Symposium, October 24-26, 2005. Chelyabinsk . P. 94-95 (in Russian).
4. Krestinina LY, Kosenko MM, Kostyuchenko VA. Lethal developmental defects in descendants of a population residing in the area of a radioactive trace. Meditsinskaya radiologiya = Medical Radiology. 1991;6: 30-32 (in Russian).

Received: October 11, 2019

For correspondence: Sergey A. Shalaginov – Candidate of Medical Science, Senior Researcher, Epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency (Vorovsky Str., 68-A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: shalaginov@urcrm.ru)

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

For citation: Shalaginov S.A., Krestinina L.Yu. Ural cohort of the population exposed in childhood. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 91-93. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-91-93

К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска

В.А. Сакович

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены
Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

В данной статье обсуждаются особенности различных методологических аспектов оценки радиационного риска в зависимости от области их применения и перспективы их совершенствования (выделено жирным шрифтом). Рассматриваются такие области применения, как медико-биологическая, эпидемиологическая, радиационная безопасность, медицинское облучение. Проводится анализ алгоритмов, используемых для оценки радиационного риска. Предлагается «узаконить», в зависимости от области применения, такие меры риска, как обусловленные облучением увеличение интенсивности заболеваемости раком, увеличение интенсивности смертности от рака, сокращение ожидаемой продолжительности жизни. Высказывается суждение, что труднее всего встроить в методологию количественной оценки риска его субъективно-психологическое восприятие. При этом методологические суждения авторов, опубликованные ранее, системно обобщаются в предположении, что читатели знакомы с данной темой. Присутствуют неизбежные в данной теме дискуссионные моменты.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиационный риск, радиогенный риск, эпидемиология, математические модели, функция дожития, интенсивность заболеваемости, интенсивность смертности.

Методология количественной оценки радиационного риска неизбежно является предметом дискуссий, по крайней мере из-за разнообразия областей применения понятия и величины радиационного риска. При этом существенно, что в каждой области для количественного описания радиационного риска характерны различные приближения, компромиссные экспертные соглашения и границы применимости. Такими областями можно считать:

- медико-биологическое применение;
- эпидемиологическое применение;
- обеспечение радиационной безопасности;
- медицинское облучение;
- индивидуально-психологическая и социальная область;
- страховая область.

Что является общим во всех областях и аспектах применения? Радиационный риск – это величина, а именно – вероятность. Вероятность нанесения вреда здоровью в результате облучения, проистекающая из вероятностного характера как самого облучения (в случае, если оно имеет такой характер), так и природы возникновения негативных последствий в облучённом организме.

Негативные последствия в облучённом организме могут быть как детерминированными, наверняка возникающими в относительно близкие сроки после облучения в больших дозах, так и вероятностными по своей природе

и отдалёнными на многие годы, что является определяющим при малых дозах. Учёт вероятности детерминированных эффектов – это отдельная узкая методологическая тема. Вероятность возникновения отдалённых эффектов облучения в определённой дозе справедливо называть радиогенным риском. Методология оценки этой вероятности и является главным предметом данной статьи.

В медико-биологическом применении главным является понимание процессов радиационного канцерогенеза. Общеизвестные модели зависимости интенсивности заболеваемости (ИЗ) раком и интенсивности последующей смертности (ИС) от возраста t_0 , в котором произошло кратковременное облучение, и от возраста наблюдения t , строго говоря, являются аппроксимациями, а не моделями, т.к. они не основываются на медико-биологических механизмах [1, 2]. Они были разработаны и успешно использовались прежде всего для экстраполяции результатов наблюдения за когортой японцев, подвергшихся облучению при атомной бомбардировке Хиросимы и Нагасаки в 1945 г., так называемой когортой LSS в период 1958–1998 гг. на последующие годы, но эта задача с опубликованием результатов за 1958–2009 гг. [3,4] стала, можно сказать, менее актуальной.

Признаки моделирования можно видеть, пожалуй, в аппроксимациях, которые содержат разность возраста заболевания (или смерти) и возраста облучения.

Сакович Вадим Алексеевич

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены

Адрес для переписки: 123182, Россия, Москва, ул. Щукинская, д.40; E-mail: sakvapin1@rambler.ru

В принципе математические модели абсолютной ИС и относительной ИС представляют интерес, но вряд ли их следует считать составной частью методологии оценки радиационного риска, и внимание им мы уделяем отдельно в работах [5, 6].

Буквальными моделями являются модели многостадийного преобразования раковой клетки, разработанные с целью объяснения степенной зависимости от возраста наблюдения ИС от рака. Но они рассматривались авторами вне связи с облучением, и МКРЗ не сочла нужным упомянуть их в своих рекомендациях [1].

Попытка построить математическую модель формирования радиогенного риска на основе современных биологических представлений о динамике канцерогенеза предпринята нами в работах [7, 8]. Предложенная в них квазибиологическая модель (КБМ) использует биологические понятия и величины, присутствующие в описании ряда биологических процессов, что допускает привлечение других (помимо эпидемиологических) данных к анализу радиационного канцерогенеза. Так, используются понятия скорости деления стволовых клеток и скорости убыли их количества с возрастом, что может позволить в дальнейшем объяснить различие зависимости от возраста облучения ИЗ и ИС от рака в разных органах и тканях. Используется также понятие надёжности функционирования организма [9, 10], которое на уровне популяции или когорты проявляется в виде возрастной зависимости суммарной фоновой смертности от всех причин и в том числе от всех раков. При анализе эпидемиологических данных и при оценке радиационного риска важно, что эти зависимости в популяциях заметно различаются между собой и медленно изменяются со сменой поколений. Квазибиологический подход позволит, на наш взгляд, с одной стороны, лучше понять названные выше возрастные зависимости, а с другой, сделать в дальнейшем так называемый межпопуляционный перенос более определённым. При этом он также позволяет учитывать возрастную динамику воздействия различных канцерогенных факторов.

Отдельным аспектом в медико-биологической области является зависимость ИС и ИЗ от дозы и мощности дозы, точнее коэффициент пересчёта от данных по когорте LSS к реализующимся на практике режимам и уровням облучения. Попытки определять этот коэффициент, так называемый коэффициент эффективности дозы и мощности дозы (КЭДМД), привлекая эпидемиологические и радиобиологические данные по результатам облучения в широком диапазоне значения дозы и мощности дозы, на наш взгляд, малоперспективны. Суть в том, что в разное время после облучения действуют различные процессы развития радиационного поражения (повреждения). Практически все они как раз и отражаются в упомянутых ранее моделях. КЭДМД в применении к данным по когорте LSS предназначен для учёта роли исключительной кратковременности облучения при атомном взрыве, т.е. учёта мощности дозы (которая в этом случае обратно пропорциональна дозе). Т.е. речь идёт не о медико-биологическом аспекте, а о биофизическом. Нами было показано, что КЭДМД имеет право на существование, если предположить участие в формировании первичного повреждения ДНК короткоживущих продуктов взаимодействия излучения со средой, окружающей ДНК [11].

Ответ на данный вопрос предстоит искать путём изучения таких цитогенетических эффектов облучения, которые по своей природе связаны с однократным повреждением ДНК. По сути, нужно изучать эффекты, обусловленные однократным попаданием в некоторый участок ДНК при воздействии гамма-излучения различной мощности дозы. В этом случае статистически достоверные выводы получить проще, чем по каким-либо эпидемиологическим данным.

Механизм формирования первичных повреждений ДНК проявляется также в виде относительной биологической эффективности (ОБЭ). Поэтому объяснение наблюдаемой зависимости ОБЭ от линейной передачи энергии (ЛПЭ) с позиций микродозиметрии может пролить свет на значение КЭДМД. В частности, природа модификации ОБЭ в виде так называемого кислородного эффекта, о котором можно прочитать в п. 2.19 работы [12], может быть общей с природой КЭДМД при атомном взрыве.

Методологические аспекты применения оценок радиационного риска в эпидемиологической области ближе всего к аспектам применения в медико-биологической области. И здесь уместнее всего, на наш взгляд, обсудить алгоритмы оценки риска. Эффекты, об оценке риска возникновения которых идёт речь, – первичное заболевание раком или смерть от рака. Кроме того, здесь не идёт речь о коэффициенте номинального риска. Дискуссия начинается с формального определения дополнительного риска. Хорошо известны два несколько различающихся выражения, которые определены в [2] и подробно рассмотрены также в [13, 14]. Применительно к смертности они выглядят так:

$$\Delta \tilde{R}_{rc}(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} [\mu(t) - \mu_c(t)] \Delta Q_r(t_0, t) dt \quad - \text{по-}$$

жизненный радиогенный риск, т.е. повышение вероятности смерти от рака в течение всей последующей жизни с начала облучения, где $\mu(t)$ – ИС по всем причинам; $\mu_c(t)$ – ИС от рака; $Q(t_0, t)$ – функция дожития и $\Delta Q_r(t_0, t)$ – её изменение к возрасту t в результате облучения в возрасте t_0 ;

$$\Delta R_{rc}(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} \Delta \mu_{rc}(t_0, t) Q_r(t_0, t) dt = \int_{t_0}^{\infty} \mu(t) \Delta Q_r(t_0, t) dt$$

– радиогенная доля рака (РДР), т.е. доля радиогенных раков в пожизненном риске смерти для облучённого контингента, где $\Delta \mu_{rc}(t_0, t)$ – изменение ИС от рака в результате облучения и $Q_r(t_0, t)$ – функция дожития после облучения.

Второе выражение применяется в области радиационной безопасности и, как видно и хорошо известно, значение соответствующей величины несколько больше первого значения (на среднюю долю раков в причинах смерти). Какое из них лучше применять в области радиационной безопасности, обсудим позднее. Что касается эпидемиологической области, то здесь представляет интерес результат сравнения данных, относящихся к разным контингентам или к разным календарным периодам. Такое сравнение позволяет провести только первое вы-

ражение, т.к. второе, т.е. $\int_{t_0}^{\infty} \mu(t) \Delta Q_r(t_0, t) dt$, не есть непосредственно наблюдаемая величина.

Необходимо заметить, что в обоих выражениях нижний предел интегрирования может быть любым, как меньше t_0 , так и больше t_0 . В первом случае, пока $t \leq t_0$, сохраняется $\Delta\mu_{rc}(t)=0$ и $Q_r(t_0, t)=Q(t_0, t)$. Во втором случае при $t > t_0$ получается оценка остаточного риска к возрасту t . О нём может идти речь, например, при окончании профессиональной деятельности, связанной с использованием источников ионизирующих излучений.

Необходимо заметить также, что никакое вредное воздействие на организм человека не может увеличить пожизненный риск смерти от всех причин смерти суммарно, т.к. он равен единице. Оно может только перераспределить доли пожизненных рисков, связанных с различными причинами смерти. Формально увеличение радиогенного риска, оцениваемого как по первому, так и по второму выражению, количественно уменьшает другие риски, что, разумеется, не уменьшает их роли. Такой «парадокс» связан с тем, что в результате радиогенного увеличения смертности происходит сокращение ожидаемой продолжительности жизни (ОПЖ):

$$\Delta T_r(t_0) = \int_{t_0}^{\infty} \Delta Q_r(t_0, t') dt'$$

Такой показатель радиогенного вреда также неоднократно предлагался [15]. В области радиационной безопасности он не узаконен, но в эпидемиологической области его применение, на наш взгляд, необходимо, в особенности при социальной интерпретации радиогенного риска.

Сопоставление выражений для $\Delta\tilde{R}_{rc}(t_0)$, $\Delta R_{rc}(t_0)$ и $\Delta T_r(t_0)$ и $\Delta T_r(t_0)$ показывает, что все они являются линейными функционалами от $Q_r(t_0, t)$, но с разными взвешивающими множителями: $[\mu(t)-\mu_c(t)]$ в случае пожизненного риска, $\mu(t)$ в случае радиогенной доли рака (РДР) и единицей в случае сокращения ОПЖ. Поскольку для взрослых $\mu(t)$ быстро (экспоненциально) увеличивается с возрастом, то РДР как показатель вреда более чувствительна к уменьшению значения функции дожития в старших возрастах, чем сокращение ОПЖ.

Оценка радиогенного риска в эпидемиологической области, как хорошо видно из приведенных выше выражений, зависит от функции дожития, которой можно характеризовать данный контингент, точнее, от его возрастного состава (предшествующего выполнению оценки или прогноза риска). В принципе, существует показатель, свободный от применения функции дожития. Это так называемая функция риска: $M(t) = \int_0^t \mu(t') dt'$ – среднее число смертей в возрастном интервале от 0 до t (которое может превышать 1 на одного человека) [16]. Соответственно, радиогенное увеличение этого показателя:

$$\Delta M_r(t) = \int_0^t \Delta\mu_r(t') dt'$$

присутствует в выражении для радиогенного уменьшения функции дожития:

$$\Delta Q_r(t_0, t) = Q(t_0, t) \cdot \left[1 - \exp \left\{ - \int_{t_0}^t \Delta\mu_r(t') dt' \right\} \right]$$

Оно не используется в радиационной эпидемиологии и в радиационной безопасности, но принято в математической статистике. Было бы целесообразно «узаконить» его для оценки радиогенного риска.

В докладе НКДАР ООН [2] (Дополнение В) обращено внимание на использование ещё одной меры радиационного риска: «годы потерянной жизни, приходящиеся на один радиационно-индуцированный случай» (*YLLRIC* – years of life lost per radiation-induced case), что в наших обозначениях равно:

$$YLLRIC = \Delta T_r(t_0, \infty) / \Delta R_r^*(t_0, \infty) = \int_{t_0}^{\infty} \Delta Q_r(t_0, t) dt / \int_{t_0}^{\infty} \mu(t) \Delta Q_r(t_0, t) dt$$

В работе [1] (рамка текста А.1.) сказано, что, «поскольку возрастные распределения для разных типов рака различны, по данным национальных раковых регистров были оценены средние возраста для нескольких типов рака, которые были преобразованы в среднее число потерянных лет жизни в случае возникновения рака. Затем поправка на число потерянных лет жизни была введена в результат предыдущего этапа». Как именно вносилась эта поправка, неясно. Однако, обсуждая методологию, следует иметь в виду, что $YLLRIC = 1/\mu_{взв}(t)$ – это величина, обратная значению ИС, взвешенному по функции $Q_r(t_0, t)$. Она слабо зависит от облучения и потому почти не содержит дополнительной информации о вреде от облучения. Она характеризует прежде всего изменение фоновой возрастной зависимости ИС в диапазоне возрастов, когда $\Delta Q_r(t_0, t)$ имеет относительно большое значение, т.е. в диапазоне 70–80 лет.

Математическое выражение для пожизненного риска заболевания раком имеет почти такой же вид, как и для риска смерти от рака, с тем отличием, что функция дожития должна умножаться на вероятность не заболеть раком за тот же от-

$$\text{резок времени } V_c(t_0, t) = \exp \left\{ - \int_{t_0}^t V_c(t') dt' \right\}$$

, где $\Delta V_c(t_0, t)$ – интенсивность первичной за-

болеваемости раком. Соответственно,

$$V_{rc}(t_0, t) = \exp \left\{ - \int_{t_0}^t [V_c(t') + \Delta V_{rc}(t')] dt' \right\} \quad \text{где}$$

$\Delta V_{rc}(t')$ – радиогенная (дополнительная) интенсивность заболеваемости раком. Такое отличие от риска смерти очевидно, и оно учитывается, например, в [17]. Не столь очевидно, что этот множитель применяли при определении «Коэффициентов онкологической заболеваемости на основе моделей избыточного абсолютного и относительного риска», которые приведены в таблицах А.4.6 и А.4.7. работы [1]. Этот множитель приблизительно равен доле всех смертей без рака. Если интенсивность заболеваемости раком определять так же, как интенсивность смертности, т.е. принимать отношение числа заболевших в некотором возрасте t за интервал времени Δt

к среднему числу живущих в этом интервале, то получится величина

$$v_c^*(t) = v_c(t) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t v_c(t') dt' \right\}.$$

Соответственно, приближённо будет:

$$v_c(t) \approx v_c^*(t) \cdot \exp \left\{ \int_0^t v_c^*(t') dt' \right\}.$$

Рассмотренное различие проявляется только в старших возрастах, и надо ли его учитывать – вопрос дискуссионный.

Выше в качестве исходной характеристики радиогенного риска мы рассматривали абсолютное радиогенное увеличение интенсивности смертности – $\Delta \mu(t)$ или абсолютное увеличение интенсивности заболеваемости – $\Delta v_{rc}(t)$. Но в эпидемиологии широко использовалась и используется также другая характеристика – относительное радиогенное увеличение интенсивности, например,

$$\text{смертности} - \varepsilon_{rc}(t) = \frac{\Delta \mu_{rc}(t)}{\mu_c(t)}.$$

Несмотря на то, что

в такой характеристике объединены два различных эффекта, она очень информативна и полезна. В своё время именно эта характеристика показала наличие отдалённого вреда облучения и сделала необходимым разработку методов оценок радиационного риска. И сегодня значение именно этой количественной характеристики определяет целесообразность обсуждения методологических тонкостей оценки риска. Таким образом, именно в этой характеристике заключено социальное значение оценок риска. В чём её количественный смысл?

Современным представлениям, отождествляющим механизмы канцерогенеза при различных причинах первичных канцерогенных повреждений ДНК, соответствует соотношение:

$$\mu_c(t) = \int_0^t \int_0^\xi E(t') \Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt' dt,$$

где $\Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt'$ – абсолютное увеличение интенсивности смертности в результате кратковременного облучения в возрасте t_0 , приходящееся на единицу дозы, $E(t')$ – временной режим интенсивности воздействия других канцерогенных факторов, а α и ξ – коэффициенты. Поэтому при облучении с мощностью дозы $P(t')$ его относительная роль характеризуется соотношением:

$$\varepsilon_{rc}(t) = \frac{\int_0^t \alpha P(t') \Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt'}{\int_0^t \xi E(t') \Delta \mu_{rc}^0(t', t) dt'}.$$

Как видно, сопоставление действия радиации и других факторов происходит адекватно, независимо от модельных представлений о $\Delta \mu_{rc}^0(t_0, t)$. Если происходит сравнение совокупных показателей по конкретному контингенту, то формально этому соответствует интегрирование числителя и знаменателя в выражении для $\varepsilon_{rc}(t)$ по

возрастному составу контингента. Таким образом, обычное сравнение смертности или заболеваемости хронически облучаемой части контингента и необлучаемой (фоновой) части адекватно.

Очевидно, что методология оценки радиационного риска в двух рассмотренных выше областях применения является основой её применения в области обеспечения радиационной безопасности. Основная методологическая позиция в этой области заключается в том, чтобы оценки были консервативными, т.е. с некоторым завышением. Следует заметить, что консервативность в вопросах безопасности, строго говоря, противоречит принципу оптимизации, т.к. ресурс, затрачиваемый в связи с завышением радиационной опасности, отбирается от противодействия другому источнику опасности.

При обеспечении радиационной безопасности принципиальным отличием от предыдущих областей является возможность вероятностного облучения, что также рассмотрим позднее.

Величина радиогенного риска как показателя радиационной опасности необходима, что общеизвестно, для решения двух задач: сопоставление эффектов облучения при различных пространственных (микро- и макро-) и временных распределениях поглощённой дозы в теле человека и сопоставление опасности различных видов деятельности. И здесь существенно то, вероятность каких именно эффектов принимается в рассмотрение.

Если рассматривать радиогенный риск смерти, то сравнение с рисками различных видов деятельности и занятий имеет основания, хотя другие виды деятельности характеризуют, как правило, риском смерти во время или в ближайшее время после окончания деятельности, но не риском возникновения отдалённых эффектов. При дополнении риска смерти, в частности, от рака, риском наследственных заболеваний сопоставление с другими видами деятельности становится не вполне корректным. Номинальный риск как величина, предложенная МКРЗ (алгоритма его расчета здесь не касаемся) на основе риска заболеваемости раком, для такого сопоставления заведомо не приемлем, а при учёте наследственных эффектов тем более.

Известно, что летальность и тяжесть заболевания зависят от локализации рака. Т.е. следует согласиться, что использование риска заболевания как показателя вреда от облучения вместо риска смерти имеет значение для взвешивающих коэффициентов ткани.

Однако низкая достоверность определения радиогенной (дополнительной) ИЗ, т.е. $\Delta v_{rc}(t)$ для большинства локализаций по данным о заболеваемости раком в LSS когорте, например, ограничивает возможности уточнения значения номинального риска. Использование понятия летальности и тяжести заболевания для приведения оценок риска заболевания к риску смерти, что делает МКРЗ, в принципе обесценивает, на наш взгляд, смысл используемого показателя. Так следовало бы делать, если бы существовало нормативное значение суммарного риска всех известных и потенциально возможных отдалённых эффектов облучения. Но такового нет. Хотя эксперты имеют право сойтись на любой договорённости. Так, можно согласиться с той точкой зрения, что облучение с некоторой вероятностью влияет на качество сосудов. Надо ли в связи с этим пересчитывать коэффициент

номинального риска? И зачем? Стало ли облучение опаснее? Для регулирования радиационной безопасности это не имеет значения. Мероприятия по снижению облучения практически не зависят от детализации показателя риска. Распределение дозы по телу также невозможно учесть при разработке таких мероприятий. Другое дело, что оправдано оценить, например, методом параметрических исследований роль возможного уточнения весовых множителей ткани при внутреннем облучении.

Таким образом, пожизненный радиогенный риск смерти от рака может быть достаточным обобщающим критерием для обеспечения радиационной безопасности. Но при этом нужно иметь в виду, что общий вред облучения из-за других эффектов несколько выше: например, при индивидуальном выборе вида деятельности на основе психологического восприятия радиогенного риска.

Итак, пожизненный радиогенный риск смерти от рака – наиболее простой и очевидный показатель опасности облучения, и на его примере легче всего показать методические проблемы, связанные с зависимостью радиогенной интенсивности смертности от возраста облучения и от возраста наблюдения. Эта зависимость становится всё более определённой, в частности, по мере наблюдения за когортой LSS. МКРЗ, признавая наличие такой зависимости, в целях определения коэффициента номинального радиогенного риска усреднила её по условной популяции и обоим полам. Формально такой коэффициент применим в условиях равномерного во времени облучения. Фактически его применение приводит к занижению оценки пожизненного риска от кратковременного облучения в 1,5 раза в начале периода трудовой деятельности и завышает примерно в 2 раза в конце этого периода. Учитывая современный уровень цифровых технологий, представляется вполне возможным оценивать индивидуальный пожизненный риск с учётом временного режима облучения в ходе профессиональной деятельности и пола, если «узаконить» соответствующие методики [18]. Такого типа оценки заведомо уместны при планируемом повышенном облучении. В конце концов, предложение рождает спрос.

Задачи, решаемые в условиях планируемого повышенного облучения, связаны также с потенциальным облучением. Здесь методология оценки радиационного риска предусматривает использование зависимости вероятности облучения от заданного значения дозы. Практически такие зависимости неизвестны и не используются, за исключением задачи создания радиационной защиты в межпланетном полёте [19]. Если, тем не менее, зависимость известна, то следует интегрировать произведение плотности вероятности значения дозы на риск, соответствующий этой дозе.

Однако здесь возникают проблемы для нормирования облучения. На первый взгляд, нормируемому значению риска однозначно соответствует нормируемое значение дозы. Ещё проще при линейной зависимости радиогенного риска от дозы: среднему значению риска соответствует среднее значение дозы облучения (и наоборот). Таким образом, может показаться, что из-за вероятностного характера облучения показатель опасности облучения концептуально не меняется.

Проблема заключается в том, что одному и тому же критерию могут удовлетворять разные варианты защи-

ты от облучения (в смысле как термина «protection», так и «shielding»). Так, при соблюдении нормативного значения средней дозы допускается разное значение риска больше среднего. Например, в межпланетном полёте в зависимости от периода солнечной активности может быть разным соотношение детерминированной дозы галактического космического излучения и вероятностной дозы от солнечных протонных событий, которое является предметом оптимизации при минимизации массы защиты веществом [20]. С другой стороны, может показаться, что удобно ограничивать значение риска: применительно к космическим полётам использовалось вначале понятие надёжности защиты, которая «... должна быть не ниже 0,99» [21]. Но он допускает, в свою очередь, варианты полёта с большой средней дозой, т.е. большой эффект.

Таким образом, в условиях вероятностного облучения должно быть, по крайней мере, два ограничивающих показателя: средняя доза или средний риск и вероятность превышения некоторого большого значения дозы, например, при котором возникает детерминированный эффект. Заметим, что использование двух показателей не требует предположения о линейной зависимости риска от дозы.

Похожий вариант ограничения риска наименее вероятного события используется в случае техногенного облучения в нормальных условиях, когда в пространственно неравномерном поле излучения вероятностной является длительность пребывания различных групп населения в разных его частях. В этом случае социальным показателем является коллективная доза, значение которой зависит от численности рассматриваемого контингента населения, а также средняя доза. Значению средней дозы соответствует некоторое среднее значение риска. Но ограничению подлежит облучение критической группы, т.е. некоторого количества лиц из населения дозой, заметно превышающей среднюю дозу. В данном случае не используется понятие радиационного риска, но фактически ограничивается некоторый квантиль радиогенного риска. Если бы в подобной задаче прогнозировали ситуацию с последовательным использованием оценки риска наиболее облучаемой группы, то в качестве методологического аспекта проявилась бы необходимость учитывать численность всего контингента [22].

Закономерен вопрос, почему ограничивается не средний риск. Дело в том, что здесь имеет место индивидуально-психологическое применение понятия радиационного риска. Отдельного индивида не волнует средний риск – его волнует его индивидуальный риск, причём не в теоретическом исчислении, а в своём собственном представлении и даже ощущении. Если предусматривать некоторые социально-экономические меры компенсации для критических групп, то радиационный риск для них можно было бы увеличить, допустив автоматически увеличение и среднего риска для рассматриваемого контингента. Если, конечно, это имеет социально-экономический смысл, тот самый, который лежит в основе принципа оптимизации.

Индивидуально-психологическое применение понятия радиационного риска проявляется в существенном различии основных дозовых пределов для работников и для населения. По существу, риск работников, которые с индивидуально-психологических и экономических позиций готовы договориться с работодателем о повышен-

ном значении риска, государство ограничивает сверху, потому что ему предстоит компенсировать возможные последствия. Нормативное значение риска населения (посредством нормирования дозы) государство ограничивает снизу, потому что население с индивидуальных позиций не видит негативного влияния неоправданных расходов на экономику. С этой точки зрения трудно дать толкование понятию «уровень пренебрежимо малого риска» и найти его место в методологии оценки радиационного риска.

Очевидно, что в отношении радиационной аварии понятие вероятности применимо не только к событию самой аварии, но и ко многим событиям ликвидации её последствий. Сложная система дозовых показателей для вмешательства и мероприятий после радиационной аварии заслуживает системного анализа с позиции радиационного риска. В целом, это сложная задача прежде всего из-за необходимости оценивать риски вреда от излишних мероприятий, в том числе и социально-психологические.

В целом, количественное описание социально-психологического аспекта оценок риска представляется малопродуктивным.

С позиции методологии оценки радиационного риска заслуживает анализа и медицинское облучение. Что касается медицинского персонала, то обеспечение его радиационной безопасности в принципе не отличается от безопасности других работников в условиях воздействия ИИИ. Что касается пациентов, а также лиц, причастных к медицинскому облучению, то прежде всего предстоит определиться, о чьих и каких рисках идёт речь. Здесь также присутствует трудно поддающийся количественному описанию индивидуально-психологический компонент.

В завершение следует, на наш взгляд, признать индивидуально-психологической областью применения методологии оценки радиационного риска восприятие этой методологии населением. Например, вряд ли целесообразно вслед за МКРЗ продолжать называть увеличение годовой интенсивности заболеваемости раком, обусловленное облучением в предшествующие годы, таким пугающим термином, как «радиационный риск». Мотивацию его использования за прошедшие полвека можно считать исчерпанной.

Очевидно, что оценка радиационного риска востребована в области страхования, но методология в этой области, на наш взгляд, в основном определяется методологией страхования, которую мы не рассматриваем.

Благодарности

Автор выражает благодарность Губину Анатолию Тимофеевичу за творческое сотрудничество при проведении многих из цитированных работ, при выполнении которых формировались изложенные в статье взгляды на методологию оценки радиационного риска.

Литература

1. Рекомендации 2007 года Международной Комиссии по Радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ., по ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
2. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. UN, New York, 2008.
3. Grant E.J., Brenner A. Hiromi Sugiyama et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009 // Radiat. Res. 2017. Vol. 187. P. 513–537.
4. Сайт Фонда научных исследований радиационных эффектов: <http://www.rerf.or.jp> (дата обращения 25.10.2017).
5. Губин А.Т., Сакович В.А. Анализ обобщённых моделей радиогенного риска. Часть 1. Модели МКРЗ // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 4. С. 48–60.
6. Губин А.Т., Сакович В.А. Анализ обобщённых моделей радиогенного риска. Часть 2. Модели НКДАР ООН // Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 4. С. 61–79.
7. Губин А.Т., Редько В.И., Сакович В.А. Квазибиологическая модель радиогенной заболеваемости раком // Радиационная гигиена. 2015. Т.8, №4. С. 23–31.
8. Губин А.Т., Редько В.И., Сакович В.А. Дополнение квазибиологической модели радиогенной заболеваемости раком // Радиационная гигиена. 2017. Т.10, №4. С. 53–56.
9. Губин А.Т., Ковалев Е.Е., Сакович В.А. Модель для описания вероятности летального исхода при воздействии радиации и других вредных факторов // Атомная энергия. 1992. Т. 72, вып.6. С. 604–612.
10. Сакович В.А., Губин А.Т., Гоголева М.В., и др. Нагрузочная модель радиационного риска и её модификации // Проблемы анализа риска. 2004. Т.1, №1. С. 76–98.
11. Сакович В.А., Губин А.Т. Микродозиметрическая интерпретация коэффициента эффективности дозы и мощности дозы // Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып.2. С. 103–108.
12. Губин А.Т., Сакович В.А. Методические проблемы практических оценок радиогенного риска // Радиационная гигиена. 2014. Т.7, №1. С. 16–22.
13. Сакович В.А., Губин А.Т. Методические основы разработки документов по определению значений радиогенного риска смерти, обусловленного облучением в пределах, установленных для контролируемых условий. Рекомендации Р. ФМБА России 21.07 – 2016, Москва 2016. 51 с.
14. Демин В.Ф., Голиков В.Я., Иванов Е.В., и др. Нормирование и сравнение риска здоровью человека от разных источников вреда // Атомная энергия. 2001. Т. 90, Вып. 5. С. 385 – 397.
15. Оценка радиационного риска у населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах. Методические указания. МУ 2.1.10. 3014 – 12. – М.: ФБУЗ «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора, 2011. 26 с.
16. Кокс Д.Р., Оукс Д. Анализ данных типа времени жизни / пер. с англ. О.В. Селезнева. М.: Финансы и статистика. 1988.
17. Форма ведомственного (ГК «Росатом») статистического наблюдения 10-РТБ-5 «Сведения о состоянии радиационной и токсической безопасности в организации». Введена в действие Приказом № 1/352-П от 18.10.2010 г.
18. Лучи космические солнечные. Модель потоков протонов. ГОСТ 25645.134-86. Москва: Издательство стандартов. 1986.
19. Дудкин В.Е., Ковалёв Е.Е., Коломенский А.В., и др. Оценка радиационной защиты при пилотируемом полёте к Марсу // Атомная энергия. 1991. Т.74, вып.4. С. 351–353.
20. Временные нормы радиационной безопасности при космических полётах (ВНРБ-75). Москва: Минздрав СССР. 1976.
21. Сакович В.А. Шапов О.И., Шеин В.И. Критерии санитарно-гигиенического регулирования радиационной безопасности. Медицина экстремальных ситуаций. Тез. докл. межд. конф. «Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях», Москва, 24–26 апр. 2000 г. ФУ «Медбиоэкстрем». 2000. №4(7). С. 24–25.

Поступила: 14.06.2019 г.

Сакович Вадим Алексеевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 123182, Россия, Москва, ул. Щукинская, д.40; E-mail: sakvagin1@rambler.ru

Для цитирования: Сакович В.А. К вопросу о методологии количественной оценки радиационного риска // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 94-101. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-94-101

On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk

Vadim A. Sakovich

Research and technical center of radiation-chemical safety and hygiene
of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Peculiarity of various methodology aspects for estimate radiation risk in dependence of using area are discussed in this article; perspective of the estimate perfection is discussed too. It is consideration such area of using as medico-biology, epidemiology, radiation protection, medical exposure. The opinion expressed that it is difficult to insert subjectively-psychological perception of risk in the methodology. It is generalized systematically author's methodological judgement, which been published before. The article contain discussion moment, which is inevitable in given theme.

Key words: radiation protection, radiation risk, radiogenic risk, epidemiology, mathematical models, survival function, incidence rate, mortality rate.

References

1. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Translation from English, ed. by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: «Alana». 2009; 312 (In Russian)
2. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. UN, New York; 2008.
3. Grant EJ, Brenner A, Hiromi Sugiyama et al. Solid Cancer Incidence among the Life Span Study of Atomic Bomb Survivors: 1958–2009. *Radiat. Res.* 2017;187: 513-537.
4. Website of the Foundation of the scientific research on radiation effects. Available from: <http://www.rerf.or.jp> (Accessed: 25 October 2017). (In Russian)
5. Gubin AT, Sakovich VA. Analysis of the general models of the radiogenic risk. Part 1. ICRP models. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk.* 2016;25(4): 48-60. (In Russian)
6. Gubin AT, Sakovich VA. Analysis of the general models of the radiogenic risk. Part 2. UNSCEAR models. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk.* 2016;25(4): 61-79. (In Russian)
7. Gubin AT, Redko VI, Sakovich VA. Quasi – biological model of radiogenic cancer morbidity. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2015;8(4): 23-31. (In Russian).
8. Gubin AT, Redko VI, Sakovich VA. Addition to the quasi-biological model of radiogenic cancer morbidity. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2017;10(4): 53-58. (In Russian).
9. Gubin AT, Kovalev EE, Sakovich VA. Model for the description of the probability of the lethal outcome for the radiation exposure and other hazardous factors. *Atomnaya energiya = Atomic energy.* 1992;72(6): 604-612. (In Russian).
10. Sakovich VA, Gubin AT, Gogoleva MV, et al. Operating model of the radiation risk and its modifications. *Problemy analiza riska = Problems of the risk analysis.* 2004;(1): 76-98. (In Russian).
11. Sakovich VA, Gubin AT. Microdosimetric interpretation of the dose effectiveness coefficient and dose rate. *Atomnaya energiya = Atomic energy.* 2017;122(2): 103-108. (In Russian)
12. Gubin AT, Sakovich VA. Methodological problems of practical radiogenic risk estimations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene.* 2014;7(1): 16-22. (In Russian)
13. Sakovich VA, Gubin AT. Methodical basis for the development of the documents on the estimation of the values of the radiogenic mortality risks due to the exposure in limits for the controlled conditions. Recommendations of the FMBA of Russia, 21.07.2016. Moscow, 2016: 51 (In Russian)
14. Demin VF, Golikov VYa, Ivanov EV, et al. Limitation and comparison of the human health risks from different hazardous sources. *Atomnaya energiya = Atomic energy.* 2001;90(5): 385 – 397. (In Russian)
15. Assessment of the radiation risk to the public due to long-term uniform technogenic low-dose exposure. Methodical guidelines. MU 2.1.10. 3014 – 12. Moscow: FBUZ "Federal center of hygiene and epidemiology" of Rosпотребнадзор. 2011: 26 (In Russian)
16. Koks DR, Ouks D. Analysis of the life time data. Translation from English Selezneva OV. Moscow: Finance and statistics. 1988. (In Russian)

Vadim A. Sakovich

Research and technical center of radiation-chemical safety and hygiene

Address for correspondence: Shchukinskaya str., 40, Moscow, 123182, Russia; E-mail: sakvagin1@rambler.ru

17. Form of the agency-level (Rosatom) statistical surveillance 10-RTB-5 "Data on the radiation and toxic safety in the facility". Based on the Order № 1/352-P, 18.10.2010. (In Russian)
18. Solar cosmic rays. Model of the proton flows. GOST 25645.134-86. Moscow. 1986. (In Russian)
19. Dudkin VE, Kovalev EE, Kolomenskiy AV, et al. Assessment of the radiation shielding for the piloted flight to Mars. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 1991;74(4): 351-353. (In Russian)
20. Temporal norms of the radiation safety for the space flights (VNRB-75). Moscow: Minzdrav of USSR. 1976. (In Russian)
21. Sakovich VA, Shamov OI, Shein VI. Criteria of the sanitary-hygienic regulation of the radiation safety. Medicine of extreme conditions. International Conference «Radioactivity from nuclear explosions and emergencies». Moscow, 24-26 April. 2000; 4 (7): 24-25. (In Russian)

Received: June 14, 2019

For correspondence: Vadim A. Sakovich – doctor of physical and mathematical sciences, chief research scientist, scientific and technical center radiation-chemical safety and hygiene, Federal medical biological agency of Russia (Shchukinskaya str., 40, Moscow, 123103, Russia; E-mail: sakvapin1@rambler.ru)

For citation: Sakovich V.A. On the issue of the methodology of quantitative assessment of radiation risk. *Radiatsionnaya gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 94-101. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-94-101

Рецензия на монографию «Научные основы радиационной защиты в современной медицине». Том 1. «Лучевая диагностика»

Т.Б. Балтрукова

Северо-западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова
Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

В статье дана рецензия на монографию «Научные основы радиационной защиты в современной медицине» (том 1 «Лучевая диагностика») авторов М.И. Балонова, В.Ю. Голикова, А.В. Водоватова, Л.А. Чипига, И.А. Звоновой, С.А. Кальниченко, С.С. Сарычевой, И.Г. Шацкого, под редакцией профессора М.И. Балонова (СПб: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2019). В условиях роста использования источников ионизирующих излучений в медицине, внедрения новых методов и оборудования для лучевой и радионуклидной диагностики, роста доз облучения пациентов и персонала от высокодозовых методов исследования вопросы радиационной защиты в медицине являются весьма актуальными. Монография написана на основе анализа данных отечественных и зарубежных исследований, проводимых в лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева на протяжении последних 20 лет. Она отражает современные тенденции обеспечения радиационной защиты при различных видах лучевой диагностики и будет полезна широкому кругу читателей, особенно специалистам в области лучевой диагностики и радиационной гигиены.

Ключевые слова: радиационная защита, лучевая диагностика, рецензия.

Коллективная доза населения за счет источников ионизирующих излучений, применяемых в медицине как в Российской Федерации, так и за рубежом, была и остается стабильно высокой и прочно занимает первое место в структуре техногенных источников облучения человека и второе после природного облучения. В последние годы в медицине наблюдается устойчивая тенденция к расширению областей, видов и методов применения источников ионизирующих излучений, что способствует росту доз от медицинского облучения и требует разработки и применения адекватных мер радиационной защиты.

Помимо рутинных рентгеновских методов исследований, в лучевой диагностике с каждым годом растет применение радиофармпрепаратов, синтезированных на основе разных радионуклидов, в том числе излучающих альфа- и бета-частицы. Широко внедряются новые высокоинформативные высокодозовые методы диагностики заболеваний: позитронная эмиссионная томография (ПЭТ), однофотонная эмиссионная томография (ОФЭКТ), компьютерная томография, в том числе и совмещенная с радионуклидной диагностикой (ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ), ангиография и др. Отдельные современные методы диагностики и лечения требуют создания целых комплексов – центров позитронной эмиссионной томографии, протонной и нейтронной терапии.

За счет внедрения и применения новых результативных лучевых методов диагностики заболеваний наблюдается рост количества облучаемых лиц, числа проводимых исследований и терапевтических процедур, коллективных доз облучения населения и персонала, что требует анализа эффективности существующих и разработки новых эффективных методов обеспечения радиационной безопасности, применяемых в медицине.

Решению этих вопросов посвящена монография «Научные основы радиационной защиты в современной медицине» (том 1 «Лучевая диагностика») авторов М.И. Балонова, В.Ю. Голикова, А.В. Водоватова, Л.А. Чипига, И.А. Звоновой, С.А. Кальниченко, С.С. Сарычевой, И.Г. Шацкого, под редакцией профессора М.И. Балонова, которая вышла в конце 2019 г.

При ее написании авторами впервые за последнее десятилетие были проанализированы и обобщены результаты отечественных и зарубежных исследований, посвященных вопросам обеспечения радиационной безопасности в медицине, а также двадцатилетний опыт работы лаборатории радиационной гигиены медицинских учреждений Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, сотрудниками которого они являются.

Это позволило авторам не только последовательно рассмотреть исторические этапы внедрения источников

Балтрукова Татьяна Борисовна

Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова

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

ионизирующего излучения в медицине и становления методов радиационной защиты населения и персонала, но и показать дальнейшие тенденции их развития как в мире, так и в России.

Первый том вышедшей монографии посвящен вопросам радиационной защиты в лучевой диагностике. Он состоит из 11 глав, разделённых на три части, и содержит приложения.

В первой части авторы подробно разобрали основы радиационной защиты в медицине: основные эффекты биологического действия ионизирующего излучения на человека и радиационные риски, связанные с этим, величины и единицы, используемые в радиационной защите, основы современной системы радиационной защиты и ее особенности в медицине. При этом рассмотрены вопросы, связанные с защитой как персонала, так и пациентов; особенности защиты детей, беременных и кормящих женщин. Уделено внимание радиационной защите населения при посещении ими рентгенорадиологических отделений медицинских организаций, их контакте с лицами, выписанными из отделений ядерной медицины после радионуклидной терапии, в результате сброса жидких отходов отделений ядерной медицины в канализационную систему вплоть до очистных сооружений. Представлены организационные и технические (коллективные, групповые и индивидуальные) средства защиты облучаемых лиц.

Вторая часть книги посвящена уровням и рискам облучения пациентов, медперсонала и населения Российской Федерации. В ней авторы рассматривают методы оценки доз облучения пациентов и персонала, в том числе и методы оценки эффективной дозы пациентов в лучевой и радионуклидной диагностике, вопросы индивидуального дозиметрического контроля медицинского персонала. Особенно подробно разбираются вопросы обоснования проведения исследований с использованием источников ионизирующих излучений и связанные с этим радиационные риски; оптимизация условий проведения исследований и защиты пациентов, в том числе с учетом референтных диагностических уровней, информированием пациентов о дозах излучения и возможных последствиях этого; проведения профилактических рентгенологических исследований, исследований в научных целях и других случаях практически здоровым лицам.

Анализируется перечень величин, необходимый для контроля доз облучения пациентов при рентгенодиагностических исследованиях общего назначения (рентгенография, рентгеноскопия, флюорография), а также при ударно-волновой литотрипсии, костной денситометрии, стоматологических исследованиях, маммографии, интервенционных исследованиях, компьютерной томографии. При этом авторы не только излагают теоретический материал, но и подкрепляют его конкретными примерами, приводят расчеты, что значительно облегчает читателю восприятие материала и позволяет на практике проверить правильность его понимания. В разделе «Индивидуальный дозиметрический контроль медицинского персонала» авторы раскрывают вопросы организации и содержания контроля профессионального облучения персонала как группы А, так и группы Б, определения индивидуальных доз внешнего облучения и требования к средствам измерения.

Большое внимание в монографии в главе «Дозы и риски медицинского облучения в России» уделено источникам получения дозиметрических данных, дозам облучения и методикам оценки радиационных рисков при различных видах исследований пациентов, в том числе детей. Вся информация, приводимая в данной главе, основана на собственных многолетних наблюдениях за дозами облучения пациентов, а также на анализе статистических отчетных форм 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгено-радиологических исследований», заполняемых ежегодно всеми медицинскими организациями страны в рамках единой системы контроля индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД).

Глава «Уровни облучения медицинского персонала и населения в России» посвящена вопросам оценки доз облучения персонала в лучевой диагностике и терапии. В ней рассматриваются не только сами дозы облучения, но и закономерности их формирования от количества, вида и характера выполняемых процедур, характеристики и состояния аппаратуры, вида применяемых источников и пр. Однако авторами справедливо подчеркивается, что дозы облучения персонала при рентгенохирургических вмешательствах, интервенционной радиологии требуют дальнейшего изучения и повышенного внимания.

В третьей части монографии изложены основные подходы к радиационной защите пациентов и персонала. В ней анализируется существующая в России нормативно-правовая база организации радиационной защиты в медицинских организациях, рассматриваются радиационно-гигиенические требования к медицинским организациям по безопасной эксплуатации источников ионизирующего излучения и уровни ответственности за это, организация радиационного контроля и учет доз облучения пациентов и персонала. Авторы подробно останавливаются на общих вопросах защиты персонала и пациентов от различных источников ионизирующих излучений при проведении рентгенологических и радионуклидных процедур, включая позитронные эмиссионные исследования, основных принципах обеспечения радиационной безопасности, концепции референтных диагностических уровней, оценке радиационных рисков. Обращено внимание на радиационную защиту населения при профилактических исследованиях, защиту детей, беременных и кормящих женщин.

Очень интересны приведенные в конце монографии приложения. В приложениях 1 и 4 представлен полный перечень действующих в настоящий момент международных и российских документов по радиационной безопасности в медицине. Это позволяет при необходимости легко найти их в существующих правовых электронных базах или сети Интернет и ознакомиться с ними более подробно. В приложениях 2 и 3 даны значения коэффициентов перехода от параметров рентгенологических исследований к эффективным дозам облучения пациентов и дозовых коэффициентов для лучевой диагностики.

В заключение следует отметить, что в монографии авторам удалось обобщить и систематизировать зарубежный и отечественный, в том числе собственный, опыт обеспечения радиационной защиты медицинского персонала, пациентов и населения при различных методах лучевой диагностики заболеваний, основанных на

использовании ионизирующих излучений. Информация, приведенная в ней, позволит специалистам, работающим в области лучевой диагностики и радиационной гигиены, более глубоко взглянуть на существующие проблемы радиационной защиты в медицине, повысить свои знания и более ответственно подходить к вопросам правильного назначения и рационального выполнения рентгенорадиологических диагностических процедур, что позволит снизить дозы облучения и радиационные риски в медицине.

Монография хорошо структурирована, весь материал изложен в доступной форме, прекрасно иллю-

стрирован, наполнен табличными данными, что помогает восприятию представленной информации. Данная монография будет полезна рентгенологам и радиологам, специалистам в области радиационной гигиены и радиационной безопасности, медицинским физикам, научным работникам и всем интересующимся вопросами радиационной безопасности в медицине.

Хочется высказать авторам признательность за большую работу по написанию данного тома монографии и пожелать скорейшего окончания работы над вторым томом.

Балтрукова Татьяна Борисовна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 195067, Санкт-Петербург, Пискаревский пр., д. 47; E-mail: xray_btb@mail.ru

Для цитирования: Балтрукова Т.Б. Рецензия на монографию «Научные основы радиационной защиты в современной медицине». Том 1. «Лучевая диагностика» // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 102–104. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-102-104

Review of the monograph «Scientific bases of radiation protection in modern medicine» Volume 1 «Radiation diagnostics»

Tatyana B. Baltrukova

North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Ministry of Healthcare and Social Development of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

This article presents the review on the monograph “Scientific bases of radiation protection in modern medicine “volume 1” X-ray diagnostics “ by M.I. Balonov, V. Yu. Golikov, A.V. Vodovotov, L.A. Chipiga, I.A. Zvonova, S.A. Kalnitsky, S.S. Sarycheva, I.G. Shatsky, edited by Professor M.I. Balonov. — St.-Petersburg Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev, 2019. Due to the increasing use of ionizing radiation in medicine, implementation of new imaging modalities and equipment, increase of the patient and staff doses, the aspects of their radiation protection are very relevant. The monograph is based on the analysis of data from national and foreign studies, as well as the data from own research conducted in the laboratory of radiation hygiene of medical facilities of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P. V. Ramzaev for almost 20 years. It reflects the current trends in radiation protection for various imaging modalities and it will be useful to a wide range of readers, especially specialists in the field of X-ray diagnostics and radiation hygiene.

Key words: radiation protection, radiation diagnostics, review.

For correspondence: Tatyana B. Baltrukova – Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Department of Hygiene of the Conditions of Education, Training, Labor and Radiation Hygiene of North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg, Russia. (Piskarevskiy pr., 47, Saint-Petersburg, 195067, Russia; E-mail: xray_btb@mail.ru)

For citation: Baltrukova T.B. Review of the monograph «Scientific bases of radiation protection in modern medicine» Volume 1 «Radiation diagnostics». *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 1. P. 102-104. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-102-104

Tatyana B. Baltrukova

North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov

Address for correspondence: Piskarevskiy pr., 47, Saint-Petersburg, 195067, Russia; E-mail: xray_btb@mail.ru

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. 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., Сосюкин 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.