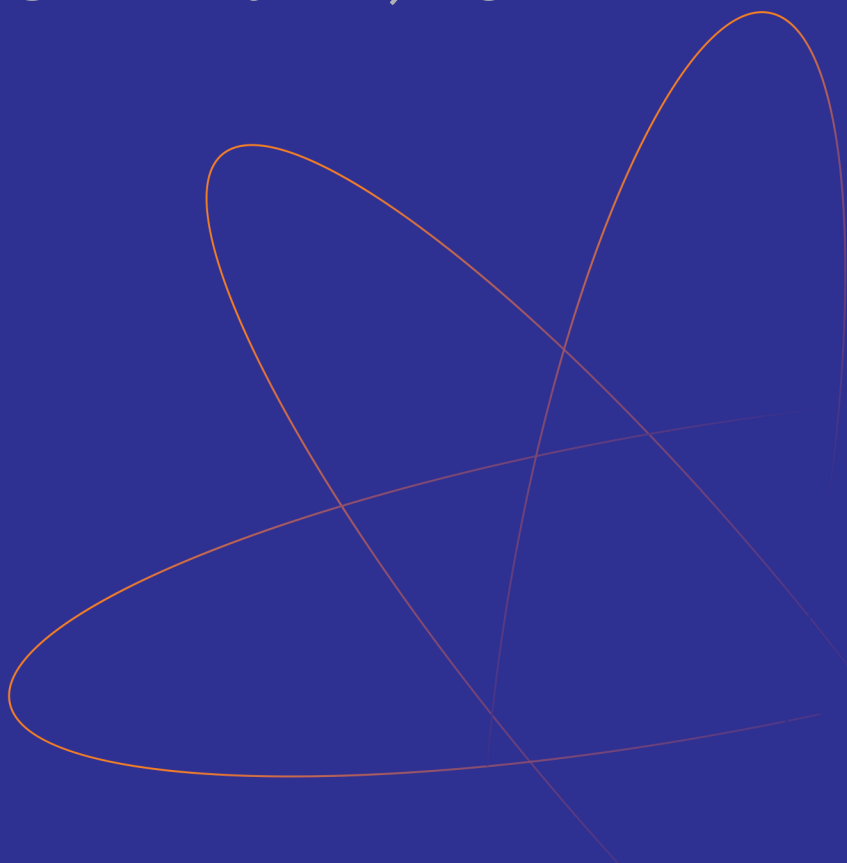


ISSN 1998-426X (print)
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 14 № 1, 2021



**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
«Книга-Сервис» - **Ф57988**

© «Радиационная гигиена», 2021

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

RADIATIONNAYA GYGIENA

Председатель редакционного совета
Г.Г. Онищенко

Главный редактор
И.К. Романович



Том 14 № 1, 2021

Председатель редакционного совета

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

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционный совет

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)

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

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

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

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

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

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)

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. 14 № 1, 2021

Chairman of Editorial Council

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

Members of Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Aleksandr V. Alekhnovich — Russian Medical Academy of Postgraduate 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-Russian 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)

Aleksandr V. Vodovatov — Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, PhD (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 14 № 1, 2021

ОБЗОРЫ

Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К.

Радиологические последствия и уроки радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1».....6

Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Водоватов А.В., Беркович Г.В., Смирнов А.В., Ярына Д.В., Ермолина Е.П., Дружинина Ю.В.

Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии 17

Омельчук В.В.

Становление и современное состояние нормативного регулирования природного облучения населения Российской Федерации (к 90-летию со дня рождения профессора Э.М. Крисяка) Часть 134

Евдокимов В.И.

Анализ исследований, представленных в статьях по ликвидации медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС в мире (1986–2018 гг.)40

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., Силкин С.С., Епифанова С.Б., Аклейев А.В.

Радиогенный риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у лиц, облучённых на Южном Урале в детском возрасте49

Крышев А.И., Бурякова А.А., Васянович М.Е., Екидин А.А.

Оценка консервативности предположений об условиях облучения населения, принятых при установлении нормативов предельно допустимых выбросов60

Филимонова М.В., Сабурова А.С., Шевченко Л.И., Макаrchuk В.М., Лычагин А.А., Филимонов А.С.

Влияние вида солеобразующих кислот на противолучевую активность аналогов T1023 – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевины68

Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Смоляrchuk М.Я.

Некоторые аспекты радиационной защиты в отделениях радионуклидной терапии75

Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., Гешель И.В., Коровин С.В., Эдомская М.А.

Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС86

Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В.

Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г.102

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М., Варфоломеева К.В., Иванов С.А.

Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области 111

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Муминов С.В., Баротов Б.Б., Махмудова М.М., Хамидов Ф.А., Ахмедов М.З., Мирсаидов У.М.

Изучение уровней содержания радона в зданиях дошкольных и школьных учреждений г. Душанбе Республики Таджикистан..... 124

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 133

CONTENTS

Vol. 14 № 1, 2021

ОБЗОРЫ

Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K.

Radiological consequences and lessons of the Chernobyl NPP and «Fukushima-1» NPP radiation accidents..... 14

Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Vodovатов A.V., Berkovich G.V., Smirnov A.V., Yaryna D.V., Ermolina E.P., Druzhinina Yu.V.

Proposals for the Russian quality assurance program in computed tomography31

Omelchuk V.V.

Development and current state of the regulation of the natural exposure of the public of the Russian Federation (To commemorate the 90th birthday of Professor Kriyik E.M.). Part 138

Evdokimov V.I.

Analysis of studies presented in articles on mitigation of biomedical consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant worldwide (1986–2018)47

RESEARCH ARTICLES

Krestinina L.Yu., Shalaginov S.A., Silkin S.S., Epifanova S.B., Akleyev A.V.

Radiogenic risk of solid cancer incidence in persons exposed to radiation in childhood in the Southern Urals....58

Kryshch A.I., Buryakova A.A., Vasyanovich M.E., Ekin A.A.

Assessment of conservatism of assumptions on the population exposure conditions applied for establishing the permissible atmospheric release levels.....67

Filimonova M.V., Saburova A.S., Shevchenko L.I., Makarchuk V.M., Lychagin A.A., Filimonov A.S.

Influence of the type of salt-forming acids on the antiradiation activity of T1023 analogs – salts of N-isobutanoyl-S-isopropylisothiourea73

Golikov V.Yu., Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Smolyarchuk M.Ya.

Some aspects of radiation protection in radionuclide therapy departments84

Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Geshe I.V., Korovin S.V., Edomskaia M.A.

Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP 100

Vostrotin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V.

Tritium in the urine of the Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019 109

RADIATION SAFETY DURING DECOMMISSIONING OF HERITAGE SITES

Khrantsov E.V., Repin V.S., Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Ivanov S.A.

Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region..... 122

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Muminov S.V., Barotov B.B., Makhmudova M.M., Khamidov F.A., Akhmedov M.Z., Mirsaidov U.M.

Radon survey in kindergartens and schools of Dushanbe, Republic of Tajikistan 131

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS..... 133

Радиологические последствия и уроки радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»

Г.Г. Онищенко^{1,4}, А.Ю. Попова^{2,5}, И.К. Романович³

¹ Российская академия наук, Москва, Россия

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

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

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

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

С момента аварии на Чернобыльской АЭС прошло 35 лет, аварии на АЭС «Фукусима-1» – 10 лет. До настоящего времени в Беларуси, Российской Федерации, Украине и Японии продолжают работы по ликвидации последствий двух самых масштабных радиационных катастроф современности. Выбросы радиологически значимых радионуклидов в результате аварии на Чернобыльской АЭС составили около 14 эксаБеккерель, что на порядок больше, чем из 3 аварийных энергоблоков АЭС «Фукусима-1». Значительно меньший выброс и осаждение около 80% выброшенных в атмосферу радионуклидов на поверхность Тихого океана обусловили в сотни раз меньшие площади радиоактивного загрязнения территории Японии, чем территорий бывшего СССР и соседних стран после аварии на Чернобыльской АЭС. Коллективная доза облучения населения от последствий чернобыльской аварии в сотни раз больше, чем доза облучения населения Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1». Не ожидается достоверно определяемых статистическими методами отдаленных медицинских последствий для всех категорий населения Японии, получивших дополнительные дозы техногенного облучения в результате аварии на АЭС «Фукусима-1». В результате аварии на Чернобыльской АЭС у 134 участников аварийных работ развилась лучевая болезнь. У ликвидаторов, получивших дозы более 150 мЗв, установлено увеличение радиационно-обусловленной заболеваемости лейкозом и всеми типами солидных раков. Среди лиц, бывших детьми или подростками в период облучения после аварии на Чернобыльской АЭС и проживающих на территории Беларуси, Украины и четырех наиболее радиоактивно загрязненных областей Российской Федерации, уровень заболеваемости раком щитовидной железы вырос в десятки раз по сравнению с доаварийными уровнями. Уроками радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» являются просчеты в проектировании АЭС и отсутствие реагирования при выявлении этих просчетов, невыполнение своевременно и в полном объеме йодной профилактики, неоправданное переселение жителей радиоактивно загрязненных территорий спустя несколько лет после аварии.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, авария на АЭС «Фукусима-1», радионуклиды, плотность радиоактивного загрязнения, дозы облучения, медицинские последствия, рак щитовидной железы.

Введение

2021 г. – год 35-летия чернобыльской трагедии и 10-летия аварии на АЭС «Фукусима-1». Стало традицией к круглым датам двух самых крупных радиационных аварий подводить итоги, анализировать и оценивать мероприятия, проведенные для смягчения их последствий, фиксировать научные достижения [1–7]. Целью данной

статьи является сравнительная оценка радиологических последствий и анализ уроков радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» с гигиенической точки зрения.

Авария на Чернобыльской АЭС, произошедшая 26 апреля 1986 г., является самой масштабной радиационной катастрофой в мире. Она стала причиной радиоактивного загрязнения обширных территорий европейской

Романович Иван Константинович

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

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

части СССР и пограничных государств. В Российской Федерации наиболее высоким уровням радиоактивного загрязнения подверглись Брянская, Калужская, Орловская и Тульская области. В юго-западных районах Брянской области плотность загрязнения почвы ^{137}Cs превышала 40 Ки/км^2 (1480 кБк/м^2). Как на площадке Чернобыльской АЭС, так и за ее пределами потребовалось проведение срочного вмешательства государственного масштаба с привлечением всех возможных средств и сил с целью предупреждения и снижения радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды, негативных последствий воздействия ионизирующего излучения на здоровье населения [1–4, 6, 7].

Предпринятые долговременные меры защиты в совокупности со значительным снижением плотности радиоактивного загрязнения за счет естественных процессов (распад радионуклидов, фиксация и вертикальная миграция в глубину почвы) привели к существенному снижению техногенных доз облучения населения. На 2020 г., по данным ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, только в 121 населенном пункте Брянской области из 3855, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения в 14 субъектах Российской Федерации, средняя годовая эффективная доза облучения превышает 1 мЗв , из них в 2 населенных пунктах превышает 5 мЗв . В 3734 населенных пунктах, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения, средняя годовая эффективная доза облучения равна или менее 1 мЗв [8, 9]. Практически на протяжении последних 10 лет идет планомерная работа как на федеральном, так и на местном уровне по налаживанию нормальной жизнедеятельности населения, проживающего на территориях, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения [8, 9].

Авария на АЭС «Фукусима-1» в Японии, произошедшая 11 марта 2011 г., также потребовала срочного вмешательства на государственном уровне для предупреждения развития аварии, смягчения ее последствий. В результате выброса радионуклидов в атмосферу радиоактивному загрязнению подверглись территории префектуры Фукусима и соседних префектур. Сбросы радиоактивных веществ в воды Тихого океана привели к радиоактивному загрязнению акватории порта Фукусима. За 10 лет, прошедших с момента аварии на АЭС «Фукусима-1», в Японии выполнен значительный объем работ по предупреждению попадания радиоактивной воды в океан – установлены барьеры и системы очистки жидких радиоактивных отходов. На большей части территории, загрязненной радионуклидами, проведены реабилитационные работы. В настоящее время продолжается борьба с утечками радиоактивной воды с аварийных реакторов, выполняются дезактивационные работы в 20-километровой зоне вокруг АЭС [10–13].

Считаем, что сохранение уникального опыта аварийного реагирования, подходов и практической реализации восстановления (реабилитации) радиоактивно загрязненных в результате аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» территорий является актуальной задачей, а ценность этого опыта с течением времени будет только возрастать.

Причины аварий

Анализ причин двух самых масштабных радиационных катастроф современности, какими являются авария

на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», свидетельствует о том, что они стали результатом просчетов в проектировании, самонадеянной уверенности руководителей атомных отраслей и высших эшелонов власти стран в невозможности запроектных аварий и, как следствие, отсутствия должного реагирования при выявлении просчетов [6, 7, 11, 12, 14–18]. Так, в первых публикациях и официальных отчетах указывалось, что причиной аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС является маловероятное сочетание нарушений режима и порядка эксплуатации энергоблока. Однако аварии на 1-м энергоблоке Ленинградской АЭС в 1975 г. и на первом блоке Чернобыльской АЭС в 1982 г. стали предшественниками чернобыльской катастрофы 1986 г. В результате указанных аварий были выявлены серьезные недостатки в эксплуатационных характеристиках энергоблоков РБМК. К сожалению, они не послужили поводом для коренного усовершенствования конструкции энергоблоков. Характер и причины аварий были засекречены, не доводились до персонала других АЭС этого же типа, не учитывались в планах и инструкциях по проведению тренировок [7, 11, 14–17]. Немаловажную роль сыграло и то обстоятельство, что к 1980-м гг. у руководства атомной отрасли и советского государства сформировалась уверенность в невозможности серьезных аварий на атомных реакторах страны [7, 11].

Изучение причин аварии на АЭС «Фукусима-1» показало, что просчеты в проектировании и непринятие действенных мер по повышению защищенности энергоблоков при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера привели и к фукусимской катастрофе. Первым просчетом является недостаточная высота размещения станции над уровнем моря. Первоначально участок под строительство АЭС был выше уровня моря примерно на 35 м, но его понизили до 10 м. Во-вторых, почти все дизель-генераторы, баки с топливом и электрощиты резервного электроснабжения станции были размещены на первых этажах энергоблоков или в цокольных этажах [11, 18]. В 1991 г. на первом энергоблоке АЭС «Фукусима-1» возникла утечка воды, которая проникла в помещение системы аварийного энергоснабжения реактора, вызвав ряд замыканий, выявив незащищенность от затопления дизель-генераторов и распределительных устройств, размещенных в цокольном этаже. Однако кардинальных мер по защите резервного энергоснабжения АЭС «Фукусима-1» предпринято не было [11, 12, 18]. Следует отметить, что компанией TEPCO, обслуживающей АЭС «Фукусима-1», начиная с 2002 г., был проведен ряд расчетов для сценария возникновения в море у побережья префектуры Фукусима землетрясения магнитудой 8,3 балла, которое могло привести к возникновению цунами высотой около 15 м. Уверенность в том, что конструкция АЭС «Фукусима-1», как и всех АЭС Японии, и предусматриваемые меры безопасности являются достаточно надежными и позволяют станциям выдерживать воздействие маловероятных внешних событий, привела к ситуации, когда оперативное внедрение усовершенствований в области безопасности не обеспечивалось [11, 12, 18].

Недооценка маловероятных событий и уверенность в надежности станции привели к тому, что мощное землетрясение в океане вызвало цунами, максимальная высота

волны которого превысила 13 м, а затопление береговой части станции достигало высоты в 7 м. Сначала волна цунами, а затем и обратный отток воды смыли или затопили большинство дизель-генераторов, баков с топливом, вывели из строя электропитательное оборудование. Отсутствие электроснабжения, в том числе и резервного, вывело из строя систему охлаждения 1-го, 2-го и 3-го энергоблоков АЭС «Фукусима-1», что привело к расплавлению ядерного топлива, разгерметизации реакторов и значительному выбросу техногенных радионуклидов в атмосферу, сбросу высокоактивных жидких радиоактивных отходов в океан [11, 12, 18].

После аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» были пересмотрены требования к безопасности ядерных реакторов, сконструированы и вводятся в эксплуатацию ядерные реакторы новых поколений, однако, от ошибок никто не застрахован. Недостаточное внимание к выявленным просчетам в надежности и безопасности объектов ядерной энергетики в прошлом должно стать уроком для нынешних и будущих поколений. Аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» показали, что радиоэкологические, медицинские и социально-психологические последствия этих катастроф не сравнимы с затратами по устранению выявленных недочетов.

Выбросы из аварийных реакторов

По данным, представленным в научных отчетах международных организаций и публикациях, из разрушенного реактора Чернобыльской АЭС было выброшено около 14 эксаБеккерель (14×10^{18} Бк) различных радионуклидов [1–4, 6–7, 11]. Наиболее радиологически важными радионуклидами являлись ^{131}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs , за счет которых формировались дозы облучения населения. Из 3 аварийных реакторов АЭС «Фукусима-1» было выброшено в атмосферу и сброшено в Тихий океан примерно в 14 раз меньше ^{131}I и примерно в 9 раз меньше ^{137}Cs , однако было выброшено больше радиоактивных благородных газов (табл. 1) [10–12, 18, 19]. Следует также указать, что из аварийного реактора Чернобыльской АЭС в значительных количествах были выброшены в атмосферу радионуклиды с промежуточной летучестью (^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{140}Ba) и тугоплавкие радионуклиды, включая топливные

частицы (^{141}Ce , ^{144}Ce , $^{238-242}\text{Pu}$) [2–4, 6–7].

В результате аварии на Чернобыльской АЭС площадь радиоактивного загрязнения территории Европы радионуклидами ^{137}Cs свыше 37 кБк/м² (1 Кюри/км²) составила более 200 тысяч км², из них около 140 тысяч км² – это территория Беларуси, России и Украины [1–4, 7]. Площадь радиоактивного загрязнения ^{137}Cs территории Японии в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» свыше 37 кБк/м² (1 Кюри/км²) составила около 1200 км², не считая прибрежной акватории [10–12, 18, 19]. Следовательно, масштабы радиоактивного загрязнения территории Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» оказались на два порядка меньше, чем после аварии на Чернобыльской АЭС в бывшем СССР и Европе. Такая значительная разница в масштабах радиоактивного загрязнения территорий связана как с объемом выбросов, так и с тем, что преобладающая часть (около 80%) выброшенных в атмосферу в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» радионуклидов осела на поверхность Тихого океана и была исключена как источник облучения населения [10–11, 18, 19].

Применение срочных мер защиты населения

В случае крупномасштабной аварии на ядерной энергетической установке применяются срочные меры защиты населения от переоблучения: эвакуация, переселение и укрытие, йодная профилактика, запрет и ограничение потребления радиоактивно загрязненных пищевых продуктов.

27 апреля 1986 г., на второй день после аварии на Чернобыльской АЭС, были эвакуированы 50 тысяч жителей г. Припять и 254 человека с железнодорожной станции Янов. Спустя 3 дня эвакуированы 226 человек из села Бураковка, а в первые дни мая 1986 г. – 50 тысяч жителей 30-километровой зоны. Еще около 240 тысяч человек эвакуированы или переселены в более поздние сроки – в течение 1986–1991 гг. [1–4, 6, 7, 11].

В отличие от аварии на Чернобыльской АЭС, на которой авария произошла мгновенно, авария на АЭС «Фукусима-1» развивалась постепенно, от начала отключения электроснабжения до первых выбросов радионуклидов в атмосферу прошло около суток. Развитие аварийной ситуации позволило правительству Японии

Таблица 1

Данные о выбросах радиологически значимых радионуклидов в атмосферу вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» [2–4, 6–7, 10–12, 18, 19]

[Table 1]

Data on the releases of the radiologically significant radionuclides in the atmosphere due to the Chernobyl NPP and "Fukushima-1" NPP accidents]

Радионуклид [Radionuclide]	$T_{1/2}$, сут [$T_{1/2}$, days]	Суммарный выброс вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, ПБк [Total release due to the Chernobyl NPP accident, PBq]	Суммарный выброс вследствие аварии на АЭС «Фукусима-1», ПБк [Total release due to the "Fukushima-1" NPP accident, PBq]
^{132}Te	3,2	≈ 1150	29
^{131}I	8,0	≈ 1760	124
^{133}I	0,87	910	10
^{133}Xe	5,25	6500	7300
^{134}Cs	754	≈ 47	9
^{136}Cs	13,2	36	1,8
^{137}Cs	11010	≈ 85	9

принять решение о превентивной эвакуации. В течение 11–15 марта 2011 г. из населенных пунктов в радиусе 20 км от АЭС «Фукусима-1» было эвакуировано более 78 тысяч человек. Однако эвакуация, в том числе и добровольная, продолжалась и после формирования зоны высокого радиоактивного загрязнения. Правительство Японии приняло решение установить критерий для эвакуации населения с радиоактивно загрязненных территорий – превышение прогнозируемой дозы облучения в 20 мЗв за первый год проживания. Всего, по разным источникам, после аварии на АЭС «Фукусима-1» было эвакуировано от 100 тысяч до 165 тысяч человек. По состоянию на 2018 г. около 100 тысяч человек имели статус эвакуированных и проживали во временных пунктах эвакуации [10–12, 18, 19].

К отрицательному опыту в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС необходимо отнести переселение около 55 тысяч человек из 35 населенных пунктов Брянской области в 1990–1991 гг. [1–3, 20, 21]. Данное переселение не имело радиационно-гигиенического обоснования, т.к. 70% ожидаемой дозы к этому времени уже сформировалось. Кроме того, в 1989 г. в этих населенных пунктах была проведена дезактивация, что снизило дозу внешнего облучения населения примерно на 20%. Фактическая средняя годовая эффективная доза внешнего облучения населения не превышала 5 мЗв/год, однако по плотности радиоактивного загрязнения населенные пункты находились в зоне отселения и с правом на отселение. Установлено, что переселение сопровождается материальными потерями, утратой социальных связей, работы и социального статуса, т.е. является сильным стрессом, что в дальнейшем приводит к увеличению неврологической и сердечно-сосудистой патологии [1–7, 21].

МКРЗ в Публикации 103 [22] и МАГАТЭ в Основном стандарте безопасности [23] рекомендуют национальным регулирующим органам устанавливать критерий для эвакуации и переселения в диапазоне 20–100 мЗв в год прогнозируемой дозы. Установление более низких значений критерия для эвакуации и переселения населения в случае радиационной аварии считаются не оправданными по экономическим и социально-психологическим последствиям.

Своевременная йодная профилактика (блокирование щитовидной железы препаратами стабильного йода) после аварии на Чернобыльской АЭС была проведена лишь в г. Припять, где до момента эвакуации более 60% жителей приняли препараты стабильного йода. В других населенных пунктах, как 30-километровой зоны вокруг аварийной АЭС, так и за ее пределами, йодная профилактика проведена не была [1–4, 6, 7].

После аварии на АЭС «Фукусима-1» своевременная и координированная йодная профилактика также проведена не была. На части территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению, местные органы распространяли таблетки стабильного йода, но не настаивали на их употреблении, в то время как другие распространяли таблетки и советовали их принимать, а третьи ждали указаний от правительства страны. Своевременных указаний от японских властей о начале проведения йодной профилактики не поступало [11, 12].

Отсутствие йодной профилактики в совокупности с

несвоевременным запретом на выпас скота и потребление молока местного производства населением радиоактивно загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС территорий привело к высоким дозам облучения на щитовидную железу и, как следствие, к статистически достоверному увеличению заболеваемости раком щитовидной железы у той части жителей, которым на момент облучения было менее 18 лет [1–7].

По состоянию на апрель 1986 г. в СССР действовал целый ряд документов, разработанных в Ленинградском НИИ радиационной гигиены, регламентирующих аварийное реагирование, в том числе и йодную профилактику [24–26]. К сожалению, местные органы власти этими документами не владели, и к тому же в первые дни на территориях отсутствовала информация об уровнях радиоактивного загрязнения. Распоряжение о проведении йодной профилактики по линии Минздрава было дано только 23 мая 1986 г., когда дозы облучения на щитовидную железу уже сформировались [1–4].

Причинами, почему в Японии не была проведена своевременная и скоординированная йодная профилактика после аварии на АЭС «Фукусима-1», назывались недостаточная предварительная регламентация, серьезные проблемы со связью и отчасти сложности с активизацией кризисного центра [11, 12]. Так, критерии проведения йодной профилактики в японских регламентирующих документах основывались на прогнозируемой дозе, а не на основе измеряемых величин, и местные органы власти, не имея данных о прогнозируемых дозах облучения на щитовидную железу, не могли принять правильное и своевременное решение [11, 12]. Как следствие, среди рекомендаций МАГАТЭ, вышедших на основе анализа аварийного реагирования и проведения защитных мероприятий среди населения на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на АЭС «Фукусима-1», указано на необходимость выработки дозовых и оперативных критериев (уровней поддающихся измерению величин), используемых для принятия экстренных защитных мер и других мер реагирования, в том числе мер в отношении особых групп населения в аварийных зонах [12].

Ограничения на потребление пищевых продуктов с высоким содержанием радионуклидов является основной мерой снижения внутреннего облучения населения территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Гигиеническое нормирование пищевых продуктов после аварии на Чернобыльской АЭС было введено с 6 мая 1986 г. с принятия временных допустимых уровней (ВДУ) содержания ^{131}I в молоке и некоторых продуктах питания. Этот документ стал основанием для организации и проведения выбраковки и изъятия из употребления загрязненных пищевых продуктов. С 30 мая 1986 г. были введены временные допустимые уровни загрязнения основных видов продовольственного сырья и пищевых продуктов радиоактивным цезием (ВДУ-86). По мере изменения радиационной обстановки и составления прогноза ее развития гигиенические нормативы (ВДУ) перерабатывались и ужесточались 5 раз (табл. 2) [1–3]. В дальнейшем допустимые уровни содержания радионуклидов в пищевых продуктах устанавливались санитарными правилами [27], а в настоящее время «Едиными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к

товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому контролю» комиссии Таможенного союза [28].

В Японии для контроля радионуклидов в пищевых продуктах и бракеража были ранее (до 2011 г.) приняты критерии содержания радионуклидов в пищевых продуктах из расчета непревышения внутреннего облучения в 5 мЗв/год. Эти критерии и применяли в Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1». С 1 апреля 2012 г. под давлением общественности критерии были значительно ужесточены. Новые критерии устанавливали концентрации активности для радионуклидов в пищевых продуктах и питьевой воде на основе эффективной дозы 1 мЗв в год (табл. 3). Вследствие этого данные показатели оказались

гораздо ниже временных нормативных показателей, которые они заменили [29].

Установленные в 2012 г. Правительством Японии критерии ограничения потребления пищевых продуктов по радиологическим показателям действуют до настоящего времени, и эти критерии для некоторых видов пищевых продуктов даже более жесткие, чем действующие на территории Российской Федерации критерии, установленные «Едиными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому контролю» комиссии Таможенного союза [28].

Таблица 2

Временные допустимые уровни (ВДУ) загрязнения радиоактивным цезием основных видов продовольственного сырья и пищевых продуктов, Бк/кг (Бк/л) [1–3]

[Table 2]

Temporal permissible levels (TPL) of the radioactive contamination with cesium of the main types of food stock and food products Bq/kg (Bq/l) [1–3]

Наименование продукта или группы продуктов [Type of food product or product group]	ВДУ-86 [TPL-86] (30.05.86)	ВДУ-87 [TPL-87] (15.12.87)	ВДУ-88 [TPL-88] (06.10.88)	ВДУ-91 [TPL-91] (22.01.91)	ВДУ-93 [TPL-93] (21.07.93)
Вода питьевая [Drinking water]	370	18,5	18,5	18,5	18,5
Молоко [Milk]	370	370	370	370	370
Мясо и мясопродукты [Meat and meat products]	3700	1850	1850	740	600
Рыба [Fish]	3700	1850	1850	740	600
Овощи [Vegetables]	3700	740	740	600	600
Ягоды дикорастущие [Wild berries]	–	–	–	1480	600
Грибы [Mushrooms]	18500	740	740	1480	600
Грибы сушеные [Dried mushrooms]	–	11000	11000	7400	600
Детское питание [Baby food]	–	370	370	185	185

Таблица 3

Критерии ограничения потребления пищевых продуктов в Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1» [29] и Таможенного союза [28], Бк/кг (Бк/л)

[Table 3]

Criteria of the limitation of the consumption of food products in Japan after the «Fukushima-1» NPP accident [29] and Customs Union members [28], Bq/kg (Bq/l)

Категория пищи, напитков [Food and drink type]	Критерии 2011 г. [2011 criteria]		Критерии 2012 г. [2012 criteria]	Критерии Таможенного союза [Customs Union criteria]
	I-131	Cs-134, Cs-137	Cs-134, Cs-137	Cs-137
Питьевая вода [Drinking water]	300	200	10	–
Молоко и молочные продукты [Milk and milk products]	300	200	50 (кроме йогурта) [Except for yoghurt]	100

Категория пищи, напитков [Food and drink type]	Критерии 2011 г. [2011 criteria]		Критерии 2012 г. [2012 criteria]	Критерии Таможенного союза [Customs Union criteria]
	I-131	Cs-134, Cs-137	Cs-134, Cs-137	Cs-137
Овощи [Vegetables]	2000 (кроме корнеплодов и картофеля) [(except for root crops and potatoes)]	500	100	80
Мясо [Meat]	–	500	100	200
Рыба [Fish]	–	500	100	130
Детские продукты [Baby products]	–	–	50	40

Дозы облучения населения и участников ликвидации аварий

На территориях бывшего СССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС свыше 37 кБк/м² по ¹³⁷Cs, проживало более 6 миллионов человек, из них примерно 400 000 человек проживали на территориях с уровнем загрязнения ¹³⁷Cs свыше 555 кБк/м² [1–4, 21]. Средняя эффективная доза облучения эвакуированных весной и летом 1986 г. составила примерно 33 мЗв при максимуме в несколько сотен мЗв. У населения, проживавшего на радиоактивно загрязненных территориях, эффективные дозы облучения за первый год после аварии достигали 100 мЗв, однако для большинства населения не превышали 20 мЗв. Накопленные за период с 1986 по 2018 г. эффективные дозы облучения населения загрязненных территорий Беларуси, России и Украины составляют от 10 до 300 мЗв. Коллективная пожизненная эффективная доза облучения населения от последствий чернобыльской аварии, по данным НКДАР ООН за 2008 г., в Европе (включая Российскую Федерацию, Республику Беларусь и Украину) оценена в 400 тыс. чел.-Зв. Средняя поглощенная доза на щитовидную железу для жителей бывшего СССР составляла примерно 100 мГр, для 0,7% из них – превышала 1000 мГр [1–4, 21].

Эффективные дозы внешнего облучения населения Японии, проживавшего на территориях префектуры Фукусима, подвергшихся наиболее высоким уровням радиоактивного загрязнения после аварии на АЭС «Фукусима-1», за первый год после аварии составили около 10 мЗв; на остальных радиоактивно загрязненных территориях дозы облучения были значительно ниже. Для этих же категорий населения поглощенная доза облучения на щитовидную железу составила: для взрослого населения до 35 мГр, для детей и младенцев в 2–3 раза выше. Прогнозируемая коллективная пожизненная эффективная доза населения Японии составит около 50 тыс. чел.-Зв [10, 11, 30].

В ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986–1990 гг. приняла участие более 600 тыс. человек, из них около 300 тыс. человек – это ликвидаторы 1986–1987 гг. [2, 3, 5, 7, 11]. Средняя эффективная доза ликвидаторов аварии оценивается примерно в 120 мЗв,

коллективная эффективная доза – в 60 тыс. чел.-Зв. Наиболее высокие средние дозы облучения зарегистрированы у ликвидаторов 1986 г. участия – 155 мГр, около 5% ликвидаторов получили дозы свыше 250 мГр [2, 3, 5, 7, 11].

В ликвидации аварии на АЭС «Фукусима-1» до ноября 2012 г. приняли участие 24 832 человека. Средние эффективные дозы у 99,3% ликвидаторов составили около 10 мЗв, не превысив 100 мЗв. Группа из 174 ликвидаторов получила дозы свыше 100 мЗв, в среднем 130 мЗв. У 6 ликвидаторов зафиксировано превышение дозы в 250 мЗв. Коллективная эффективная доза всех ликвидаторов аварии на АЭС «Фукусима-1» оценивается примерно в 262 чел.-Зв [11, 12, 31, 32]. Из представленных данных следует, что в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС участвовало в 25 раз больше ликвидаторов, чем на АЭС «Фукусима-1», а коллективная доза облучения, соответственно, больше на 3 порядка.

Медицинские последствия

У 134 человек, участвовавших в ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г., а это в основном пожарники, развилась лучевая болезнь. Из них 28 человек погибли в первые 4 месяца после облучения [5, 7, 33, 34]. У ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС 1986–1990 гг., получивших высокие дозы облучения, в первые 12 лет после аварии достоверно установлено увеличение радиационно-обусловленной заболеваемости лейкозом (величина атрибутивного риска 45–60%) и статистически значимое увеличение на 18% заболеваемости всеми типами солидных раков у лиц, получивших дозы более 150 мЗв [5, 7, 35–38].

После аварии на Чернобыльской АЭС в Беларуси, Украине и 4 наиболее пострадавших областях Российской Федерации (Брянской, Калужской, Орловской и Тульской) отмечается значительный рост заболеваемости раком щитовидной железы среди лиц, бывших детьми или подростками в период облучения. Общее количество случаев рака щитовидной железы, зарегистрированных на этих территориях в период с 1991 по 2015 г. среди лиц, которым на момент облучения в результате аварии на Чернобыльской АЭС было менее 18 лет, составило 19 233 случая. Наибольшее число случаев рака щитовидной железы зарегистрировано на Украине (11 489 случаев), да-

лее в Беларуси (5906 случаев), в 4 областях Российской Федерации выявлено 1838 случаев. Уровни заболеваемости раком щитовидной железы у лиц женского пола в 4 раза выше, чем у мужчин. Уровень заболеваемости раком щитовидной железы у лиц, которым на момент аварии было менее 18 лет, на Украине, в Беларуси и 4 наиболее радиоактивно загрязненных областях Российской Федерации вырос в десятки раз, по сравнению с доаварийными уровнями [5, 7, 21, 32, 39, 40, 41].

По другим отдельным классам онкологической заболеваемости и смертности (кроме рака щитовидной железы) у населения, проживающего на радиоактивно загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС территориях, статистически значимого повышенного риска не выявлено.

Для участников ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» и населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, учитывая невысокий уровень доз облучения, пожизненный риск онкологических заболеваний, вызванных радиацией, помимо рака щитовидной железы, невысок и не будет выявлен эпидемиологическими исследованиями. Вероятно, возрастет пожизненный риск заболевания раком щитовидной железы только у детей, проживающих в двух наиболее пострадавших зонах префектуры Фукусима и подвергшихся облучению в младенческом возрасте [12, 30, 42].

Заключение

Сравнительный анализ суммарного выброса в атмосферу радиологически значимых радионуклидов показывает, что выбросы и сбросы с аварийных энергоблоков АЭС «Фукусима-1» уступают чернобыльским примерно на порядок величины. С учетом того, что около 80% выброшенных в атмосферу радионуклидов после аварии на АЭС «Фукусима-1» осели на поверхность Тихого океана, масштабы радиоактивного загрязнения территории Японии оказались в сотни раз меньше, чем территории бывшего СССР и соседних стран после аварии на Чернобыльской АЭС.

Несравнимо также количество участников ликвидации аварий, населения, подвергшегося дополнительному техногенному облучению, их дозы облучения и медицинские последствия. В ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС участвовало в 25 раз больше ликвидаторов, чем на АЭС «Фукусима-1», а коллективная доза облучения, соответственно, была больше в 230 раз. Коллективная пожизненная эффективная доза облучения населения от последствий чернобыльской аварии в десятки раз больше, чем дозы облучения населения Японии после аварии на АЭС «Фукусима-1». В результате аварии на АЭС «Фукусима-1» нет пострадавших с острой лучевой болезнью, а отдаленные медицинские последствия для всех категорий пострадавших не определяемы статистическими методами на достоверном уровне, за исключением лиц, подвергшихся облучению в младенческом возрасте. В результате аварии на Чернобыльской АЭС у 134 участников аварийных работ 26 апреля 1986 г. развилась лучевая болезнь. У ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС установлено увеличение радиационно обусловленной заболеваемости лейкозом и всеми типами солидных раков у лиц, получивших дозы более 150 мЗв. Среди лиц, бывших детьми или подростками в период облучения после аварии на Чернобыльской АЭС и проживающих на

территории Беларуси, Украины и 4 наиболее радиоактивно загрязненных областей Российской Федерации, заболеваемость раком щитовидной железы выросла в десятки раз, по сравнению с доаварийными уровнями.

К урокам радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», которые нельзя забывать и необходимо учитывать в будущем, относятся: просчеты в проектировании АЭС и отсутствие реагирования при выявлении этих просчетов; не выполненное своевременно и в полном объеме блокирование щитовидной железы препаратами стабильного йода; неоправданное переселение жителей радиоактивно загрязненных территорий через несколько лет после аварии, когда годовые дозы стали ниже установленных пределов; значительное снижение по политическим и популистским мотивам критерия загрязнения территорий для целей зонирования (1991 г.), приведшее к многократному возрастанию количества жителей, проживающих в зоне радиоактивного загрязнения.

К основным урокам необходимо отнести готовность к аварийному реагированию, которая определяется наличием законодательной и нормативной базы, устанавливающей простые и понятные критерии принятия решений, наличие в достаточном количестве квалифицированных специалистов в области радиационной безопасности, обеспеченных современной аппаратурой радиационного контроля, готовой к немедленному использованию.

Литература

1. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповых. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. Т.1. 448 с.
2. Онищенко Г.Г. Чернобыль – 30 лет спустя. Радиационно-гигиенические и медицинские последствия аварии // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 2. С. 10–19.
3. Онищенко Г.Г. Радиационно-гигиенические и медицинские последствия чернобыльской аварии: итоги и прогноз // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 2. С. 23–30.
4. Балонов М.И. Международная оценка последствий чернобыльской аварии. Чернобыльский форум ООН (2003–2005) и НКДАР ООН (2005–2008) // Радиационная гигиена. 2011. Т.4, № 2. С. 131–139.
5. Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет / Под общ. ред. В.К. Иванова, А.Д. Каприна. М.: ГЕОС, 2015. 450 с.
6. Ильин Л.А. Реалии и мифы Чернобыля: Изд. 2-е, испр. и доп. М.: ALARA-Limited, 1996. 480 с.
7. Воронов С.И., Лутошкин А.В., Попова А.Ю., и др. Российский национальный доклад. 30 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986–2016 / Под общ. ред. В.А. Пучкова и Л.А. Большова. МЧС России. 2016. 202 с.
8. Романович И.К., Брук Г.Я., Базюкин А.Б., и др. Динамика средних годовых и накопленных доз облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 3 (324). С. 33–38. ISSN: 2219-5238e ISSN: 2619-0788.
9. Романович И.К., Брук Г.Я., Барковский А.Н., и др. Обоснование концепции перехода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 1. С. 6–18.
10. Романович И.К., Балонов М.И., Барковский А.Н., и др. Авария на АЭС «Фукусима-1»: организация профилактических мероприятий, направленных на сохранение здо-

- рования населения Российской Федерации / Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
11. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» // Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: 2018. 408 с.
 12. The Fukushima Daiichi accident: Report by the Director general. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2015. 209 p. (IAEA. GC(59)/14). URL: <http://www-pub.iaea.org> (Дата обращения: 24.02.2021)
 13. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 6–15.
 14. Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия: Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ: 25 – 29 августа 1986 г.: Вена: Части 1 и 2. М.: ГК ИАЭ СССР, 1986. 73 с.
 15. Асмолов В.Г., Боровой А.А., Демин В.Ф., и др. Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя // Атомная энергия. 1988. Т. 64, вып. 1. С. 3 – 23.
 16. Анализ причин аварии на Чернобыльской АЭС путем математического моделирования физических процессов: отчет ВНИИАЭС: инв. № 864. 1987. 52 с.
 17. Ядрихинский А.А. Ядерная авария на 4 блоке Чернобыльской АЭС и ядерная безопасность реакторов РБМК: Инспекция Госпроатомнадзора на Курской АЭС. Курчатова, 1989. 47 с.
 18. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, A Comparison of US and Japanese Regulatory Requirements in Effect at the Time of the Fukushima Accident, NRC, Washington, DC. 2013.
 19. ICAFNPS. Final report and attachments. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company on 28 November 2012. – URL: <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html> (Дата обращения: 24.02.2021)
 20. Прошин А.Д., Степаненко П.А., Шапошникова Е.Н. Радиационно-экологическая обстановка на территории Брянской области за период с 1986 по 2000 годы // Последствия чернобыльской катастрофы. Здоровье населения Брянской области: сб. статей. Брянск: Читай-город, 2001. С. 10 – 18.
 21. Наследие Чернобыля: Медицинские, экологические и социально-экономические последствия и рекомендации правительствам Беларуси, Российской Федерации и Украины. Чернобыльский Форум: 2003–2005: изд. вт., справ. Вена: МАГАТЭ, 2006. 58 с.
 22. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер с англ.; Под общ. ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 343 с.
 23. Международное агентство по атомной энергии. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2014. 477 с.
 24. Временные методические указания для разработки мероприятий по защите населения в случае аварии ядерных реакторов / Утв. зам. гл. сан. врача СССР Лоранским Д.Н., 18.12.1970 г.; №872/1. М., 1971. 46 с.
 25. Дибобес И.К., Ильин Л.А., Константинов Ю.О., и др. Принятие неотложных решений о мерах защиты населения в случае аварийного радиоактивного выброса во внешнюю среду. Handling of radiation accidents. Proc. Symp., Vienna, 19–23 May 1969. IAEA, Vienna, 1969. P. 547–558.
 26. Константинов Ю.О. Критерии для принятия неотложных решений о мерах защиты населения в случае аварии на АЭС // Радиационная безопасность и защита АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1985. вып. 9. С. 148–152.
 27. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: ФГУП «ИнтерСЭН», 2002. С. 50–58.
 28. Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому контролю (с изменениями на 15 января 2013 г.). Решение комиссии Таможенного союза от 28.05.2010 г. № 299.
 29. MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE. New Standard Limits for Radionuclides in Foods. 2012. – URL: http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new_standard.pdf (Дата обращения: 24.02.2021)
 30. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2013 report. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume 1. Scientific Annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. United Nations, 2014. 321 p.
 31. TEPCO. Press release (Nov 30, 2011): Evaluation status of internal exposure dose of emergency workers. Tokyo Electric Power Company. on 11 April 2013. URL: (<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11113013-e.html>) (Дата обращения: 24.02.2021)
 32. Balonov M. Health Effects of Reactor Accidents with Special Regards to Chernobyl – A Review Paper // Journal of the Physical Society of Japan. 2019. 54 (3), P. 161 – 171.
 33. Абегян А.А., Асмолов В.Г., Гуськова А.К., и др. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия. 1986. Т. 61, вып. 5. С. 301–320.
 34. Гуськова А.К. Медицинские последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Основные итоги и нерешенные проблемы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2010. Т. 55, № 3. С. 17–28.
 35. Иванов В.К., Хаит С.Е., Кашеев В.В., и др. Заболеваемость лейкозами участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период наблюдений с 1986 по 2007 гг. // Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 2. С. 7–20.
 36. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В., и др. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть I: заболеваемость солидными раками // Радиация и риск. 2019. Том 28, № 4. С. 16–30.
 37. Иванов В.К., Карпенко С.В., Кашеев В.В. Радиационные риски российских участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС за период 1992–2017 гг. Часть II: смертность от солидных раков // Радиация и риск. 2020. Том 29, № 1. С. 18–31.
 38. Рожко А.В., Чешик А.А., Веялкин И.В., Никонович С.Н. Заболеваемость злокачественными новообразованиями крови и лимфатической системы у ликвидаторов катастрофы на ЧАЭС в Республике Беларусь // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. мед. наук. 2017. № 3. С. 82–90.
 39. UNSCEAR. Evaluation of data on Thyroid Cancer in Regions affected by the Chernobyl accident. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. United Nations. New York, 2018. 30 p.
 40. Иванов В.К., Цыб А.Ф., Максютков М.А., и др. Проблема рака щитовидной железы в России после аварии на Чернобыльской АЭС: оценка радиационных рисков, период наблюдения 1991–2008 гг. // Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 3. С. 33–58.
 41. Последствия облучения для здоровья человека в результате чернобыльской аварии. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Научное приложение D к Докладу НКДАР ООН 2008 года Генеральной Ассамблеи. ООН. Нью-Йорк, 2012. 182 с.
 42. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. World Health Organization, 2013. 172 p.

Поступила: 25.02.2021 г.

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

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

Для цитирования: Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. Радиологические последствия и уроки радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 6-16. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-6-16

Radiological consequences and lessons of the Chernobyl NPP and «Fukushima-1» NPP radiation accidents

Gennadiy G. Onischenko ^{1,4}, Anna Yu. Popova ^{2,5}, Ivan K. Romanovich ³

¹ Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

³ 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

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

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

35 years have passed since the Chernobyl NPP accident, 10 years — since the «Fukushima-1» NPP accident. At the present time extensive activities on the remediation of the consequences of two major large-scale radiation disasters are performed in the Belorussia, Russian Federation, Ukraine, and Japan. Releases of radiologically significant radionuclides after the Chernobyl NPP accident correspond to 14 exaBecquerel — higher up to an order of magnitude compared to 3 emergence power units of the «Fukushima-1» NPP. The significantly lower release rate and deposition of 80% of the radionuclides released into the atmosphere on the surface of the Pacific Ocean lead to lower up to several orders of magnitude radioactive contamination of the Japanese territory compared to the territories of the former USSR and neighboring countries after the Chernobyl NPP accident. Collective dose to the public due to the Chernobyl NPP accident is higher up to several orders of magnitude compared to the dose to the Japanese population after the «Fukushima-1» accident. No statistically reliable long-term medical consequences are expected for all groups of the Japanese public, additionally exposed due to «Fukushima-1» accident. 134 emergency workers have developed acute radiation sickness due to the Chernobyl NPP accident. Emergency workers with doses higher than 150 mSv had increased radiation-induced morbidity with leukemia and solid cancers. Among the individuals, that were kids or adolescents in the exposure period after the Chernobyl NPP accident and residing on the territories of Belorussia, Ukraine and four most radioactively contaminated regions of the Russian Federation, morbidity with thyroid cancer is increase by a factor of 10 compared to the pre-accidental levels. The following lessons of the Chernobyl NPP and «Fukushima-1» NPP can be derived: faults in the NPP design and lack of response after the recognition of the faults; lack of timely full-scale prophylactic with iodine; unjustified resettlement of the residents of the radioactively contaminated territories several years after the accident.

Key words: Chernobyl NPP accident, «Fukushima-1» accident, radionuclides, radioactive contamination density, dose to the public, medical consequences, thyroid cancer.

Ivan K. Romanovich

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

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

References

1. Radiation-hygienic aspects of the negotiation of the Chernobyl NPP consequences. Ed. By academic of RAS Onischenko GG and prof. Popova AYU. Saint-Petersburg, NIIRG after P.V. Ramzaev; 2016. Vol. 1. 448 p. (In Russian)
2. Onishchenko GG. The Chernobyl – Thirty Years after the Post – Accidental Radiological – Hygienic and Medical Consequences. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(2):10-19. (In Russ.) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-2-10-19> (In Russian)
3. Onischenko GG. Radiation-Hygienic and medical consequences of the Chernobyl accident: results and prognosis. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(2):23-30. (In Russian)
4. Balonov MI. International Assessments of Impacts of the Chernobyl Accident: the Chernobyl Forum (2003–2005) and UNSCEAR (2005–2008). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(2):31-39. (In Russian)
5. Medical radiological consequences of Chernobyl: prognosis and real data 30 years later. Ed. Ivanov VK, Kaprin AD. Moscow: GEOS; 2015. 450 p. (In Russian)
6. Ilyin LA. Realities and myths of the Chernobyl: 2nd edition, corrected and expanded. Moscow: ALARA-Limited; 1996. 480 p. (In Russian)
7. Voronov SI, Lutoshkin AV, Popova AYU, Stepanov VS, Peshkov YuV, Kraevoy SA, et al. Russian national report 30 years of the Chernobyl accident. Results and perspectives of negotiation of the consequences in Russia 1986-2016. Ed. Puchkov VA, Bolshov LA. EMERCOM of Russia; 2016. 202 p. (In Russian)
8. Romanovich IK, Bruk GYA, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. The dynamics of the average annual and cumulative radiation exposure doses of the adult population of the Russian federation after the Chernobyl disaster. *Zdorovye naseleniya i sreda obitaniya = Health of the public and the environment*. 2020;3(324): 33-38. ISSN: 2219-5238 ISSN: 2619-0788. (In Russian)
9. Romanovich IK, Bruk GYA, Barkovsky AN, Bratilova AA, Gromov AV, Kaduka MV. Substantiation of the concept of transfer to conditions of normal population activity of the settlements considered to be zones of radioactive contamination after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(1):6-18. (In Russian)
10. Romanovich IK, Balonov MI, Barkovsky AN, Nikitin AI. NPP “Fukushima-1” accident: management of the prophylactic actions aimed at the preservation of health of the public of the Russian Federation. Ed. by academic of RAS Onischenko GG. Saint-Petersburg: NIIRG after P.V. Ramzaev; 2012. 336 p. (In Russian)
11. Arutyunyan RV, Bolshov LA, Borovoy AA, Velikhov EP. System analysis of the causes and consequences of the “Fukushima-1” NPP accident. Institute of the problems of the safe development of the nuclear energy RAS. Moscow; 2018. 408 p. (In Russian)
12. The Fukushima Daiichi accident: Report by the Director general. Vienna: Intern. Atomic Energy Agency, 2015. 209 p. (IAEA. GC(59)/14). – Available from: <http://www-pub.iaea.org> (Accessed: 24.02.2021)
13. Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Ivanov SA, Biblin AM, Repin VS, et al. Results of the fourth combined scientific expedition for the radiation monitoring in the Kurily-Kamchatka region of the Pacific ocean. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 6–15. (In Russian)
14. Chernobyl NPP accident and consequences: Information prepared for the IAEA expert meeting: 25-29.08 1986.: Vienna, parts 1 and 2. Moscow: GK IAE USSR; 1986. 73 p. (In Russian)
15. Asmolov VG, Borovoy AA, Demin VF, Kalugin AK, Kuzmin II, Kulakov VM, et al. Chernobyl NPP accident – a year after. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1988;64(1): 3 – 23. (In Russian)
16. Analysis of the factors of the Chernobyl NPP accident by the mathematic modelling of the physical processes: report of the VNIIAES. Inv. Number 864; 1987. 52 p. (In Russian)
17. Yadrikhinskiy AA. Nuclear accident on the 4th unit of the Chernobyl NPP and nuclear safety of the RBMK reactors: Gospromatomnadzor inspection on Kursk NPP. Kurchatov; 1989. 47 p. (In Russian)
18. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, A Comparison of US and Japanese Regulatory Requirements in Effect at the Time of the Fukushima Accident, NRC, Washington, DC; 2013.
19. ICAFNPS. Final report and attachments. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company on 28 November 2012. – Available from: <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html> (Accessed: 24.02.2021)
20. Proshin AD, Stepanenko PA, Shaposhnikova EN. Radiation-ecological situation on the territory of Bryansk region in 1986-2000. Consequences of the Chernobyl accident. Health of the Bryansk region public: proceedings. Bryansk: Chitay-gorod; 2001. P. 10 – 18. (In Russian)
21. Chernobyl legacy: medical, ecological, and social-economic consequences and recommendation to the governments of Belorussia, Russian Federation and Ukraine. Chernobyl forum: 2003-2005. 2nd ed. Vena: IAEA; 2006. 58 p. (In Russian)
22. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by Kiselev MF, Shandala NK. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian)
23. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3 No GSR Part 3. Vienna; 2014. 436 p. (In Russian)
24. Temporal guidelines on the development of the measures on the protection of the public for the nuclear reactor accidents. Approved by the deputy chief sanitary doctor of USSR Loranskiy DN. 18.12.1970; №872/1. Moscow; 1971. 46 p. (In Russian)
25. Dibobes IK, Ilyin LA, Konstantinov YuO, et al. Emergency decision-making on the protection of the public in case of emergency radioactive discharge into the environment. Handling of radiation accidents. Proc. Symp., Vienna, 19-23 May 1969. IAEA, Vienna; 1969. P. 547-558. (In Russian)
26. Konstantinov YuO. Criteria for the emergency decision-making on the protection of the public for the NPP accidents // Radiation protection and safety of NPP.: M. Energoatomizdat; 1985. No. 9. P. 148-152. (In Russian)
27. SanPiN 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements on the safety and food value of the food products. Sanitary rules and norms. M.: FGUP “InterSEN”; 2002. P. 50-58. (In Russian)
28. Joint sanitary-epidemiological and hygienic requirements on the goods for the sanitary-epidemiological control (with changes on 15.01.2013). Decision of the Customs Union commission. 28.05.2010. No. 299. (In Russian)
29. MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE. New Standard Limits for Radionuclides in Foods. 2012. – Available from: http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new_standard.pdf (Accessed: 24.02.2021)
30. Sources, effects and risks of ionizing radiation. UNSCEAR 2013 report. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume 1. Scientific Annex A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. United Nations; 2014. 321 p.
31. TEPCO. Press release (Nov 30, 2011): Evaluation status of internal exposure dose of emergency workers. Tokyo Electric Power Company. on 11 April 2013. – Available from: (<http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11113013-e.html>) (Accessed: 24.02.2021)

32. Balonov M. Health Effects of Reactor Accidents with Special Regards to Chernobyl – A Review Paper. *Journal of the Physical Society of Japan*. 2019;54 (3): 161 – 171.
33. Abagyan AA, Asmolov VG, Guskova AK, et al. Data on the Chernobyl NPP accident and its consequences for the IAEA. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 1986;61(5): 301-320. (In Russian)
34. Guskova AK. Medical consequences of the Chernobyl NPP accident. Main results and unsolved problems. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2010;55(3): 17-28. (In Russian)
35. Ivanov VK, Khait SE, Kashcheev VV, et al. Leukosis morbidity of the liquidators of the consequences of the Chernobyl NPP accident for the 1986-2007 surveillance period. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2010;19(2): 7-20. (In Russian)
36. Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV, Chekin SYu, Maksyutov MA, Tumanov KA, et al. Radiation risks of the Russian liquidators of the consequences of the Chernobyl NPP accident for the 1992-2017 period. Part 1: solid cancer morbidity. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2019;28(4): 16-30. (In Russian)
37. Ivanov VK, Karpenko SV, Kashcheev VV. Radiation risks of the Russian liquidators of the consequences of the Chernobyl NPP accident for the 1992-2017 period. Part 1: solid cancer mortality. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2020;29(1): 18-31. (In Russian)
38. Rozhko AV, Cheshik AA, Veyalkin IV, Nikonovich SN. Morbidity by the malignant neoplasms of the blood and lymphatic system of the liquidators of the Chernobyl NPP accident in the Republic of Belarus. Bulletin of the national academy of sciences of Belarus. Medical sciences series. 2017;3: 82–90. (In Russian)
39. UNSCEAR. Evaluation of data on Thyroid Cancer in Regions affected by the Chernobyl accident. A white paper to guide the Scientific Committee's future programme of work. United Nations. New York; 2018. 30 p.
40. Ivanov VK, Tsyb AF, Maksyutov MA, Tumanov KA, Chekin SYu, Kashcheev VV, et al. Problem of the thyroid cancer in Russian after the Chernobyl NPP accident: assessment of the radiation risks in 1991-2008 surveillance period. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2010;19(3): 33-58. (In Russian)
41. Consequences of the exposure for the human health due to the Chernobyl accident. UNSCEAR. Scientific annex D for the USCEAR 2008 report. UN. New-York; 2012. 182 p. (In Russian)
42. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami based on a preliminary dose estimation. World Health Organization; 2013. 172 p.

Received: February 25, 2021

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

Anna Yu. Popova – Doctor of Medical Science, Professor, Head of the Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; Head of the Department of Organization of Sanitary and Epidemiological Service, Russian Medical Academy of the Continuous Professional Education, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, 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)

For citation: Onischenko G.G., Popova A.Yu., Romanovich I.K. Radiological consequences and lessons of the Chernobyl NPP and “Fukushima-1” NPP radiation accidents. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 6-16. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-6-16

Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии

П.С. Дружинина¹, Л.А. Чипига^{1,2}, С.А. Рыжов³, А.В. Водоватов^{1,7}, Г.В. Беркович⁴, А.В. Смирнов³, Д.В. Ярына⁵, Е.П. Ермолина⁶, Ю.В. Дружинина^{3,6}

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Российская ассоциация предприятий по продаже и ремонту медицинской техники, Москва, Россия

⁶ Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия

⁷ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Обеспечение качества проведения компьютерно-томографических исследований способствует как получению необходимой диагностической информации, так и поддержанию оптимальных уровней облучения пациентов и персонала в этой области лучевой диагностики. В статье рассмотрены требования и основные аспекты обеспечения качества при проведении КТ-исследований, которые включают контроль качества оборудования, методики контроля качества КТ-изображения, методики проведения исследований, вопросы оптимизации радиационной защиты, а также предотвращения и расследования радиационных аварий. Все основные разделы статьи представляют из себя рекомендации по применению единой системы обеспечения качества проведения КТ-исследований.

Ключевые слова: компьютерная томография, обеспечение качества, контроль качества, референтные диагностические уровни, радиационные аварии.

Введение

На сегодняшний день компьютерная томография (КТ) является одним из наиболее информативных методов лучевой диагностики, позволяющий с высокой скоростью получать изображения внутренних органов с высоким контрастом [1, 2]. Высокая информативность этого метода обуславливает постоянный рост числа КТ-исследований как в Российской Федерации, так и в зару-

бежных странах. КТ широко распространена в зарубежных странах (около 10% вклада в общее число исследований в странах Евросоюза, около 20% – в США) [3–6]; в последние годы в России наблюдается существенный рост КТ-исследований. На 2019 г. вклад КТ в общее число исследований составил около 4% (с ростом примерно на 0,5% в год)¹. Динамика изменения числа КТ-исследований за последние 6 лет представлена на рисунке 1.

¹ Роспотребнадзор. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. Методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15. М.: Роспотребнадзор, 34 с. (2015). (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом РФ 6 апреля 2015 г.) [Methodical guidelines "Assessment of the radiation risk of the patients from diagnostic X-ray examinations" MR 2.6.1.0098-15 (In Russ.)]

Дружинина Полина Сергеевна

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

Адрес для переписки: 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: druzhininapauline@gmail.com

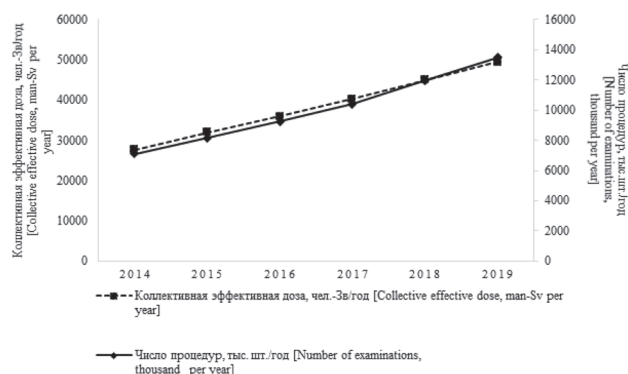


Рис. 1. Динамика изменения числа процедур и изменение вклада в коллективную дозу компьютерной томографии в Российской Федерации за период 2014–2019 гг. согласно данным формы 3-ДОЗ [7]

[Fig. 1. The trends in the number of examinations and contribution to the collective dose from computed tomography in the Russian Federation in 2014–2019]

Как следует из рисунка 1, за последние 6 лет значительно выросло (почти в два раза) число процедур компьютерной томографии. Соответственно, выросла коллективная доза от КТ. В 2019 г. вклад КТ в коллективную дозу от медицинских процедур составил 56,1%.

КТ ассоциирована со значительными индивидуальными дозами облучения пациентов. В некоторых случаях эффективная доза за одно КТ-исследование может превышать 100 мЗв [8], а за многократное проведение исследования в период лечения может превышать 500 мЗв [9]. В таких случаях риск от проведенных исследований оценивается как существенный (МР 2.6.1.0098-15).

В условиях пандемии новой коронавирусной инфекции (COVID-19) в связи с недостаточной чувствительностью методов лабораторной диагностики компьютерная

томография в Российской Федерации стала основным методом ранней, первичной диагностики COVID-19 за счет возможности предположить диагноз вирусной пневмонии, вызванной COVID-19, быстро оценить объем поражения легочной ткани и степень тяжести изменений, а также уточнить стадию изменений^{2,3,4,5}. Выполненная специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева предварительная оценка изменения структуры лучевой КТ-диагностики в период март – июнь 2020 г. в связи с эпидемией COVID-19 показала резкое (вплоть до трех раз) увеличение (по сравнению с аналогичным периодом за 2019 г.) числа КТ органов грудной клетки на фоне снижения числа КТ других анатомических областей [10]. Массированное использование КТ при диагностике заболеваний, опасных в эпидемическом отношении, требует особого внимания к качеству и объему полученной диагностической информации.

Качество получаемой диагностической информации зависит как от технического состояния оборудования, так и от методов проведения КТ-исследований и обработки полученных данных. Ошибки в работе оборудования, его неправильная калибровка, ошибки в настройках клинических протоколов могут приводить к получению некачественного КТ-изображения и, как следствие, к неправильной постановке диагноза или повторному проведению процедуры.

Чтобы учесть и иметь возможность контролировать все факторы проведения КТ-исследований, влияющие на качество диагностического процесса, необходимо научно обосновать и разработать систему обеспечения качества (ОК)⁶ проведения КТ-исследований, направленную на повышение диагностической эффективности КТ-исследований при поддержании уровней облучения пациентов на приемлемом уровне [1, 2, 16–25]. В зарубежной практике программы ОК с методиками проведения исследований, процедурами контроля качества (КК)⁷

² Временные методические рекомендации профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (covid-19) Версия 7 (03.06.2020) Министерство здравоохранения Российской Федерации https://static0.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/050/584/original/03062020_%D0%9C%D0%9A%D0%9A%D0%9A_COVID-19_v7.pdf [Temporary guidelines for the prevention, diagnosis and treatment of a novel coronavirus infection (covid-19) Version 7 (06/03/2020) Ministry of Health of the Russian Federation https://static0.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/050/584/original/03062020_%D0%9C%D0%9A%D0%9A_COVID-19_v7.pdf (In Russ.)]

³ Методические рекомендации, алгоритмы действия медицинских работников на различных этапах оказания помощи, чек-листы и типовые документы, разработанные на период наличия и угрозы дальнейшего распространения новой коронавирусной инфекции в Санкт-Петербурге. Версия 2.0 от 10.06.2020 https://spbmias.ru/wp-content/uploads/2020/06/COVID-19_Ver.2.0_10.06.pdf [Methodical recommendations, algorithms for medical staff at various stages of the provision of healthcare, checklists and standard documents developed for the period of the presence and threat of further spread of a novel coronavirus infection in St-Petersburg. Version 2.0 from 10.06.2020 https://spbmias.ru/wp-content/uploads/2020/06/COVID-19_Ver.2.0_10.06.pdf (In Russ.)]

⁴ Министерство здравоохранения Российской Федерации. Временные методические рекомендации: профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (covid-19) Версия 6 (28.04.2020) [Ministry of Health of the Russian Federation. Temporary guidelines for the prevention, diagnosis and treatment of novel coronavirus infection (covid-19). Version 6 (04/28/2020) (In Russ.)]

⁵ Методические рекомендации, алгоритмы действия медицинских работников на различных этапах оказания помощи, чек-листы и типовые документы, разработанные на период наличия и угрозы дальнейшего распространения новой коронавирусной инфекции в Санкт-Петербурге. Версия 1.0 – (17.04.2020) [Methodical recommendations, algorithms for the medical staff at various stages of healthcare, checklists and standard documents developed for the period of the presence and threat of further spread of a novel coronavirus infection in St. Petersburg. Version 1.0 – (04/17/2020) (In Russ.)]

⁶ Обеспечение качества проведения КТ-исследования – планируемые и систематически проводимые мероприятия, необходимые для обеспечения соответствия диагностического процесса установленным медико-техническим требованиям к качеству КТ-исследований.

⁷ Контроль качества – это контроль соответствия количественных и (или) качественных характеристик установленным критериям.

оборудования и его периодичностью разрабатываются профессиональными сообществами [2, 3, 11, 12, 16, 17] и широко применяются для проведения клинического аудита [18]. В Российской Федерации программы обеспечения качества для рентгенологических исследований были предложены в проекте СанПиН «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с медицинскими рентгеновскими аппаратами и проведении рентгенологических процедур», но до сих пор не были реализованы на практике.

Цель исследования – анализ существующих требований к ОК, методик проведения исследований и КК оборудования в КТ, а также формулировка предложений для создания программы ОК.

Структура программы обеспечения качества в КТ

По результатам анализа международных документов и рекомендаций были выделены основные компоненты программы ОК в КТ [2, 3, 11, 12, 14, 16, 17]:

- контроль качества диагностического и вспомогательного оборудования;
- контроль проведения КТ-исследований (инструкции, протоколы, стандарты и пр.);
- контроль обоснованности назначения исследования, в том числе контроль надлежащего информирования пациентов о ходе проведения исследования, противопоказаниях и возможных побочных эффектах, уровнях облучения и связанных с ними радиационных рисках;
- обеспечение радиационной безопасности пациентов, включающее мониторинг и оценку стандартных доз пациентов, и сравнение их значений с референтными диагностическими уровнями (РДУ), анализ и при необходимости пересмотр протоколов проведения КТ-исследований с целью снижения доз пациентов с сохранением диагностического качества изображений;
- перечень типовых аварийных ситуаций при проведении КТ-исследований и способы их предотвращения;

– требования к подготовке и переподготовке персонала, вовлеченного в процесс проведения диагностических исследований методом КТ.

Контроль качества оборудования

Требования к контролю качества (контролю эксплуатационных параметров) КТ в Российской Федерации на текущий момент представлены в следующих нормативно-методических и справочных документах:

- в СанПиН 2.1.6.1192-03⁸;
 - в государственных стандартах: ГОСТ 61223-3-5-2008⁹, ГОСТ 61223-2-6-2001¹⁰ и ГОСТ 60601-2-44-2013¹¹
- отражены требования к контролю качества диагностического оборудования, контролю качества КТ-изображения;
- в руководствах по эксплуатации компьютерных томографов различных производителей (Siemens, Toshiba, General Electric, Philips) представлены специфические для данного производителя требования к контролю качества оборудования и изображения, а также требования к калибровкам [19–22].

Следует отметить, что до настоящего момента обязательным специфическим контролируемым эксплуатационным параметром компьютерных томографов являлся только компьютерно-топографический индекс дозы (CTDI). Вопросы оценки качества изображения и воспроизводимости результатов действующими нормативно-методическими документами Роспотребнадзора не охватывались. Тем не менее, согласно технической документации на КТ-аппараты и рекомендациям международных профессиональных сообществ, контроль качества диагностического оборудования включает в себя проведение технического обслуживания согласно технической документации, выявление изношенных и поврежденных частей, проверку действия всех защитных устройств и блокировок, наличие и ведение эксплуатационной документации, контроль технического состояния оборудования, проверку соответствия значений параметров и характеристик оборудования требованиям нормативной и эксплуатационной документации.

⁸ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.02.2003 № 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03» (вместе с "СанПиН 2.6.1.1192-03. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Санитарные правила и нормы", утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 14.02.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.03.2003 N 4282) [SanPiN 2.6.1193-03 "Hygienic requirements on the contents and use of the X-ray rooms, X-ray units and conduction of the X-ray examinations. Sanitary rules and norms". Approved by the Chief State sanitary doctor of the Russian Federation 14.02.2003. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 19.03.2003 N 4282 (In Russ.)].

⁹ ГОСТ Р МЭК 61223-3-5-2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Оценка и контроль эксплуатационных параметров в отделениях лучевой диагностики. Часть 3–5. Приемочные испытания. Оценка эксплуатационных характеристик рентгеновской аппаратуры для компьютерной томографии" (утв. и введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 18.12.2008 N 571-ст) [GOST 61223-3-5-2008 "Evaluation and routine testing in medical imaging departments. Part 3–5. Acceptance tests. Imaging performance of computed tomography X-ray equipment" (In Russ.)]

¹⁰ ГОСТ Р МЭК 61223-2-6-2001. Государственный стандарт Российской Федерации. Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 2–6. Испытания на постоянство параметров. Аппараты для рентгеновской компьютерной томографии" (принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 28.12.2001 N 599-ст) [GOST 61223-2-6-2001 "Evaluation and routine testing in medical imaging departments. Part 2-6. Constancy tests. X-ray equipment for computed tomography" (In Russ.)]

¹¹ ГОСТ Р МЭК 60601-2-44-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Изделия медицинские электрические. Часть 2-44. Частные требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик к рентгеновским компьютерным томографам" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.11.2013 № 1393-ст) [GOST 60601-2-44-2013 "Medical electrical equipment. Part 2-44. Particular requirements for the basic safety and essential performance of X-ray equipment for computed tomography" (In Russ.)]

При разработке содержания программы обеспечения качества весь спектр процедур контроля качества в соответствии с действующими ГОСТ и специфическими требованиями производителей целесообразно разделять на группы в зависимости от требований к квалификации и компетенции персонала, выполняющего данные процедуры. Были выделены три группы процедур:

– процедуры ежедневного контроля, осмотра и калибровки диагностического оборудования, которые перед началом рабочего дня проводит рентгенолаборант, включающие в себя: контроль видимости пациента через окно между комнатой управления и процедурной; контроль соответствия даты и времени на консоли аппарата фактическим; контроль возможности полного закрытия дверей в процедурную; наличие и функционирование средств защиты; работу двустороннего переговорного устройства с пациентом; контроль работоспособности информационного табло и сигнальных лампочек при вхо-

де в процедурную; чистоту помещений и КТ-аппарата; контроль соответствия параметров микроклимата в помещениях эксплуатационной документации КТ-аппарата и требованиям санитарно-эпидемиологического законодательства (СанПиН 2.6.1.1192-03);

– испытания на постоянство параметров и калибровку диагностического и вспомогательного оборудования, которые проводит персонал, имеющий соответствующую подготовку, и/или представитель организации, осуществляющей техническое обслуживание КТ-оборудования по действующим методикам с использованием оборудования, входящего в комплект поставки диагностического оборудования (табл. 1);

– приемочные и периодические испытания, которые проводят аккредитованные лаборатории с периодичностью, установленной действующими нормативно-правовыми актами, в зависимости от области применения КТ-аппарата (табл. 2).

Таблица 1

Перечень контролируемых параметров в рамках испытаний на постоянство параметров

[Table 1]

The list of the parameters controlled as a part of the constancy testing

Контролируемый параметр [Controlled parameter]	Частота [Frequency]	Литературный/нормативный источник [References]	Критерии [Criteria]
Физико-технические параметры [Physical and technical parameters]			
Контроль функционирования аварийных выключателей излучения [Control of the emergency switches]	Не реже чем раз в квартал [at least once per quarter]	ГОСТ 60601-2-44 – 2013 [GOST 60601-2-44 – 2013] [2, 14]	Выключатели исправны [Switches should be operational]
Точность настройки лазерных центраторов [SPR accuracy]		ГОСТ 61223-3-5 – 2008 [GOST 61223-3-5 – 2008] [2, 11, 12, 15-17]	±1 мм
Параметры КТ-изображения (для клинических протоколов) [CT-image parameters]			
Артефакты КТ-изображения [CT Image artifacts]		[2, 11, 13, 17]	Отсутствуют [Artifacts are absent]
Однородность КТ-изображения [CT Image uniformity]	Не реже чем раз в неделю [at least once per week]	ГОСТ 61223-3-5 – 2008 [GOST 61223-3-5 – 2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] [2, 11, 12, 14-17]	±4 HU
Среднее число КТ-единиц (вода, воздух) [Mean CT number accuracy (water, air)]		ГОСТ 61223-3-5 – 2008 [GOST 61223-3-5 – 2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] [2, 11, 12, 14-17]	±4 HU
Оценка низкоконтрастных объектов [Assessment of the low contrast objects]	Не реже чем раз в год [at least once per year]	ГОСТ 61223-3-5 – 2008 [GOST 61223-3-5 – 2008] [11, 12, 15, 17]	Низкоконтрастные объекты: не > 6мм [Low contrast objects: not > 6mm] CNR: не менее 1,0 (для про- токолов головы и брюшной полости) [CNR: not < 1,0 (for chest and abdomen)]
Пространственное разрешение (высококонтрастные объекты) [Spatial resolution (high-contrast objects)]		ГОСТ 61223-3-5 – 2008 [GOST 61223-3-5 – 2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] [2, 11, 12, 14-17, 24]	ОБП (стандартная) – 6 пар линий/см ОГК (костная) – 8 пар линий/см Остальные протоколы – 5 пар линий/см [Abdomen (standard) – 6 lp/cm Chest (bone) – 8 lp/cm Another protocols – 5 lp/cm]

Перечень контролируемых параметров в рамках приемочных и периодических испытаний

Таблица 2

[Table 2]

The list of the controlled parameters as a part of the acceptance and periodical testing]

№ п/п	Параметр [Controlled parameter]	Цель [Objective]	Литературный/нормативный источник [References]	Критерии [Criteria]
Физико-технические параметры [Technical parameters]				
1.1	Точность настройки лазерных центраторов [SPR accuracy]	Оценка точности позиционирования пациентов [Assessment of patient positioning accuracy]	ГОСТ 61223-3-5-2008 [GOST 61223-3-5-2008] [2, 11, 12, 15–17]	Не более чем на ± 1 мм [No more than ± 1 mm]
1.2	Точность позиционирования стола [Table positioning accuracy]	Оценка точности позиционирования стола [Assessment of table indexing accuracy]	ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [11, 12, 14–17]	Не более чем на ± 2 мм [No more than ± 2 mm]
1.3	Наклон гентри [Gentry tilt accuracy]	Оценка точности угла наклона гентри [Estimating the accuracy of the title of the gantry]	ГОСТ 61223-3-5-2008 [GOST 61223-3-5-2008] ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [14, 17]	Не более чем на $0,5^\circ$ [No more than $0,5^\circ$]
1.4	Томографический индекс дозы (CTDIw) [Computed tomography dose index CTDIw]	Оценка точности значений CTDIw, отображаемых на дисплее аппарата [Assessment of the accuracy of CTDIw values displayed]	ГОСТ 61223-3-5-2008 [GOST 61223-3-5-2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [2, 11, 14, 16–17]	Не более чем на $\pm 20\%$ [No more than $\pm 20\%$]
1.5	Томографическая толщина среза [Image thickness accuracy]	Оценка точности номинальной томографической толщины среза реконструкции [Estimation of the accuracy of the nomi- nal tomographic slice thickness of the reconstruction]	ГОСТ 61223-3-5-2008 [GOST 61223-3-5-2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44 – 2013] [2, 12, 14–17]	Не более чем на ± 2 мм [No more than ± 2 mm]
1.6	Геометрическая эффективность [Geometric efficiency]	Оценка качества коллимации аппарата; какая часть излучения не попадает на детекторы [Assessment of the collimation quality of the CT; which part of the exposure does not fall on the detectors]	ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [17]	Не менее 70% [Not less than 70%]
1.7	Произведение дозы на длину (DLP) [Dose-length product]	Оценка точности значений DLP, отоб- ражаемых на дисплее аппарата [Evaluation of the DLP values accuracy displayed]	ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [2]	Не более чем на $\pm 20\%$ [No more than $\pm 20\%$]
1.8	Анодное напряжение [Voltage]	Оценка соответствия значений установленного анодного напряжения измеренным [Evaluation of the compliance of the values of the set anode voltage with the measured values]	ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [2, 17]	Не более чем на 10% [No more than $\pm 10\%$]
1.9	Слой половинного ослабления (СПО) [Half-value layer]	Оценка соответствия измеренных значений СПО установленным критериям [Evaluation of compliance of the mea- sured HVL values with the established criteria]	ГОСТ 60601-2-44-2013 [GOST 60601-2-44-2013] [2, 17]	Соответствие значениям, указанным в технической документации КТ-аппарата [Compliance with the specified values in the technical documentation of the CT]

№ п/п	Параметр [Controlled parameter]	Цель [Objective]	Литературный/нормативный источник [References]	Критерии [Criteria]
1.10	Воспроизводимость CTDI [CTDI reproducibility]	Оценка устойчивости радиационного выхода при повторяющихся идентичных параметрах [Evaluation of the stability of the radiation output across repeated identical parameters]	[17]	Не более 10% [No more than 10%]
Параметры КТ-изображения [CT-image parameters]				
2.1	Однородность [Image uniformity]	Оценка соответствия измеренных значений однородности изображения установленным критериям [Evaluation of compliance of the measured values of image uniformity with established criteria]	ГОСТ 61223-3-5-2008 [GOST 61223-3-5-2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] [2,11,12,14-17]	Не более чем на 4 HU [No more than 4 HU]
2.2	Среднее число КТ-единиц [CT number accuracy]	Оценка точности определения значений средних чисел КТ-единиц, отображаемых аппаратом [Assessment of the accuracy of determining the values of the average numbers of CT displayed by the device]	ГОСТ 61223-3-5 – 2008 [GOST 61223-3-5 – 2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] [2,11,12,14-17]	Не более чем на 10% или 0,2 HU [No more than 10% or 0,2 HU]
2.3	Пространственное разрешение (высоко- контрастные объекты) [Spatial resolution]	Оценка предельных значений пространственного разрешения высококонтрастных объектов [Assessment of the limiting values of the spatial resolution of high-contrast objects]	ГОСТ 61223-3-5-2008 [GOST 61223-3-5-2008] ГОСТ 61223-2-6-2001 [GOST 61223-2-6-2001] [2, 11, 12, 14–17, 24]	Не более $\pm 15\%$ от значений, установленных при приёмочных испытаниях, и не более значений, указанных в технической документации КТ-аппарата [No more than $\pm 15\%$ of the established values during acceptance tests, and not more than the specified values in the technical documentation of the CT]

Основными параметрами для оценки КТ-изображения являются среднее число КТ-единиц различных материалов, однородность, наличие артефактов, разрешающая способность высококонтрастных и низкоконтрастных объектов [12]. Среднее число КТ-единиц различных материалов, однородность и наличие артефактов зависят от исправности и калибровки оборудования, их достаточно проверять на выбранном протоколе в динамике на регулярной основе. Шум изображения и разрешающая способность для высококонтрастных и низкоконтрастных объектов зависят от параметров сканирования и реконструкции. Данные параметры необходимо контролировать на основных диагностических протоколах, а также при создании новых или оптимизации старых протоколов.

Методики проведения исследований

Проведение любого исследования в медицинской организации, включая КТ, выполняется в соответствии

с порядками оказания медицинской помощи и с учетом стандартов медицинской помощи¹², а также на основании правил проведения рентгенологических исследований, согласно которым в медицинской организации может разрабатываться и утверждаться инструкция по порядку проведения КТ. Как правило, в инструкции отражаются типовые цели исследования; показания и противопоказания к проведению КТ-исследований; требования к подготовке пациента к проведению исследования и оборудованию; сведения о типичных дозиметрических величинах при проведении КТ-исследования – объемном компьютерно-томографическом индексе дозы ($CTDI_{vol}$), произведении дозы на длину сканирования (DLP) и эффективной дозе; детализированные методики выполнения КТ-исследований, в том числе и для нестандартных случаев, включая укладку пациента, объем рентген-контрастного препарата, скорость введения его пациенту, расчет эффективных доз пациентов и пр.; протокол ска-

¹² Федеральный закон «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» от 21.11.2011 № 323-ФЗ (последняя редакция) [Federal Law "On the basics of the healthcare of citizens in the Russian Federation" from 21.11.2011 № 323-FZ. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121895/ [Accessed 01.08.2018] (In Russ.)]

нирования и метод реконструкции; требования по радиационной безопасности пациентов и персонала; контроль качества проведения исследования; анализ и интерпретацию результатов исследования, основные положения заключения; задействованный на каждом этапе исследования персонал. При отсутствии подобных инструкций медицинские организации пользуются методическими рекомендациями, приказами органов здравоохранения и другими документами.

Для обеспечения качества КТ-исследований необходимо создавать дифференцированные протоколы сканирования для разных групп пациентов с учетом возраста, массы тела, области сканирования, поставленной клинической задачи и технических характеристик аппарата. Предложения по разработке дифференцированных протоколов КТ-сканирования приведены в таблице 3.

Таблица 3

Примеры и критерии разработки протоколов КТ-сканирования с учетом специфики проведения исследования

[Table 3]

[Examples and criteria for specification of the CT protocols]

Критерии разработки КТ-протоколов [Criteria for the developments of specific CT protocols]	Пример [Examples]
Возраст [Age specific protocols]	Взрослые/дети Доза для детей < доза для взрослых [Adults/Children. Doses for children are lower than for adults]
Область сканирования [Anatomic region specific protocols]	ОГК, ОБП, голова и др. [Chest, abdomen, head and etc]
Для каждой области сканирования минимум по 3 варианта протоколов [For each anatomic region – at least 3 different protocols]	Низкодозовый протокол, рутинный протокол, протокол для многофазного исследования [Low dose, routine, multiphase]
Технические характеристики [Protocols with different imaging parameters]	Размер пациента: напряжение, параметры экспозиции (мАс, автоматическая модуляция силы тока) Скорость сканирования: питч, шаг стола Фаза сканирования: напряжение, толщина среза, экспозиция, зона/длина сканирования [Size specific dose adjustment: kV selection, AEC Scan speed specific adjustment: pitch, table feed Phase-specific adjustment: kV, slice thickness, mAs, scan area/length]

Выбор конкретного протокола КТ-сканирования определяется до начала исследования врачом, проводящим исследование¹³, или рентгенолаборантом, при наличии у него соответствующей квалификации и исходя из поставленной клинической задачи. Перед проведением КТ-исследования пациент заполняет добровольное информированное согласие на проведение исследования, которое включает в себя:

- информацию о методике проведения исследования, противопоказаниях и возможных побочных эффектах или осложнениях (в соответствии с инструкцией проведения КТ-исследования);
- информацию о радиационном риске, связанном с этим исследованием, для здоровья пациента;
- результаты необходимых анализов или тестов на отсутствие противопоказаний к исследованию (в том числе противопоказаний к введению рентген-контрастного препарата), согласно инструкции проведения КТ-исследования;
- информацию о наличии беременности;
- информацию о поведении и радиационной защите для лиц, осуществляющих поддержку пациента.

Любое назначение КТ-исследования должно быть обосновано путем: анализа направлений на исследование, в которых указывается предварительный диагноз, вид и цель исследования; анализа данных медицинской карты пациента, с учетом ранее проведенных нелучевых и лучевых методов диагностики, полученных и ожидаемых доз облучения пациента; соблюдения требований соответствующей инструкции по проведению КТ-исследования и установленных санитарно-эпидемиологических требований в области радиационной безопасности.

Согласно требованиям нормативно-методических документов по обеспечению радиационной безопасности в Российской Федерации, при получении пациентом эффективной дозы облучения за год более 200 мЗв или достижении накопленной дозы медицинского диагностического облучения пациента 500 мЗв необходимо принять меры по дальнейшему ограничению его облучения, если КТ-исследование не проводится по жизненным показаниям (СанПиН 2.6.1.1192-03). Необходимость использования нестандартного протокола КТ-исследования также должна быть подтверждена в направлении с обязательным указанием причины. Окончательное решение о проведении или отказе в проведении КТ-исследования принимает врач-рентгенолог, проводящий исследование.

Контроль доз облучения пациентов

С целью оптимизации радиационной защиты пациента и оценки радиационных рисков при проведении КТ-исследований определяют и ведут учет таких дозимет-

¹³ Правительство Москвы, Департамента здравоохранения г. Москвы, ГБУЗ «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения г. Москвы». Информативность методов лучевой диагностики при различных патологических состояниях организма. Раздел 6. Лучевая диагностика заболеваний сердечно-сосудистой системы. Методические рекомендации. 2020. [Government of Moscow, Department of Health of Moscow, GBUZ «Scientific and Practical Center of Medical Radiology of the Department of Health of Moscow». Informativeness of X-ray diagnostics for various pathological conditions of the body. Section 6. X-ray diagnostics of the diseases of cardiovascular system. Guidelines. 2020 (In Russ.)]

рических характеристик внешнего облучения пациентов, как произведение дозы на длину сканирования (DLP) и эффективная доза. Эффективную дозу рассчитывают на основании значения DLP в соответствии с утвержденными методиками^{14, 15}.

Для оптимизации протоколов КТ-сканирования и защиты пациентов на основании анализа значений DLP и эффективных доз пациентов в КТ-отделении определяют их стандартные значения для отдельных видов КТ-исследований (голова, грудная клетка и т.п.) [28]. Стандартное значение DLP или эффективной дозы для отдельного вида КТ-исследования определяется как среднее арифметическое значение для выборки из не менее чем 20 взрослых пациентов. Определение стандартных значений DLP или эффективных доз проводят не реже чем один раз в год или после любых изменений клинических протоколов КТ-сканирования. Следует отметить, что при проведении многофазных КТ-исследований с контрастом стандартные значения DLP и эффективных доз определяют как для каждой фазы сканирования, так и за все исследование с учетом всех фаз сканирования. Стандартные значения эффективных доз целесообразно использовать также при заполнении Формы государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенодиагностических исследований» на уровне отдельной медицинской организации¹⁶ [29].

Для стандартизации сбора данных из разных медицинских организаций при заполнении формы 3-ДОЗ необходимо:

- для многофазных КТ-исследований с введением контрастного вещества заносить суммарную эффективную дозу за все фазы в строку соответствующей анатомической области исследования формы 3-ДОЗ;

- для КТ-исследований совмещенных областей грудная клетка + верхняя часть брюшной полости заносить суммарную эффективную дозу в строку 01 «Органы грудной клетки» формы 3-ДОЗ;

- для КТ-исследований совмещенных областей брюшная полость + таз заносить суммарную эффективную дозу в строку 09 «Органы брюшной полости» формы 3-ДОЗ;

- для КТ-исследований совмещенных областей грудная клетка + верхняя часть брюшной полости + таз заносить суммарную эффективную дозу в строку 10 «Верхняя часть желудочно-кишечного тракта» формы 3-ДОЗ.

Оптимизация радиационной защиты пациентов

Оптимизация радиационной защиты пациентов осуществляется путем регулярного анализа параметров протоколов КТ-сканирования, определения стандартных значений DLP и эффективных доз пациентов при КТ-сканировании различных отделов организма и их сравнения с предложенными значениями РДУ (табл. 4), а также контроля качества КТ-изображения¹⁷.

Таблица 4

Предложенные значения референтных диагностических уровней (РДУ) для КТ-сканирования для взрослых пациентов для основных областей сканирования [28]

[Table 4]

Diagnostic reference levels of CT for adults		
Область КТ-сканирования [Scan region]	DLP*, мГр×см [DLP, mGy·cm]	ЭД**, мЗв [Effective dose, mSv]
Голова [Head]	1200	2
ОГК [Chest]	500	6
ОБП [Abdomen]	800	11
Малый таз [Pelvis]	900	13
Все тело*** [Whole body]	1000	17
Диагностический [Diagnostic]	600	10
Низкодозовый [Low dose]		

*DLP – произведение дозы на длину сканирования; [DLP – dose-length product]

**ЭД – эффективная доза [Effective dose]

***Доза от КТ-сканирования при ПЭТ/КТ-исследовании [CT dose for PET/CT-examination]

¹⁴ МУ 2.6.1.2944-11. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Методические указания (Утв. главным государственным санитарным врачом 19.07.2011) [MU 2.6.1.2944-11. 2.6.1. Ionizing radiation, radiation protection. Control of the effective doses of patients for the medical X-ray examinations. Methodical instructions" (In Russ.)]

¹⁵ МУ 2.6.1.3584-19 Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Методические указания. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 30.10.2019. [MU 2.6.1.3584-19 Changes in MU 2.6.1.2944-11 Control of the effective doses of patients for the medical X-ray examinations. Methodical instructions (In Russ.)]

¹⁶ Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ. Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности. Утверждены Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 16.02.2007 г. № 0100/1659-07-26. [Filling of the Federal state statistical surveillance form No. 3-DOZ. Methodical recommendations the provision of the radiation safety. Approved by the Federal Service for Surveillance on Human Well-being and Consumer Rights Protection on February 16, 2007, No. 0100 / 1659-07-26 (In Russ.)]

¹⁷ Роспотребнадзор. Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения. Методические рекомендации МР 2.6.1.0066-12. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. 25 с. [Methodical recommendation МР 2.6.1.0066-12 "Implementation of diagnostic reference levels for the optimization of the radiation protection of the patient in conventional radiology". Moscow, Rospotrebnadzor, 2012, 28 p. (In Russ.)]

Для каждого стандартного значения DLP и эффективной дозы определяют стандартное отклонение σ по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

где: n – количество пациентов в выборке; x_i – значение DLP или эффективной дозы для пациента i ; $\bar{x}$ – среднее значение DLP или эффективной дозы в выборке из n пациентов.

Принимается, что значения стандартного DLP или эффективной дозы плюс два стандартных отклонения не должны превышать установленных значений РДУ [30]. В том случае, если на аппарате используют различные протоколы КТ-сканирования для одной анатомической области, с РДУ сравнивают стандартные дозы пациентов для каждого из этих протоколов. При проведении многофазных КТ-исследований с контрастом с РДУ сравнивают стандартные дозы пациентов для каждой фазы. В том случае, если стандартные значения DLP и эффективных доз для соответствующих протоколов КТ-сканирования плюс два стандартных отклонения превышают установленные значения РДУ, выясняют причину этого превышения. В частности, проводят оптимизацию протоколов КТ-сканирования, которая заключается в определении таких параметров КТ-сканирования, при которых обеспечивается минимальная доза пациента при получении необходимой диагностической информации.

Оптимизация КТ-исследований включает в себя следующие действия:

- определение дозиметрических характеристик (DLP или эффективной дозы) у группы пациентов при проведении КТ-исследований с использованием протоколов с включённым автоматическим контролем экспозиции или DLP при проведении КТ-исследования с типовым протоколом сканирования;
- вычисление стандартных значений DLP или эффективных доз для каждого вида КТ-исследования на каждом компьютерном томографе;
- сравнение полученных стандартных значений DLP и эффективных доз на каждом компьютерном томографе с соответствующими региональными или общенациональными значениями РДУ;
- выявление тех компьютерных томографов, на которых стандартные значения DLP и эффективных доз ($+2\sigma$) превышают соответствующие региональные или общенациональные значения РДУ [30];
- выявление возможных технических или методических причин, по которым стандартные значения DLP и эффективных доз на отдельных аппаратах могут значимо превышать соответствующие значения РДУ, и принятие необходимых мер по устранению выявленных причин, если это возможно.

Оптимизация должна в обязательном порядке сопровождаться оценкой качества КТ-изображения на тех компьютерных томографах, где проведены меры коррекции. При создании новых протоколов или изменении параметров в существующих протоколах сканирования обязательно проводят оценку качества изображения. Для оценки качества КТ-изображения возможно использовать два различных подхода [31]:

- оценка физико-технических параметров изображения (шум изображения, пространственное разрешение высококонтрастных и низкоконтрастных объектов), которую проводят медицинские физики или инженеры с использованием специальных фантомов [15, 19–22, 32]. Такой подход обеспечивает объективность и воспроизводимость, однако слабо связан с диагностическим качеством изображения (возможностью распознать и описать патологию) [33].

- экспертная оценка качества клинических изображений антропоморфного фантома или пациента с привлечением врачей-рентгенологов, которая подразумевает субъективную оценку возможности выявления патологий на КТ-изображениях. Этот подход отличается плохой воспроизводимостью, что связано с разным представлением врачей-экспертов о качестве изображения [34]. На текущий момент в Российской Федерации отсутствует методическая база для проведения такой оценки качества изображения¹⁸.

В связи с этим при оптимизации протоколов сканирования для первичной оценки качества изображения целесообразно использовать физико-технические параметры, которые могут определяться вручную или с использованием специализированного программного обеспечения [25].

Шум является наиболее легко определяемым в клинической практике количественным параметром КТ-изображения и зависит от параметров протокола сканирования и реконструкции [23, 34, 35]. Шум КТ-изображения связан с информативностью изображения, однако применение современных итеративных методов реконструкции может искусственно снижать шум, не повышая информативность изображения [26]. Поэтому этот параметр целесообразно определять для каждого протокола, используемого в клинической практике отделения, а также при пересмотре протоколов (изменении параметров сканирования или алгоритма реконструкции) и при проведении оптимизации.

Помимо этого, шум КТ-изображения оказывает влияние на визуализацию и способность четко различать объекты с низкой контрастностью (объекты с небольшой разницей в плотностях). Оценка этого параметра актуальна для протоколов сканирования, целью которых является обследование зон с близкими по плотности структурами (например, брюшная полость и голова). Изображения

¹⁸ Правительство Москвы, ГБУЗ «Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения г. Москвы». О порядке проведения аудита качества исследований в рентгенологических и радиологических отделениях медицинских организаций города Москвы, работающих в системе Единого радиологического информационного сервиса, по специальности «Рентгенология» и «Радиология». Версия 1.0. Методические рекомендации. 2016. [Government of Moscow, GBUZ "Scientific and Practical Center for Medical Radiology of the Moscow Department of Health". On the conduction of the audit of the quality of examinations in X-ray and radiological departments of medical facilities in Moscow, working in the system of the Unified Radiological Information Service, in the specialty "X-ray" and "Radiology". Version 1.0. Guidelines. 2016 (In Russ.)]

оценивают визуально по возможности распознать низко-контрастные объекты разного размера. Для количественной оценки низкоконтрастных объектов определяют параметр «Отношение контраст – шум» (CNR) [23].

Для оценки способности четко различать объекты с существенной разницей в плотностях, а также различать на изображении мелкие объекты целесообразно контролировать пространственное разрешение высококонтрастных объектов, это актуально для протоколов сканирования головы и органов грудной клетки, а также других протоколов, для которых важна детализация. Существуют два способа измерения пространственного разрешения, которые могут использоваться для оценки качества изображения:

- модуляция периодической миры, которая определяется по мере с наибольшей различимой частотой пар линий;
- функция передачи модуляции (MTF), которую используют для оценки потери амплитуды сигнала при уменьшении размера объектов (рис. 2) [25, 27].

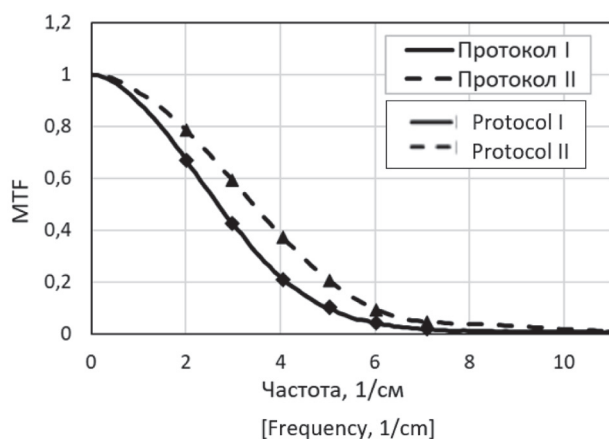


Рис. 2. Значения MTF для разных мер разных частот и аппроксимация функции MTF

[Fig. 2. MTF values for different resolution patterns of different frequencies and approximation of the MTF function]

На рисунке 2 приведено сравнение кривых MTF для изображений, полученных на разных протоколах. Кривые демонстрируют снижение амплитуды сигнала и контрастности при увеличении частоты пар линий, что приводит к размытости контуров объектов на границе структур с разными плотностями. На четкость КТ-изображения влияют параметры сканирования и реконструкции. Для протокола I снижение MTF происходит быстрее, чем для протокола II, что говорит о меньшей детализации изображений, получаемых на протоколе I.

Аварийные ситуации при проведении КТ-исследований

Переоблучение или необоснованное облучение пациента, персонала или населения, а также случаи, которые привели к тяжелым последствиям для здоровья пациента, при проведении рентгенодиагностических исследований относят к аварийной ситуации [36]. Аварийные ситуации при проведении КТ-исследований могут быть вызваны неисправностью оборудования, неправильными действиями персонала или иными причинами, которые могут привести или привели к облучению персонала или населения выше основного предела годовой дозы, установленного действующим законодательством¹⁹, либо к облучению пациентов дозой, отличающейся от величины стандартной дозы для данного протокола сканирования более чем в 10 раз [41] или привели к развитию детерминированных эффектов у пациента [38].

Для использования в рамках программы обеспечения качества была предложена классификация аварийных ситуаций при проведении КТ-исследований в зависимости от степени тяжести (последствий аварийной ситуации), гармонизированная с действующими документами Ростехнадзора²⁰, требованиями МАГАТЭ [29] и подходами, предложенными в зарубежной литературе [38–40]. Предлагаемая классификация аварийных ситуаций представлена в таблице 5.

При подготовке таблицы 5 использовались следующие подходы:

- аварийные ситуации разделены на радиационные и нерадиационные в соответствии с п. 6.19 СанПиН 2.6.1.1192-03;

¹⁹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 N 47 "Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09 (вместе с «НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы») (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ (Дата обращения 01.08.2018) [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ [Accessed 01.08.2018] (In Russ.)]

²⁰ Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила расследования и учета нарушений при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационных источников, пунктов хранения радиоактивных веществ и радиоактивных отходов и обращении с радиоактивными веществами и радиоактивными отходами». НП-014-16. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 15.02.2016. 22 с. [Federal norms and rules "Rules for the investigation and accounting of violations during the operation and decommissioning of radiation sources, storage facilities for radioactive substances and radioactive waste and handling radioactive substances and radioactive waste." NP-014-16. 02/15/2016. 22 p. (In Russ.)]

Предлагаемая классификация аварийных ситуаций при проведении КТ-исследований [38]

Таблица 5

[Table 5]

Classification of radiation accidents during CT-examinations

Тип аварийной ситуации [The type of radiation accident]	Классификация аварийной ситуации [Classification]	Характеристика аварийной ситуации [Feature]	Примеры ситуаций, специфичных для компьютерной томографии [Examples]
Радиационная авария [Radiation accident]	PA1 [RA1]	Радиационная авария, которая привела к облучению персонала или населения в дозах выше основного предела доз, установленных нормами радиационной безопасности или в результате которой облучение пациентов превысило стандартную дозу более чем в 10 раз или привело к развитию детерминированных эффектов [A radiation accident that resulted in exposure of the staff or the public in doses exceeding the main dose limit established by the norms of the radiation safety; or as a result – the exposure of patients exceeded the standard dose by the factor of 10 or more or led to the development of deterministic effects]	Облучение пациентов дозой, превышающей соответствующую стандартную дозу для данного КТ-исследования (протокола сканирования) в 10 и более раз Разовое облучение пациента в дозе, превышающей 200 мЗв (СанПин 1192-03) Развитие у пациента детерминированных эффектов (алопеция, эритема и пр.) после проведения КТ-сканирования [38, 41] Непреднамеренное облучение эмбриона или плода в дозе, превышающей 100 мГр (СанПин 1192-03) [- exposure of patients with a dose exceeding the corresponding standard dose for CT-examinations (scan protocol) by 1the factor of 10 or more - exposure of a patient with a dose exceeding 200 mSv (SanPiN 2.6.1193-03) - development of the deterministic effects (alopecia, erythema, etc.) after the CT-examination [38,41] - unintended exposure of the embryo or fetus with a dose exceeding 100 mGy (SanPiN 2.6.1193-03)]
	PA2 [RA2]	Радиационная авария, которая не привела к переоблучению населения и персонала выше основных пределов доз, но в результате которой произошло избыточное облучение пациента или облучение персонала выше установленного в организации контрольного уровня годовой эффективной дозы [A radiation accident that did not lead to overexposure of the public and staff above the basic dose limits, but resulted in an overexposure of the patient]	Выполнение КТ-исследования не той анатомической области и/или не с тем протоколом КТ-сканирования [41–43] Облучение пациентов дозой, превышающей соответствующую стандартную дозу для данного КТ-исследования (протокола сканирования) более чем в 3 раза, но менее чем в 10 раз [41–43] Непреднамеренное облучение эмбриона или плода в дозе, не превышающей 100 мГр [41–43] [- performing CT-examinations for the wrong anatomical area and/or with the wrong CT- protocol [41–43] - exposure of patients with a dose exceeding the corresponding standard dose for a CT-examinations (scanning protocol) by the factor of 3 but less than a factor of ten [41–43] - unintended exposure of the embryo or fetus with a dose not exceeding 100 mGy [41–43]]
Радиационное происшествие [Radiation incident]	PA3 [RA3]	Радиационная авария, в результате которой произошло необоснованное облучение пациента [44] [Radiation accident resulting in unjustified exposure of the patient [44]]	Ошибочное проведение КТ-исследования не тому пациенту, которому оно было назначено; [43] Неисправность оборудования, приведшая к невозможности закончить КТ-исследование [43] Проведение КТ-исследования без надлежащего обоснования [43] Проведение КТ-исследования на неисправном/ неоткалиброванном компьютерном томографе, приведшее к неудовлетворительному диагностическому качеству КТ-изображений [43] Проведение КТ-исследования при экстравазальном введении контрастного препарата, в случае невыполнения поставленной цели исследования [43] [-CT-examination was performed for the wrong patient; [43] - equipment failure, leading to the incomplete CT-examination [43] - CT-examination was performed without proper justification [43] - the performing of a CT-examination on a faulty/un-calibrated CT-scanner, which led to an unsatisfactory diagnostic quality of CT-images [43] - the performing of a CT-examination with extravasal injection of a contrast agent [43]]

Тип аварийной ситуации [The type of radiation accident]	Классификация аварийной ситуации [Classification]	Характеристика аварийной ситуации [Feature]	Примеры ситуаций, специфичных для компьютерной томографии [Examples]
Нерадиационная авария [46] [Non-radiation accident [45]]	HPA1 [NRA1]	Нерадиационная авария, которая привела к тяжелым последствиям для здоровья пациента [A non-radiation accident that led to the serious consequences for the patient's health]	Анафилактический шок при введении контрастного препарата Пожар Поражение электрическим током Травмирование пациента вследствие неисправности элементов компьютерного томографа [- anaphylactic shock with the injection of a contrast agent - fire - electric shock - trauma of the patient due to malfunction of the parts of the computed tomograph]
	HPA2 [NRA2]	Нерадиационная авария, которая могла привести к последствиям для здоровья пациента [A non-radiation accident that could lead to consequences for the patient's health]	Экстравазальное введение контрастного препарата Застывание пациента в гентри компьютерного томографа Выход из строя механических частей компьютерного томографа при проведении исследования [- extravasal injection of a contrast agent - patient being stuck in the gantry of a computed tomograph - failure of the mechanical parts of the computer tomograph during the examination]

– радиационные аварийные ситуации разделены на радиационные аварии и происшествия в соответствии с приложением 2 НП-014-16;

– радиационные происшествия разделены на две категории в зависимости от причины переоблучения пациента: обоснованное облучение в аномально высокой дозе и необоснованное назначение/повторение исследования;

– численные критерии отнесения аварийной ситуации к радиационной аварии/происшествию были адаптированы из [41];

– нерадиационные аварии были также разделены по степени потенциального вреда (последствий для здоровья) пациента.

В каждом КТ-отделении в обязательном порядке должна быть разработана инструкция по действиям персонала при возникновении радиационных и нерадиационных аварий и план мероприятий по защите персонала, пациентов и населения (СанПиН 2.6.1.1192-03). Для повышения качества диагностического процесса и обеспечения радиационной защиты пациентов и персонала в КТ-отделении рекомендуется проводить постоянный мониторинг и учет аварийных ситуаций с целью их выявления и устранения, а также анализа причин, повлекших за собой аварийную ситуацию. О каждой аварийной ситуации необходимо информировать администрацию медицинской организации, а в случае радиационной аварии необходимо проинформировать федеральные государственные органы санитарно-эпидемиологического надзора.

Требования к подготовке персонала

Основной целью мероприятий обучения и повышения квалификации персонала, занятого в разных этапах под-

готовительного и диагностического процессов, является формирование у него культуры в области обеспечения качества и безопасности.

Обеспечение качества поддерживается наличием штата квалифицированного персонала всех необходимых специальностей. Согласно международным рекомендациям, для реализации программы обеспечения КТ-отделения привлекают медицинского физика [37]. Медицинский физик совместно с инженерами, проводящими техническое обслуживание медицинского оборудования, является ответственным за поддержание оборудования в рабочем состоянии, обеспечение своевременного ремонта в случае необходимости, а также за проведение ежедневных и ежемесячных процедур контроля качества оборудования и КТ-изображения, калибровку оборудования, ведение технической документации, контроль качества выполнения диагностических процедур, радиационную защиту пациентов и персонала, определение стандартных доз, оптимизацию методик и протоколов сканирования. В случае выхода из строя диагностического оборудования, причины которого не могут быть устранены внутренними силами, привлекают представителей организации, осуществляющей техническое обслуживание данного КТ-оборудования. Также к оптимизации протоколов сканирования, если это выходит за рамки компетенции сотрудников КТ-отделения, привлекают сертифицированных специалистов поставщика оборудования или организации, осуществляющей обслуживание.

Для обеспечения качества проведения исследований на непрерывной основе в течение всей трудовой деятельности персонал отделения проходит повышение квалификации, профессиональную переподготовку и инструктажи, в том числе и по радиационной безопасности. Персонал

допускается к выполнению работ при соответствии квалификации сотрудника требованиям, предъявляемым к данному виду работ, после инструктажей и ознакомления с инструкциями выполнения всех необходимых процедур.

Достижение целей подготовки осуществляются за счет:

- планирования, организации и осуществления соответствующих инструктажей, занятий, курсов подготовки персонала по проведению КТ-исследований, включая вопросы по радиационной безопасности;
- оценок профессионального образования, опыта, знаний и умений персонала;
- определения уровня индивидуальной профессиональной подготовки для удовлетворительной работы.

Заключение

Постоянное совершенствование существующих методов лучевой диагностики требует повышенного внимания не только к обеспечению радиационной безопасности пациентов и персонала, но и к состоянию диагностического оборудования, методикам проведения исследования и анализу получаемых результатов.

В настоящей статье были проанализированы различные отечественные и зарубежные источники, где частично представлены те или иные аспекты обеспечения качества при проведении КТ-исследований и были сведены в единую программу, которая включает в себя:

- контроль качества диагностического оборудования, позволяющий при регулярном проведении своевременно выявлять и устранять технические неисправности, которые могут повлиять на качество диагностического процесса. Мониторинг технического состояния оборудования может предотвратить выход его из строя на длительный срок, обеспечить своевременный ремонт, не приостанавливая работу КТ-отделения;
- оценку качества КТ-изображений, на основе контроля объективных параметров (среднее число КТ-единиц различных материалов, однородность, наличие артефактов, разрешающая способность высококонтрастных и низкоконтрастных объектов) для проверки текущего состояния оборудования, при создании новых протоколов сканирования или проведении оптимизации, а также субъективную (экспертную) оценку качества КТ-изображения;
- методики проведения исследований, нацеленные на качество выполнения исследований, создание дифференцированных протоколов сканирования, что позволяет применять оптимальные параметры протокола сканирования для каждого пациента и снизить риск ошибки при проведении исследования;
- оценку доз облучения пациентов, которая при применении концепции РДУ позволит контролировать уровни облучения пациентов на таких низких значениях, на которых это возможно без потери диагностического качества полученной информации, что является неотъемлемой частью процесса оптимизации;
- требования к персоналу и укомплектованности отделения необходимым количеством квалифицированных специалистов разного профиля (врачи-рентгенологи, инженеры, медицинские физики, рентгенолаборанты), что позволит обеспечить радиационную безопасность как пациентов, так и самого персонала;

– предупреждение аварийных ситуаций, учет, анализ их причин и разработка мероприятий по предупреждению возникновения аварийных ситуаций;

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ в статье предложена программа обеспечения качества при проведении КТ-исследований, включающая основные аспекты диагностического процесса, которые прямо или косвенно могут повлиять на его качество. Внедрение в практику такой программы позволит повысить эффективность КТ-диагностики в Российской Федерации.

Литература

1. Samei E., Pelc N.J. [Editors]. *Computed Tomography: Approaches, Applications, and Operations*. Springer, Switzerland. 2020. 469 p.
2. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series no. 19: Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications. IAEA: Vienna, 2012. 192 p.
3. European Commission. Radiation protection № 180 part, 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population/ European Commission/ – European Commission: Luxembourg, 2014. 181 p.
4. Hart D., Hilier M.C., Shrimpton P.C. Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. HPA-CRCE-034. Health Protection Agency, 2012. 87 p.
5. Eurostat: your key to the European statistics. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (Дата обращения: 01.09.2020).
6. OECD Indicators. Health at a Glance 2019: OECD Indicators, OECD Publishing. Paris, 2019. 243 p.
7. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информ. сборник. СПб, 2019. 72 с.
8. Chipiga L., Bernhardtsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation // *Rad. Prot. Dosim.* 2016. Vol. 169, № 1-4. P. 240-244.
9. Brambilla M., Vassileva J., Kuchcinska A., Rehani M.M. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action // *European Radiology*. 2019. 9 p. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06528-7>
10. Водоватов А.В., Романович И.К., Историк О.А., и др. Предварительная оценка изменения структуры и коллективной дозы от КТ-исследований за период март-июнь 2020 г. в связи с диагностикой COVID-19 в Российской Федерации. 2020. 15 с.
11. American College of Radiology. *Computed Tomography: Quality Control Manual – Copyright 2017*, American College of Radiology. 86 p.
12. McCollough C.H., et al. The phantom portion of the American College of Radiology (ACR) Computed Tomography (CT) accreditation program: Practical tips, artifact, examples, and pitfalls to avoid // *Medical Physics*. 2004. Vol.31, No 9. P. 2423-2442.
13. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 132 с.
14. Министерство здравоохранения республики Беларусь. Протокол контроля качества работы рентгеновских компьютерных томографов, 2004. 34 с.
15. Научно-производственное предприятие «ДОЗА». АCR СТ аккредитационный фантом для компьютерной томографии. Руководство по эксплуатации, 2011. 21 с.
16. European Commission. Criteria for Acceptability of Medical Radiological Equipment used in Diagnostic Radiology,

- Nuclear Medicine and Radiotherapy // Radiation protection N° 162. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. 84 p.
17. American Association of Physicists in Medicine. Performance of Evaluation of Computed Tomography Systems // The report of AAPM N233. 2019. 71 p.
18. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series no. 4: Comprehensive Clinical Audits of Diagnostic Radiology Practices: A Tool for Quality Improvement. IAEA: Vienna, 2010. 209 p.
19. Toshiba Medical Systems Corporation. Руководство по эксплуатации рентгеновского КТ-сканера фирмы Toshiba для томографии всего тела. Aquilion TSX-101A. Toshiba medical systems corporation, 2004. 255 с.
20. Siemens AG. SOMATOM Definition. Руководство по эксплуатации. Siemens AG, 2006.
21. GE Healthcare Japan Corporation. Техническое руководство. Revolution™ EVO. General Electric Company, 2015. 428 с.
22. Phillips Medical Systems. Руководство по эксплуатации КТ Phillips. США, 2014. 79 с.
23. Love A., Olsson M-L., Siemund R., et al. Six iterative reconstruction algorithms in brain CT: a phantom study on image quality at different radiation dose levels // The British Journal of Radiology. 2013. Vol. 86, Issue 1031. 11 p.
24. International Commission on Radiation Units and Measurements. Spatial Resolution in CT // Journal of the ICRU. Report 87. 2012. Vol. 12, No 1. P. 107-120.
25. Friedman S.N., Fung G.S.K., Siewerdsen J.H., et al. A simple approach to measure computed tomography (CT) modulation transfer function (MTF) and noise-power spectrum (NPS) using the American College of Radiology (ACR) accreditation phantom // Medical Physics. 2013. Vol. 40, No 5. P. 1-9.
26. Andersen H.K., Völgyes D., Trægde Martinsen A.C. Image quality with iterative reconstruction techniques in CT of the lungs – A phantom study // European Journal of Radiology Open. 2018. Vol. 5. P. 35-40.
27. Droege R.T., Morin R.L. A practical method to measure the MTF of CT scanners // Medical Physics. 1982. Vol. 9, No 5. P. 758-760.
28. Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Golikov V.Yu., et al. Potential for the establishment of national CT diagnostic reference levels in the Russian Federation // Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice. Vienna, 2017. IAEA, book of contributions: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session2.pdf>
29. Водоватов А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 47-55. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>
30. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide №SSG-46. Vienna: IAEA, 2018. 318 p.
31. Zarb F., Rainford L., McEntee M.F. Image quality assessment tools for optimization of CT images // Radiography. 2010. Vol. 16. P. 147-155. doi:10.1016/j.radi.2009.10.002
32. The Phantom Laboratory. Catphan Manual, 2015. 34 p.
33. Беркович Г.В., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Труфанов Г.Е. Сравнение различных подходов к оценке диагностического качества компьютерной томографии органов грудной клетки // Лучевая диагностика и терапия. 2020. Т. 11, №3. С. 44-55.
34. Беркович Г.В., Чипига Л.А., Водоватов А.В., и др. Оптимизация низкодозового протокола сканирования органов грудной клетки в диагностике очагов по типу «матового стекла» с применением алгоритмов итеративных реконструкций // Лучевая диагностика и терапия. 2019. Т. 4. С. 20-32. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32>
35. Чипига Л.А. Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 104-114.
36. Рыжов С.А. Радиационные аварии и ошибки в медицине. Термины и определения // Медицинская физика. 2019. №1. С. 73-90.
37. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series no. 25: Roles and Responsibilities, and Education and Training Requirements for Clinically Qualified Medical Physicists. IAEA: Vienna, 2015. 85 p.
38. Martin C.J., Vassileva J., Vano E., et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention // Journal of Radiological Protection. 2017. Vol. 37, No. 4. P. 883-906.
39. Международное Агентство по Атомной Энергии. Радиационная Защита и Безопасность Источников Излучения: Международные Основные Нормы Безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 250 с.
40. European Society of Radiology (ESR). How to manage accidental and unintended exposure in radiology: an ESR white paper/ESR // European Society of Radiology (ESR) Insights into Imaging. 2019. Vol. 10. 23 p.
41. Radiology Department Reporting and Investigation of over-exposures Standard Operating Procedure V2.0 Mar 2018. NHS. Northern Devon Healthcare.
42. Dobbins III J.T., Frush D.P., Kigongo Ch.J.N., et al. Medical Imaging Safety in Global Health Radiology // Radiology in Global Health. 2019. P. 85-105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98485-8_9
43. HSE Guidance note PM77 (Third edition). Equipment used in connection with medical exposure. Health and safety executive. UK, 2006. 18 p.
44. Denham G., Page N. Recommendations for radiographers and radiation therapists drawn from an analysis of errors on Australian Radiation Incident Registers // Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences. 2017. Vol. 64. P. 165-171. doi:10.1002/jmrs.206
45. ESR, EFRS. Patient Safety in Medical Imaging: a joint paper of the European Society of Radiology (ESR) and the European Federation of Radiographer Societies (EFRS) // European Society of Radiology (ESR) Insights into Imaging, 2019. <https://doi.org/10.1186/s13244-019-0721-y>

Поступила: 11.09.2020 г.

Дружинина Полина Сергеевна – младший 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, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: druzhinina-pauline@gmail.com

Чипига Лариса Александровна – 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; научный сотрудник, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

Рыжов Сергей Анатольевич – руководитель центра по радиационной безопасности и медицинской физике Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

Водоватов Александр Валерьевич – к.б.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией 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; доцент кафедры гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

Беркович Глеб Владимирович – заведующий кабинетом компьютерной томографии, Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

Смирнов Алексей Владимирович – инженер отдела дозиметрического контроля, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

Ярына Дмитрий Владимирович – Российская ассоциация предприятий по продаже и ремонту медицинской техники, Москва, Россия

Ермолина Елена Павловна – к.м.н., доцент кафедры радиационной гигиены имени академика Ф.Г. Кроткова, Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Россия

Дружинина Юлия Владимировна – преподаватель кафедры радиационной гигиены имени академика Ф.Г. Кроткова, Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования; эксперт отдела клинической дозиметрии и медицинской физики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

Для цитирования: Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Водоватов А.В., Беркович Г.В., Смирнов А.В., Ярына Д.В., Ермолина Е.П., Дружинина Ю.В. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 17-33. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33

Proposals for the Russian quality assurance program in computed tomography

Polina S. Druzhinina¹, Larisa A. Chipiga^{1,2}, Sergey A. Ryzhov³, Aleksandr V. Vodovатов^{1,7}, Gleb V. Berkovich⁴,
Alekssey V. Smirnov³, Dmitriy V. Yaryna⁵, Elena P. Ermolina⁶, Yuliya V. Druzhinina^{3,6}

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

² A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

³ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

⁴ V. Almazov National Medical Research Center, Saint-Petersburg, Russia

⁵ Russian Association of Enterprises of the Sale and Repair of Medical Equipment, Moscow, Russia

⁶ Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia

⁷ Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

To ensure the quality assurance of CT-examinations, it is necessary to obtain the high-quality diagnostic information and maintain the optimal exposure levels of patients and medical staff. This paper is focused on the requirements and main aspects of quality assurance of CT-examinations, which include quality control of

Polina S. Druzhinina

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

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

the equipment, methods of CT-image quality control, optimization of radiation protection, as well as management of the unintended and accidental medical exposure. The paper contains recommendations on quality control of diagnostic equipment, methods for monitoring the quality control of CT-images, values of diagnostic reference levels for the detection of abnormally high patient doses and optimization of the radiation protection of patients, as well as the recommendations for management of radiation and non-radiation accidents. All main sections of the paper represent an unified quality assurance system in computed tomography.

Key words: *computed tomography, quality assurance, quality control, diagnostic reference levels, unintended medical exposure, accidental medical exposure.*

References

1. Ehsan Samei Norbert J. Pelc et Editors. Computed Tomography: Approaches, Applications, and Operations. Springer, Switzerland; 2020. 469 p.
2. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series no. 19: Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications. IAEA: Vienna; 2012. 192 p.
3. European Commission. Radiation protection № 180 part, 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population/ European Commission/ – European Commission: Luxembourg; 2014. 181 p.
4. Hart D, Hillier MC, Shrimpton PC. Doses to Patients from Radiographic and Fluoroscopic X-ray Imaging Procedures in the UK – 2010 Review. HPA-CRCE-034. Health Protection Agency; 2012. 87 p.
5. Eurostat: your key to the European statistics. – Available from: <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [Accessed September 01, 2020].
6. OECD Indicators. Health at a Glance 2019: OECD Indicators, OECD Publishing, Paris; 2019. 243 p.
7. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Information Bulletin: Radiation exposure doses of the population of the Russian Federation in 2018. Saint-Petersburg; 2019. 72 p. (In Russian)
8. Chipiga L, Bernhardsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 240-244.
9. Brambilla M, Vassileva J, Kuchcinska A, Rehani M.M. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action. *European Radiology*. 2019; 9. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06528-7>
10. Vodovotov AV, Romanovich IK, Istorik OA, Eremina LA, Morozov SP, Ryzhov SA, et al. Preliminary assessment of structure and collective dose from CT-examinations related to covid-19 diagnostics in the Russian Federation in March -June 2020; 2020. 15 p. (In Russian)
11. American College of Radiology. Computed Tomography: Quality Control Manual – Copyright 2017, American College of Radiology; 86 p.
12. McCollough CH, et al. The phantom portion of the American College of Radiology (ACR) Computed Tomography (CT) accreditation program: Practical tips, artifact, examples, and pitfalls to avoid. *Medical Physics*. 2004;31(9): 2423-2442.
13. Marusina MYa, Kaznacheeva AO. Modern types of tomography. Tutorial. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO; 2006. 132 p. (In Russian)
14. Ministry of Health of Belorussia. Quality control protocol for X-ray CT; 2004. 34 p. (In Russian)
15. Research and Production Enterprise «DOZA». ACR CT is an accredited CT – phantom. Manual; 2011. 21 p. (In Russian)
16. European Commission. Criteria for Acceptability of Medical Radiological Equipment used in Diagnostic Radiology, Nuclear Medicine and Radiotherapy. Radiation protection № 162. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2012. 84 p.
17. American Association of Physicists in Medicine. Performance of Evaluation of Computed Tomography Systems. The report of AAPM N233; 2019. 71 p.
18. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series no. 4: Comprehensive Clinical Audits of Diagnostic Radiology Practices: A Tool for Quality Improvement. IAEA: Vienna; 2010. 209 p.
19. Toshiba Medical Systems Corporation. Toshiba X-ray CT-Scanner User's Manual for whole body tomography. Aquilion TSX-101A. Toshiba medical systems corporation; 2004. 255 p. (In Russian)
20. Siemens AG. SOMATOM Definition. Manual. Siemens AG; 2006.
21. GE Healthcare Japan Corporation. Manual. Revolution™ EVO. General Electric Company; 2015. 428 p.
22. Phillips Medical Systems. Manual Phillips. USA; 2014. 79 p.
23. Love A, Olsson M-L, Siemund R, Stalhammar F, Bjorkman-burtscher IM, Soderberg M. Six iterative reconstruction algorithms in brain CT: a phantom study on image quality at different radiation dose levels. *The British Journal of Radiology*. 2013;86(1031): 11 p.
24. International Commission on Radiation Units and Measurements. Spatial Resolution in CT. Report 87. *Journal of the ICRU*. 2012;12(1): 107-120.
25. Friedman SN, Fung GSK, Siewerdsen JH, Tsui BMW. A simple approach to measure computed tomography (CT) modulation transfer function (MTF) and noise-power spectrum (NPS) using the American College of Radiology (ACR) accreditation phantom. *Medical Physics Online*. 2013;40(5): 1-9.
26. Andersen HK, Völgyes D, Martinsen ACT. Image quality with iterative reconstruction techniques in CT of the lungs. A phantom study. *European Journal of Radiology Open*. 2018;5: 35-40.
27. Droege RT, Morin RL. A practical method to measure the MTF of CT scanners. *Medical Physics*. 1982;9(5): 758-760.
28. Chipiga LA, Vodovotov AV, Golikov VYu, Zvonova IA, Bernhardsson C. Potential for the establishment of national CT diagnostic reference levels in the Russian Federation. Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice. Vienna; 2017. IAEA, book of contributions: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session2.pdf>
29. Vodovotov AV. Practical implementation of the diagnostic reference levels concept for the common radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 47-55. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2017-10-1-47-55>
30. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide №SSG-46. Vienna: IAEA; 2018. 318 p.
31. Zarb F, Rainford L, McEntee MF. Image quality assessment tools for optimization of CT images. *Radiography*. 2010;16:147-155. doi:10.1016/j.radi.2009.10.002
32. The Phantom Laboratory. Catphan Manual; 2015. 34 p.

33. Berkovich GV, Chipiga LA, Vodovatov AV, Trufanov GE. Comparison of the different approaches to assessing the diagnostic quality of CT of the chest *Luchevaya diagnostika i terapiya = Radiation diagnostics and therapy*. 2020; 11(3): 44-55. (In Russian)
34. Berkovich GV, Chipiga LA, Vodovatov AV, Silin AY, Karatetsky AA, Trufanov GE. Optimization of low-dose chest CT protocols for the evaluation of the ground glass nodules using different iterative reconstruction algorithms. *Luchevaya diagnostika i terapiya = Radiation diagnostics and therapy*. 2019;4: 20-32. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32> (In Russian)
35. Chipiga LA. Evaluation of tube current modulation programmes for the optimization of scan protocols in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1):104-114. (In Russian)
36. Ryzhov SA. Radiation accidents and errors in medicine. Terms and definitions. *Meditsinskaya fizika = Medical physics*. 2019;1: 73-90. (In Russian)
37. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series no. 25: Roles and Responsibilities, and Education and Training Requirements for Clinically Qualified Medical Physicists. IAEA: Vienna; 2015. 85 p.
38. Martin CJ, Vassileva J, Vano E, Mahesh M, Ebdon-Jackson S, Ng KH, et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention. *Journal of Radiological Protection*. 2017;37: 883.
39. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards/International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards. IAEA, Vienna; 2015. GSR Part 3. 518 p. (In Russian)
40. European Society of Radiology (ESR). How to manage accidental and unintended exposure in radiology: an ESR white paper/ESR. European Society of Radiology (ESR) Insights into Imaging; 2019. Vol.10. 23 p.
41. Radiology Department Reporting and Investigation of over-exposures Standard Operating Procedure V2.0 Mar 2018. NHS. Northern Devon Healthcare; 10p.
42. Dobbins III JT, Frush DP, Kigongo ChJN, et al. Medical Imaging Safety in Global Health Radiology. *Radiology in Global Health*. 2019; 85-105. https://doi.org/10.1007/978-3-319-98485-8_9
43. HSE Guidance note PM77 (Third edition). Equipment used in connection with medical exposure. Health and safety executive. UK; 2006. 18 p.
44. Denham G, Page N. Recommendations for radiographers and radiation therapists drawn from an analysis of errors on Australian Radiation Incident Registers. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*. 2017;64: 165-171 doi: 10.1002/jmrs.206
45. ESR, EFRS. Patient Safety in Medical Imaging: a joint paper of the European Society of Radiology (ESR) and the European Federation of Radiographer Societies (EFRS). European Society of Radiology (ESR) Insights into Imaging; 2019. Vol. 10. 45 p. <https://doi.org/10.1186/s13244-019-0721-y>

Received: September 11, 2020

For correspondence: Polina S. Druzhinina – junior researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: druzhininapauline@gmail.com)

Larisa A. Chipiga – researcher, Medical protection laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; researcher, A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

Sergey A. Ryzhov – head of radiation protection and medical physics center, Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

Aleksandr V. Vodovatov – PhD, researcher, head 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, Saint-Petersburg, Russia

Gleb V. Berkovich – head of the Computed Tomography department, V. Almazov National Medical Research Center, Saint-Petersburg, Russia

Aleksey V. Smirnov – engineer of the Radiation Control Department, Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

Dmitriy V. Yaryna – Russian Association of Enterprises of the Sale and Repair of Medical Equipment, Moscow, Russia

Elena P. Ermolina – PhD, the Department of Radiation Hygiene, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, Moscow, Russia.

Yuliya V. Druzhinina – lecturer at the Department of Radiation Hygiene, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education; expert of the radiation protection and medical physics center, Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

For citation: Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Vodovatov A.V., Berkovich G.V., Smirnov A.V., Yaryna D.V., Ermolina E.P., Druzhinina YuV. Proposals for the Russian quality assurance program in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 17-33. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33

Становление и современное состояние нормативного регулирования природного облучения населения Российской Федерации (к 90-летию со дня рождения профессора Э.М. Крисюка) Часть 1

В.В. Омельчук^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

В апреле 2020 г. исполнилось 90 лет со дня рождения видного ученого, доктора технических наук, профессора Эдуарда Мечиславовича Крисюка. Под его научным руководством и при его непосредственном участии в радиационной гигиене сформировано новое направление работ по радиационно-гигиенической оценке природных источников ионизирующего излучения и обоснованы мероприятия по ограничению облучения населения. Э.М. Крисюк впервые в мировой практике в качестве основного автора сформулировал нормативные требования к содержанию природных радионуклидов в строительных материалах, в соавторстве — в фосфорных удобрениях, указал на необходимость их радиационного контроля. Его научные наработки вошли в целый ряд отечественных законодательных и нормативно-методических документов: Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» 1996 г., Нормы радиационной безопасности НРБ-96 и НРБ-99, Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99, Федеральную целевую программу «Радон», ряд методических указаний и рекомендаций. Сформированная им научная школа успешно работает и в настоящее время. Его ученики и последователи успешно развивают научно-методические основы нормативного регулирования природного облучения населения Российской Федерации на современном этапе.

Ключевые слова: природные радионуклиды, природные источники ионизирующего излучения, естественная радиоактивность, облучение населения, объемная активность, эффективная доза, эффективная удельная активность природных радионуклидов, радон.

Вклад Э.М. Крисюка в отечественное нормативно-правовое регулирование облучения населения природными источниками ионизирующего излучения

Э.М. Крисюк родился 2 апреля 1930 г. в г. Грозном, в 1947 г. с золотой медалью окончил среднюю школу, высшее образование получил в Ленинградском государственном университете на физическом факультете, который окончил в 1952 г. с отличием. Работая после окончания университета на кафедре физики Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта, в 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию с присуждением ученой степени кандидата физико-математических наук. Более 40 лет (с 1961 по 2003 г.) Эдуард Мечиславович проработал в Ленинградском научно-исследовательском институте радиационной гигиены (с 1994 г. – Санкт-Петербургский

научно-исследовательский институт радиационной гигиены, в настоящее время – ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, далее – Институт), последовательно занимая должности инженера-физика, старшего научного сотрудника, заведующего лабораторией, руководителя отдела, главного научного сотрудника. В 1983 г. Э.М. Крисюку была присвоена ученая степень доктора технических наук. Свидетельством признания результатов научного руководства Эдуардом Мечиславовичем комплексными исследованиями естественной радиоактивности внешней среды не только в Советском Союзе, но и за рубежом, является присвоение ему в 1987 г. почетного звания лауреата премии Совета министров СССР. Под его руководством разработан и создан высокочувствительный сцинтилляционный гамма-спектрометр СГС-200, отвечавший на то время требованиям лучших мировых образцов.

Омельчук Василий Владимирович

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

Изучение влияния повышенного радиационного фона на здоровье населения входило в перечень основных задач Института с первых лет его образования в 1956 г. В работе тогдашнего директора М.А. Невструевой [1] указано, что научные исследования повышенного радиационного фона начаты в Институте в 1959 г., в 1960 г. измерения гамма-фона в жилых помещениях проводилось прибором СГ-42, а содержание альфа- и бета-активных аэрозолей определялось аспирационным методом, описанным в Инструктивно-методических указаниях по работе санитарно-эпидемиологических станций в области радиационной гигиены [2]. В начале 1960-х гг. опубликованы первые работы, посвященные гигиенической оценке радиационного фона с повышенным содержанием естественных радиоактивных веществ [3, 4].

Информация о научных итогах в области дозиметрии природных источников за период с 1956 по 1970 г. представлена в работе [5]. За этот временной промежуток достигнуты значимые результаты по целому ряду научных направлений.

В приведенной выше работе [5] авторы указывают, что формирование нового в радиационной гигиене направления работ по ограничению облучения населения природными источниками ионизирующего излучения (ПИИИ) принадлежит Э.М. Крисиюку, возглавившему в 1970 г. лабораторию прижизненных измерений (в 1975 г. переименована в лабораторию дозиметрии внешней среды).

Под руководством Эдуарда Мечиславовича акцент научных исследований сместился на оценку естественной радиоактивности объектов окружающей среды, ее изменений, обусловленных хозяйственной деятельностью людей, закономерностей формирования доз облучения населения от ПИИИ с обоснованием мероприятий по их снижению [6–11].

Наиболее подробно научные результаты в области дозиметрии природных источников за период 1970–1986 гг. приведены в работе [12]. Авторы отмечают не только актуальные научные направления в указанный временной промежуток (обоснование нормативов по содержанию природных радионуклидов в строительном сырье и материалах, фосфорных удобрениях и мелиорантах, исследование поведения природных радионуклидов (ПРН) в технологиях передела минерального сырья на предприятиях неурановой отрасли, исследования природной радиоактивности окружающей среды), но и приводят полученные весьма значимые и важные результаты и достижения. К ним относят масштабные исследования показателей радиационной безопасности исходного минерального сырья и готовой продукции, научное обоснование и внедрение впервые в практику радиационной гигиены нормативов по содержанию природных радионуклидов в строительном сырье и материалах, а также фосфорных удобрений и мелиорантах, разработки аппаратного и методического оснащения экспериментальных исследований.

Фундаментальным вкладом Э.М. Крисиюка в нормирование содержания ПРН в материалах (строительном сырье и материалах, отделочных материалах, керамических и сантехнических изделиях, изделиях, используемых в быту, минеральном сырье и материалах, производственных отходах) стала предложенная им формула эффективной удельной активности ПРН ($A_{эфф}$) – интегральной характеристики внешнего гамма-излучения материальных сред,

содержащих ПРН, которая учитывает удельный вклад содержащихся в ней ПРН в мощность дозы гамма-излучения. В условиях радиоактивного равновесия в рядах ^{238}U и ^{232}Th значение $A_{эфф}$ рассчитывается по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K,$$

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

Значение $A_{эфф}$ и в настоящее время является основным нормируемым показателем содержания ПРН в санитарных правилах Российской Федерации и бывших республик СССР, в мировых научных кругах носит название «ленинградская формула».

Также впервые в мировой практике для оценки потенциальной радиационной безопасности минеральных удобрений, агрохимикатов и мелиорантов в отечественной нормативно-методической базе стала применяться удельная активность ПРН ($A_{уд} = A_{Ra} + 1,5 \times A_{Th}$) – интегральная величина, разработанная под руководством Э.М. Крисиюка и применяемая в российском санитарном законодательстве и ныне.

Помимо вышеуказанных гигиенических нормативных показателей, Эдуард Мечиславович принимал активное участие в научном обосновании и введении в практику гигиенического нормирования одного из важнейших нормативов по оценке облучения населения за счет радона и его изотопов – эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона, определяемой по формуле $A_{экр} = A_{экр, Rn} + 4,6 \times A_{экр, Th}$ – взвешенная сумма объемных активностей смеси дочерних продуктов радона (ДГР) и торона (ДПТ) в воздухе, которая создает такую же эффективную дозу внутреннего облучения, что и смесь ДГР и ДПТ, находящихся в радиоактивном равновесии с материнскими радионуклидами ^{222}Rn и ^{220}Rn . В приведенной выше формуле $A_{экр, Rn}$ и $A_{экр, Th}$ – значения среднегодовой эквивалентной равновесной объемной активности радона и торона в воздухе соответственно.

В 1975 г. по идее и под руководством Э.М. Крисиюка была разработана «Программа санитарно-гигиенических обследований радиоактивности внешней среды за счет источников естественного происхождения с оценкой доз внешнего и внутреннего облучения населения РСФСР» на период 1976–1980 гг. (утверждена ГСЭУ МЗ РСФСР 14.11.76 г.), предназначенная для систематизации исследований доз облучения населения от природных радионуклидов, связанных с хозяйственной деятельностью. Методическим руководством к работам региональных радиологических групп санитарно-эпидемиологических станций стали Дополнения к Программе № 1 (1978 г.) и № 2 (1980 г.), утвержденные МЗ РСФСР.

Параллельно с выполнением Программы, исследованиями радиоактивности строительных материалов и нормированием содержания в них природных радионуклидов в лаборатории изучались закономерности формирования доз, создаваемых короткоживущими дочерними продуктами распада радона в воздухе жилых помещений.

Следует отметить, что Э.М. Крисиюк стоял у истоков и является одним из авторов федеральной целевой программы «Радон», утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 06.07.94 г.

№ 809 «О федеральной целевой программе снижения уровня облучения населения России и производственного персонала от природных радиоактивных источников на 1994–1996 годы (ФЦП «Радон»», первой в нашей стране федеральной программы, направленной на решение «радоновой проблемы» [13].

В результате проведенных под научным руководством Э.М. Крисюка работ проведена оценка эффективных эквивалентных доз облучения населения за счет ПИИИ и их вклада в суммарную дозу облучения; впервые получены и обобщены результаты обширных исследований по оценке доз внешнего облучения жителей городов и населенных пунктов страны; показана роль радона в воздухе жилых, служебных помещений и подземных сооружений [14–18].

Многолетний опыт, обширные научные результаты, полученные специалистами лаборатории дозиметрии внешней среды во главе с Э.М. Крисюком, послужили основой для внесения требований по нормативному регулированию природного облучения населения СССР (после его распада 26.12.1991 г. – Российской Федерации) в ряд нормативно-правовых и информационно-методических документов (табл.).

Благодаря Э.М. Крисюку в отечественную нормативную практику впервые был введен ряд нормативных требований. Их перечень для коммунальной сферы приведен в указанных выше «Временных критериях ...» за 1991 г. и представлен в виде ограничений численного значения по $A_{эфф}$ в строительных материалах, ограничений мощности

Таблица

Нормативно-правовые и информационно-методические документы, содержащие требования по нормативному регулированию природного облучения населения

[Table

Legislative acts and guidelines, containing the requirements on the regulation of the natural exposure of the public

**Федеральные законы
[Federal laws]**

«О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 № 3-ФЗ;
[“On the radiation safety of the public”, FZ-3, 09.01.1996]

Гигиенические нормативы и санитарные правила
[Hygienic norms and sanitary rules]

ГН 2.6.1.054-96 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-96)»; СП 2.6.1.758-99 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99)»; СП 2.6.1.799-99 «Основные санитарные правила радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)»; СП 2.6.1.798-99 «Обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов»; СП 2.6.6.1168-02 «Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002)»; СанПиН 2.6.1.1281-03 «Санитарные правила по радиационной безопасности персонала и населения при транспортировании радиоактивных материалов (веществ)»; СанПиН 2.6.1.1169-02 «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов на объектах нефтегазового комплекса Российской Федерации»; СП 2.6.1.1291-03 «Санитарные правила по обеспечению радиационной безопасности на объектах нефтегазового комплекса России»; СП 2.6.1.1292-03 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения».

[GN 2.6.1.054-96 “Norms of the radiation safety (NRB-96)”. SP 2.6.1.758-99 “Norms of the radiation safety (NRB-99)”; SP 2.6.1.799-99 “Basic sanitary rules on the radiation safety (OSPORB-99)”; SP 2.6.1.798-99 “Handling of the raw mineral materials and materials with high concentration of natural radionuclides”; SP 2.6.6.1168-02 “Sanitary rules on the handling of the radioactive waste (SPORO-2002)”. SanPin 2.6.1.1281-03 “Sanitary rules on the radiation safety of workers and public for the transportation of the radioactive materials (substances)”; SanPin 2.6.6.1169-02 “Provision of the radiation safety for the handling of the waste with high concentration of the natural radionuclides on the facilities of oil and gas industry of the Russian Federation”; SP 2.6.1.1291-03 “Sanitary rules on the provision of the radiation safety on the facilities of the oil and gas industry in Russia”; SP 2.6.1.1292-03 “Hygienic requirements on the limitation of the public exposure from natural sources of ionizing exposure”]

**Методические указания
[Methodical guidelines]**

МУ 2.6.1.715-98 «Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий»; МУ 2.6.1.1088-02 «Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения».
[MU 2.6.1.715-98 “Radiation-hygienic survey of the residential and public buildings”; MU 2.6.1.1088-02 “Assessment of the individual effective doses from natural sources of ionizing exposure”]

**Методические рекомендации
[Methodical recommendations]**

«Радиационно-гигиеническая оценка строительных материалов» (1976 г.); «Контроль естественной радиоактивности объектов внешней среды» (1985 г.);
[“Radiation-hygienic assessment of the building materials” (1976); “Control of the natural radioactivity of the environmental objects” (1985)]

**Справочно-информационные материалы
[Information materials]**

«Ограничение облучения населения от природных источников ионизирующего излучения. Временные критерии для организации контроля и принятия решений (срок действия – до 01.01.94 г.) № 43-10/796 от 05.12.1990 г.»; «Естественная радиоактивность углей, зол и шлаков ТЭС» (1980 г.); «Естественная радиоактивность отечественных фосфорных удобрений» (1980 г.).
[“Limitation of the public exposure from natural sources of ionizing exposure. Temporal criteria for the control and decision-making” (up to 01.01.1994) № 43-10/796, 05.12.1990”; “Natural radioactivity of the coals, ashes and slags of the TES” (1980); “Natural radioactivity of the national phosphoric fertilizers” (1980)]

дозы γ -излучения в помещениях зданий и на участках застройки и ограничений ЭРОА изотопов радона в воздухе строящихся и существующих жилых домов.

В НРБ-99 и ОСПОРБ-99 были введены отдельные разделы с требованиями по ограничению облучения населения ПИИИ отдельно в производственных (ограничение по эффективной дозе) и коммунальных (требования по отдельным природным источникам) условиях.

Во введенных в действие в 1999 г. санитарных правилах по обеспечению радиационной безопасности при обращении с материалами с повышенным содержанием природных радионуклидов (СП 2.6.1.798-99) материалы, содержащие ПИИИ, выделены в отдельную группу, для них введена своя классификация по $A_{эфф}$ и установлены требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с ними.

В утвержденных в 2002 и 2003 гг. нормативных документах, регламентирующих обеспечение радиационной безопасности работников и населения при воздействии ПИИИ в нефтегазовой отрасли (СанПиН 2.6.6.1169-02 и СП 2.6.1.1291-03 соответственно) впервые введены классификация производственных отходов, содержащих природные радионуклиды (выделены 3 категории в зависимости от значений $A_{эфф}$ в кБк/кг и мощности дозы на поверхности в мкЗв/час), требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с отходами разных категорий и требования по реабилитации территорий при прекращении деятельности организаций нефтегазовой отрасли.

Окончательное разделение нормативно-правового регулирования облучения населения за счет ПИИИ отражено во введенных в действие в 2003 г. СП 2.6.1.1292-03 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения».

В соответствии с положениями Федерального закона «О радиационной безопасности населения» с 1996 г. в Российской Федерации создавалась и совершенствовалась система радиационно-гигиенической паспортизации и Единая государственная система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан РФ (ЕСКИД), одним из основателей которых в части облучения ПИИИ был Э.М. Крисюк.

В соответствии со Статьей 13 Федерального закона «О радиационной безопасности населения» результаты оценки радиационной безопасности населения ежегодно заносятся в радиационно-гигиенические паспорта (РГП) организаций, территорий и Российской Федерации в целом. Для реализации требований данной статьи Закона было принято специальное Постановление Правительства Российской Федерации № 93 от 28.01.1997 г. «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий». Во исполнение этого постановления были разработаны Методические указания «Порядок ведения радиационно-гигиенических паспортов организаций и территорий» МУ 239/66/288, которые были утверждены совместным приказом Минздрава РФ, Госатомнадзора РФ и Госкомэкологии РФ.

В 2001 г. Постановлением Госкомстата РФ от 3 марта 2001 г. № 18 «Об утверждении статистического инструментария для организации Минздравом России статистического наблюдения за индивидуальными дозами облучения граждан» была утверждена отчетная форма

федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона» подсистемы ЕСКИД, в рамках которой ежегодно в Федеральном банке доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ) собирается и накапливается информация о дозах природного облучения населения страны. Наряду с МУ 239/66/288 (методической основой учета доз природного облучения населения в рамках РГП), в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева были разработаны Методические указания «Оценка индивидуальных эффективных доз облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. МУ 2.6.1.1088—02».

29 апреля 2003 г., на 74-м году Э.М. Крисюк ушел из жизни. За 42 года работы в Институте Эдуард Мечиславович прошел славный научный путь, он является автором (соавтором) 176 печатных научных трудов (из которых 2 монографии, 16 публикаций в международных изданиях), в 1987 г. его научные заслуги достойно оценены на государственном уровне – ему присуждена премия Совета министров СССР. Одним из важных достижений Э.М. Крисюка за все годы работы в Институте является его научная школа. Под его руководством защищено 6 кандидатских диссертаций, его ученики и последователи работают во всех субъектах Российской Федерации.

Литература

1. Невструева М.А. Основные задачи радиационной гигиены // Труды по радиационной гигиене: под ред. чл.-корр. АМН СССР профессора Н.Ф. Галанина. Л., 1964. В.2. С. 9-14.
2. Шафир А.И., Бондарева Е.Н., Вайнштейн П.Р. и др. Естественный радиационный фон обитаемых помещений (в гигиеническом аспекте) // Труды по радиационной гигиене: под ред. чл.-корр. АМН СССР профессора Н.Ф. Галанина. Л., 1964. В.2. С. 61-63.
3. Галанин Н.Ф., Гуськова В.Н., Запольская Н.А., и др. Гигиеническая оценка радиационного фона с повышенным содержанием естественных радиоактивных веществ // Труды по радиационной гигиене: под ред. чл.-корр. АМН СССР профессора Н.Ф. Галанина. Л., 1964. В.2. С. 14-20.
4. Шамов В.П. Физические принципы оценки дозы радиационного воздействия в местах с повышенным естественным фоном // Труды по радиационной гигиене: под ред. чл.-корр. АМН СССР профессора Н.Ф. Галанина. Л., 1964. В. 2. С. 20-28.
5. Лисаченко Э.П., Стамат И.П. История становления лаборатории дозиметрии природных источников в Институте радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева: 1956–1970 годы // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 62-73.
6. Крисюк Э.М. Соотношение «польза-вред» при использовании строительных материалов с повышенной концентрацией естественных радионуклидов // Радиационная гигиена: Сб. научн. тр. ЛНИИРГ, 1982. С. 30-34.
7. Крисюк Э.М., Пархоменко В.И. Радиационно-гигиеническая оценка строительных материалов // Радиационная гигиена: Сб. научн. трудов по радиационной гигиене: под ред. проф. П.В. Рамзаева. Л., 1975. В.5. С. 75-81.
8. Дричко В.Ф., Крисюк Э.М., Лисаченко Э.П., и др. Пути формирования доз облучения современного человека в связи с его хозяйственной деятельностью // Радиационная гигиена: Сб. научн. трудов по радиационной гигиене: под ред. проф. П.В. Рамзаева. Л., 1975. В.5. С. 63-74.

9. Крисюк Э.М., Карпов В.И., Королева Н.А., и др. Радиационный фон жилищ // Радиационная гигиена: Сб. научн. тр. ЛНИИРГ, 1981. С. 47-50.
10. Дричко В.Ф., Крисюк Э.М., Лисаченко Э.П., и др. Естественная радиоактивность внешней среды и хозяйственная деятельность человека // Радиационная гигиена: Сб. научн. тр. ЛНИИРГ, 1981. С. 66-70.
11. Шамов В.П., Дричко В.Ф., Э.М. Крисюк, и др. К нормированию концентраций естественных радионуклидов в фосфорных удобрениях // Задачи гигиенической науки и практики в повышении эффективности и качества государственного надзора по контролю за использованием ядерной энергии в мирных целях (материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции по радиационной гигиене). Л., 1978. С. 41-44.
12. Лисаченко Э.П., Стамат И.П., Королева Н.А. История становления лаборатории дозиметрии природных источников в Институте радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева: 1970-1986 гг. // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 1. С. 45-57.
13. Маренный А.М., Киселев С.М. Национальные радоновые программы: опыт реализации и задачи на перспективу // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, №2 (спецвыпуск). С. 97-108.
14. Крисюк Э.М. Дозы от природных источников ионизирующего излучения и возможности их ограничения // Радиационная гигиена: Сб. научн. тр. ЛНИИРГ, 1987. С. 149-153.
15. Крисюк Э.М. Оптимизация облучения населения при использовании в жилищном строительстве материалов, содержащих природные радионуклиды // Радиационная гигиена: Сб. научн. тр. ЛНИИРГ, 1988. С. 28-32.
16. Крисюк Э.М., Шалак Н.И. О радоновыделении ограждений жилищ // Гигиена и санитария. 1977. № 3. С. 111.
17. Шалак Н.И., Крисюк Э.М. Определение удельного радоновыделения ограждений в помещениях // Гигиена и санитария. 1970. № 2. С. 72-74.
18. Крисюк Э.М. Радиационный фон помещений. М.: Энергоатомиздат, 1989. 118 с.

Поступила: 01.10.2020 г.

Омельчук Василий Владимирович – доктор медицинских наук, доцент, ученый секретарь Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: vasilii.omelchuk@yandex.ru

Для цитирования: Омельчук В.В. Становление и современное состояние нормативного регулирования природного облучения населения Российской Федерации (к 90-летию со дня рождения профессора Э.М. Крисюка). Часть 1 // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 34-39. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-34-39

Development and current state of the regulation of the natural exposure of the public of the Russian Federation (To commemorate the 90th birthday of Professor Kriasyk E.M.). Part 1

Vasiliy V. Omelchuk ^{1,2}

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

² North-Western State Medical University after I.I. Mechnikov of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

In April 2020 we commemorate the 90th birthday of the major scientist, doctor of technical sciences, Professor Eduard Mechislavovich Kriasyk. A new field of research on radiation-hygienic assessment of the natural sources of ionizing exposure and limitation of the public exposure has been developed under his scientific supervision and personal participation. For the first time in the international practice E.M. Kriasyk as the main author developed the requirements for the concentration of the natural radionuclides in the building materials; as the co-author – in phosphoric fertilizers, indicated the necessity of their radiation control. His scientific results were included into various Russian legislative and methodical documents: Federal state law "On the radiation safety of the public" in 1996, Norms of the radiation safety NRB-96 and NRB-99, Basic

Vasiliy V. Omelchuk

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev; North-western State Medical University named after I.I. Mechnikov

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vasilii.omelchuk@yandex.ru

sanitary rules on the provision of the radiation safety OSPORB-99, Federal targeted program "Radon", various guidelines. His scientific school, his flock and followers are successfully developing the scientific-methodical basics of the regulation of the natural exposure of the public of the Russian Federation at the current stage.

Key words: *natural radionuclides, natural sources of ionizing exposure, natural radioactivity, public exposure, volume activity, effective dose, effective activity concentration of the natural radionuclides, radon.*

References

1. Nevstrueva MA. Basic objectives of the radiation hygiene. Annals on the radiation hygiene. Ed. By corresponding member of AMS USSR prof. N.F. Galanin. Leningrad; 1964. Issue 2. P. 9-14 (In Russian)
2. Shafir AI, Bondareva EN, Vaynshteyn PR, Konstantinov YuO, Liberman AN, Panshinskaya NM, et al. Natural radiation background of the residential buildings (in the hygienic aspect) Annals on the radiation hygiene, ed. By corresponding member of AMS USSR prof. N.F. Galanin. Leningrad; 1964. Issue 2. P. 61-63 (In Russian)
3. Galanin NF, Guskova VN, Zapolskaya NA, Nevstrueva MA, Serebryannikov VD, Shafir AI, et al. Hygienic assessment of the radiation background with the increased concentration of natural radionuclides Annals on the radiation hygiene, ed. By corresponding member of AMS USSR prof. N.F. Galanin. Leningrad; 1964. Issue 2. P. 14-20 (In Russian)
4. Shamov VP. Physical principles of the assessment of the radiation dose in the places with increased natural background Annals on the radiation hygiene, ed. By corresponding member of AMS USSR prof. N.F. Galanin. Leningrad; 1964. Issue 2. P. 20-28 (In Russian)
5. Lisachenko EP, Stamat IP. The history of the natural sources dosimetry laboratory in St-Petersburg research institute of radiation hygiene after professor P.V. Ramzaev: 1. 1956–1970. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4):62-73 (In Russian)
6. Krisyuk EM. Risk-benefit ratio for the use of building materials with increased concentration of natural radionuclides. Radiation hygiene. Edited volume by LNIIRG; 1982. P. 30-34 (In Russian)
7. Krisyuk EM, Parkhomenko VI. Radiation-hygienic assessment of the building materials. Radiation hygiene. Edited volume on radiation hygiene: ed. By prof. P.V. Ramzaev. Leningrad; 1975. Issue 5. P. 75-81 (In Russian)
8. Drichko VF, Krisyuk EM, Lisachenko EP, Ponikarova TM, Popov DK, Shamov VP. Paths of forming of doses to modern human due to activities. Radiation hygiene. Edited volume on radiation hygiene: ed. By prof. P.V. Ramzaev. Leningrad; 1975. Issue 5. P. 63-74 (In Russian)
9. Krisyuk EM, Karpov VI, Koroleva NA, Parkhomenko VI, Shalak NI. Radiation background of the residential places. Radiation hygiene. Edited volume by LNIIRG; 1981. P. 47-50 (In Russian)
10. Drichko VF, Krisyuk EM, Lisachenko EP, Ponikarova TM, Obukhova OL, Khudovets GS. Natural radioactivity of the environment and antropogenic activities of the human. Radiation hygiene. Edited volume by LNIIRG; 1981. P. 66-70 (In Russian)
11. Shamov VP, Drichko VF, Krisyuk EM, Ponikarova TM, Popov DK, Grashchenko SM. To the norming of concentrations of the natural radionuclides in the phosphoric fertilizers. Objectives for the hygienic science and practice in the increase of effectiveness and quality of the state surveillance on the use of nuclear energy in peaceful applications (materials of VIII all-Russian scientific-practical conference on radiation hygiene). Leningrad; 1978. P. 41-44 (In Russian)
12. Lisachenko EP, Stamat IP, Koroleva NA. Development history of natural sources dosimetry laboratory at the Research institute of radiation hygiene after professor P.V. Ramzaev: 1970–1986. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(1): 45-57 (In Russian)
13. Marennyy AM, Kiselev SM. The national radon program: Implementation experience and challenges for the future. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2(special issue)): 97-108 (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-97-108>
14. Krisyuk EM. Doses from natural sources of ionizing exposure and possibilities of their limitation. Radiation hygiene. Edited volume by LNIIRG; 1987. P. 149-153 (In Russian)
15. Krisyuk EM. Optimization of the public exposure for the use of building materials with natural radionuclides. Radiation hygiene. Edited volume by LNIIRG; 1988. P. 28-32 (In Russian)
16. Krisyuk EM, Shalak NI. On the radon exhalation by the surroundings of the buildings. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitary*. 1977;3: 111 (In Russian)
17. Shalak NI, Krisyuk EM. Estimation of the volume radon exhalation by the surroundings of the buildings. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitary*. 1970;2: 72-74 (In Russian)
18. Krisyuk EM. Radiation background of the premises. Moscow: Energoatomizdat; 1989. 118 p. (In Russian)

Received: October 01, 2020

For correspondence: Vasiliy V. Omelchuk – Doctor of Medical Sciences, Docent, Scientific Secretary, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; North-Western State Medical University after I.I. Mechnikov of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation. (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vasiliy.omelchuk@yandex.ru)

For citation: Omelchuk V.V. Development and current state of the regulation of the natural exposure of the public of the Russian Federation (To commemorate the 90th birthday of Professor Krisiyuk E.M.) Part 1. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 1. P. 34-39. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-34-39

Анализ исследований, представленных в статьях по ликвидации медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС в мире (1986–2018 гг.)

В.И. Евдокимов

Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Санкт-Петербург, Россия

Отсутствие доступной информации о востребованности отечественных статей в сфере ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в ранний послеаварийный период обуславливает необходимость обратиться к публикациям, представленным в международных базах данных, которые могут стать хорошим подспорьем при планировании научных исследований и подготовке публикаций. Цель — анализ статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС в мире и России, проиндексированных в базе данных Scopus в 1986–2018 гг. Поиск запрос позволил создать в Scopus массив из 3929 статей. Наибольшее количество статей опубликовали авторы из США — 13,2%, Украины — 12,6% и России — 12,2%. Значительное количество статей были изданы международными авторскими коллективами. Среднегодовое количество статей в общем массиве было 119 ± 6 , в российской выборке — 15 ± 2 . В общем массиве 11,5% статей содержали исследования медико-биологических проблем ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС, 12,5% — населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, 18,7% — новообразований, 8,6% — медицинской радиационной физики, 21,2% — радиэкологии, 12,0% — биохимии, генетики и молекулярной биологии, в российской выборке таких статей было 19,8%, 17,3%, 18,1%, 21,7%, 18,8%, 10,2% соответственно. В среднем на 1 статью приходилось по 10,5 цитирований, были процитированы хотя бы 1 раз 70% статей, самоцитирования составили 17,6%, индекс Хирша — 81. Выявлена достаточно высокая востребованность статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС у мирового научного сообщества. У российских ученых следует формировать привычку чаще цитировать статьи коллег. Отмечается низкая издательская культура в некоторых отечественных журналах. Отсутствие транслитерации списка литературы не только является препятствием для индексации статей в Scopus, но и лишает цитирований ученых, аффилированных с ними научных организаций и в целом Россию.

Ключевые слова: авария, катастрофа, Чернобыльская АЭС, радиобиология, радиоактивное загрязнение территории, ликвидатор аварии, новообразования, статья, наукометрический показатель, науковедение, Scopus.

Введение

Грубое нарушение эксплуатации работы Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) привело 26 апреля 1986 г. к пожару с выбросом ядерного топлива из 4-го блока станции. Радиоактивно загрязненными оказались территории Украины, Беларуси и России общей площадью 21 тыс. км². На ликвидацию последствий аварии был сформирован многотысячный отряд спасателей, а население г. Припяти и близлежащих населенных пунктов эвакуировано.

Наиболее полно российские журнальные статьи представляются и индексируются в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), но только с 2005 г. В 1986–1994 гг. в сфере аварии на ЧАЭС в РИНЦ проин-

дексированы только 15 статей, соотнесенных с рубрикой 76.00.00 «Медицина и здравоохранение» Российского рубрикатора научной и научно-технической информации.

Уместно указать, что библиографии публикаций в сфере ликвидации последствий аварии на ЧАЭС посвящено несколько изданий [1–5]. Однако отсутствие доступной информации о востребованности отечественных статей в ближайший послеаварийный период обуславливает необходимость обратиться к публикациям в международных реферативно-библиографических базах данных, которые могут стать хорошим подспорьем при планировании научных исследований и подготовке публикаций.

Евдокимов Владимир Иванович

Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова

Адрес для переписки: 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Акад. Лебедева, д. 4/2; E-mail: 9334616@mail.ru

Реферативно-библиографическая база данных Scopus была сформирована в начале 2000-х гг. В настоящее время в Scopus индексируются 23 700 периодических изданий, в том числе 4000 журналов в открытом доступе. Данные из Scopus признаны Минобрнауки России в качестве критериев общероссийской системы оценки эффективности деятельности научных организаций и вузов. Перечень российских журналов в Scopus представлен на сайте [http://elsevierscience.ru/products/scopus]. Считается, что Scopus содержит почти в 1,8 раза больше информации о науках о жизни, медицине и здравоохранении, нежели Web of Science Core Collection [6, 7].

Русскоязычные журналы, входящие в MedLine, автоматически стали индексироваться в Scopus. В международных библиографических базах данных не был предусмотрен кириллический шрифт, и, несмотря на замечания сотрудников Scopus, издатели многих русскоязычных журналов не спешили проводить транслитерацию списка литературы, в результате чего приставный список литературы на кириллическом шрифте не получал цитирования. Русскоязычным источникам цитирования присваивалось словосочетание «Russian source», а документы на латинице представлялись библиографической записью и цитировались. Отсутствие транслитерированных цитатных баз данных и англоязычной аффилиации авторов и учреждений явились причиной исключения многих отечественных журналов из Scopus, а работы ученых, на которых были ссылки в статьях на русском языке, по вине издателей журналов не имели цитирований. Этот факт в определенной мере создает невысокие цитирования публикаций России в рейтинге стран [8].

В последнее десятилетие в России большое внимание придается общественной экспертизе научных исследований и оценке значимости научных публикаций. Используются уже апробированные и разрабатываются новые наукометрические индексы. Совет по этике научных публикаций Ассоциации научных редакторов и издателей России принял открытое обращение ко всем исследователям, кто разрабатывает и внедряет количественные индикаторы публикационной активности [9].

Цель исследования – анализ содержания журнальных статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий аварии на ЧАЭС в мире и России, проиндексированных в базе данных Scopus в 1986–2018 гг.

Материалы и методы

Поисковый режим в базе данных Scopus включал:

- поисковое слово: Chernobyl. В тезаурусе Медицинских предметных рубрик (Medical Subject Headings, MESH) словосочетание Chernobyl Nuclear Accident, зарегистрировано в древовидной структуре рубриками K01.400.504.968.150 и N06.850.135.848.500;
- временной период: с 1986 по 2018 г.;
- где искать: в названии статьи, кратком описании (реферате), ключевых словах;
- тип изданий: экспериментальные статьи и обзоры.

Поисковый режим 20.01.2020 г. позволил найти 9084 отклика на статьи в сфере ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС. В опции «Отрасль знания» соотносили поисковый режим с медициной, и окончательный массив составил 3929 статей. Опция «Анализировать резуль-

таты поиска» наглядно представляла публикационную активность по странам, авторам, журналам и организациям в виде схем.

Задав поисковые слова: Liquidators (ликвидаторы), Neoplasms (новообразования), Cohort Studies (когортные эпидемиологические исследования), в найденном массиве статей выявили отклики на публикации, которые содержали их в названии, ключевых словах или реферате. К сожалению, у нас не было возможности просмотреть все статьи и исключить так называемый поисковый шум или случайно найденные публикации. В автоматизированном режиме в Scopus есть возможность выделить массивы статей в сфере физики (Physics, в нашем исследовании – медицинской радиационной физики), экологии (Environmental Science), биохимии, генетики и молекулярной биологии (Biochemistry, Genetics and Molecular Biology). Активация заглавия найденной статьи в Scopus позволяла открыть реферат и изучить его.

Наиболее распространенным наукометрическим показателем является подсчет цитирований (библиографических ссылок) – упоминаний статьи «А» в списке литературы или в постраничной библиографической ссылке статьи «Б». Если в тексте одной статьи другая публикация упоминается несколько раз, это считается одним цитированием. Метод оценки публикации путем подсчета ее цитирований основан на предположении, что на высококачественные и влиятельные работы чаще будут ссылаться. Один факт, что такая-то работа часто цитируется, ничего не говорит о том, как именно она используется. Случаются «договорные», перекрестные цитирования (они легко выявляются при анализе массива публикаций), повышение цитирований может иметь бессмысленная статья, которая у исследователей получала ссылки как раскритикованная. Подробные сведения об анализе цитирований содержится в публикации [9].

Коэффициент самоцитируемости – это доля во всех полученных цитированиях (за определенный промежуток времени) ссылок автора (журнала) на самого себя. Научным сообществом допускается не более 20–25% самоцитирований.

Чтобы сравнить востребованность более ранних и современных статей в массиве публикаций, на годовое количество статей рассчитали среднее число цитирований, приходящееся на каждую статью в последующие 2 года после публикации. Например, если в 1991–1992 гг. были получены 70 цитирований на 99 статей, изданных в 1990 г., то в среднем число цитирований каждой статьи было 0,77.

Индекс Хирша учитывает количество публикаций и их востребованность научным сообществом. Например, если индекс равен 9, значит, в исследуемом массиве есть 9 статей, которые были процитированы 9 раз и более, а остальные статьи содержали 8 цитирований и менее. Использование индекса Хирша при массивах с небольшим количеством публикаций и за короткое время публикационной активности нежелательно.

Методом описательной статистики определяли средние арифметические показатели и ошибки средней величины ($M \pm m$). Динамику статей исследовали с помощью анализа динамических рядов и расчета полиномиального тренда второго порядка [10]. Коэффициент детерминации (R^2) определял связь исследуемых данных с построенной кривой (трендом). Чем больше был коэффициент

детерминации (максимально 1,0), тем более объективно был построен ряд, показывающий тенденции развития исследуемых явлений. Согласованность динамики общего массива статей в Scopus и отечественных выборок провели при помощи коэффициента корреляции Пирсона.

Результаты и обсуждение

Из 3929 статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий на ЧАЭС, проиндексированных в Scopus с 1996 по 2018 г., открытый доступ имели 9,8%, прочий – 90,2%. Были опубликованы на английском языке 57,9% статей, на русском – 30,2%, на украинском – 5,5%, на немецком – 2,7%, на французском – 2,3%, на ином – 1,4%. Обзоры составили 9,1% публикаций, экспериментальные статьи – 90,9%.

Ежегодно в мире индексировались в Scopus по 119 ± 6 статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий аварии на ЧАЭС. При очень низком коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,21$) полиномиальный тренд общего количества статей напоминал инвертированную U-кривую с тенденцией уменьшения данных в последний период наблюдения (рис. 1а). Отмечалось увеличение публикационной активности авторов в печальные даты: 10-летие со дня аварии (1996 г.), 15-летие (2001 г.) и т.д.

Статей, аффилированных с авторами из России, оказалось 480, или 12,2% от общего массива. Среднегодовое количество российских статей было (15 ± 2) . Полиномиальный тренд динамики российских статей при очень низком коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,18$) напоминал также инвертированную U-кривую. Отмечается тенденция увеличения статей в 1996–1998 гг., в последние годы наблюдения – уменьшения (см. рис. 1б). Согласованность трендов общего массива и российской выборки – умеренная, положительная и статистически значимая ($r = 0,69$; $p < 0,001$), что указывает на влияние однонаправленных факторов на развитие публикационной активности.

Расчеты показали, что в среднем на 1 статью приходилось по 10,5 цитирований, были процитированы хотя бы 1 раз 70% статей, самоцитирования составили 17,6%, индекс Хирша – 81. С этими наукометрическими индексами сравнили показатели статей по ведущим авторам, в странах, журналах, организациях и по направлениям научных исследований.

Оказалось, что современные статьи были больше востребованы, чем изданные в 1990-е гг. Полиномиальный тренд при значимом коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,66$) в общем массиве публикаций показывал увеличение среднего количества цитирований статей (см. рис. 1а), в российской выборке при низком коэффициенте детерминации ($R^2 = 0,37$) и высокой вариабельности показателей он напоминал инвертированную U-кривую (см. рис. 1б). Например, на каждую статью, представленную в мировом массиве 1990–1994 гг., в последующие 2 года было получено в среднем 0,64 цитирования, в 2014–2018 гг. – в 4,5 раза больше (2,88 цитирования), в российском массиве – в 1,9 раза больше (0,86 и 1,65 цитирований соответственно).

В таблице 1 представлены наукометрические показатели статей, аффилированных с 10 странами. Наибольшее количество статей опубликовали авторы из США (13,2%), Украины (12,6%) и России (12,2%). Отмечались высокие наукометрические индексы. Оказалось, что российские и польские статьи имели самое низкое цитирование, но их индексы были больше, чем в общем массиве статей. По данным Scimago Journal & Country Rank, в 1996–2018 гг. на каждую российскую публикацию в Scopus приходилось 7,3 цитирования [<https://www.scimagojr.com/countryrank>], т.е. отечественные статьи, опубликованные в 1986–2018 гг. в сфере ликвидации последствий на ЧАЭС, имели более высокий уровень востребованности, чем все публикации, аффилированные с Россией.

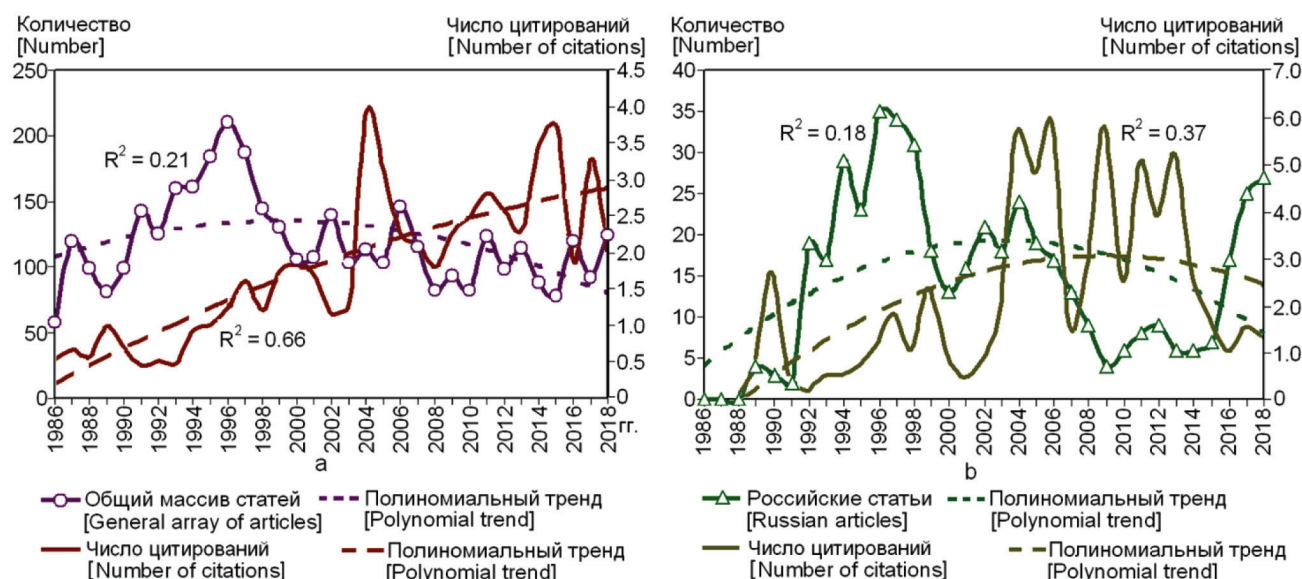


Рис. 1. Динамика статей в Scopus и цитирование статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий на ЧАЭС в мире (а) и России (б)

[Fig. 1. Dynamics of Scopus-indexed articles and citation of articles in the field of elimination (mitigation) of biomedical consequences at Chernobyl NPP in the world (a) and Russia (b)]

Научометрические показатели массива статей, аффилированных с ведущими странами (1986–2018 гг.)

Таблица 1

[Table 1]

Scientometric indicators of an array of articles affiliated with leading countries (1986–2018)]

Страна [Country]	Число статей [Number of articles]	Среднее число цитирований 1 статьи [Average number of citations of one article]	Процент процитированных статей [Percentage of cited articles]	Процент самоцитирова- ний [Percentage of self-citations]	Индекс Хирша [Hirsch index]
США [USA]	518 (13,2)	27,13	91,7	17,7	61
Украина [Ukraine]	494 (12,6)	14,43	79,1	26,0	44
Россия [Russia]	480 (12,2)	11,76	73,3	24,7	38
Германия [Germany]	275 (7,0)	23,61	82,2	18,9	39
Япония [Japan]	225 (5,7)	19,49	89,8	22,4	34
Беларусь [Belarus]	214 (5,4)	28,37	81,8	19,6	42
Великобритания [United Kingdom]	199 (5,1)	26,13	89,9	18,5	36
Франция [France]	172 (4,4)	23,12	84,3	16,5	29
Италия [Italy]	118 (3,1)	30,95	88,1	15,9	29
Польша [Poland]	82 (2,1)	12,52	91,5	20,1	19
Общий массив [General array]	3929 (100,0)	10,49	70,0	17,6	81

Трагедия на Чернобыльской АЭС стала актуальной для многих народов мира. Выявлено большое количество международных публикаций: например, авторы из США опубликовали в соавторстве с авторами из Украины 10,8% статей, из России – 10,8%, из Беларуси – 10,4%, из Германии – 6,2%, из Великобритании – 5,6%, авторы из Украины с соавторами из США, Великобритании, Японии, России и Германии – 22,5%, 8,5%, 8,3%, 7,3% и 6,3% соответственно, авторы из России с соавторами

из США, Беларуси, Украины, Японии и Великобритании – 11,7%, 8,3%, 7,5%, 6,9% и 5,8% соответственно, авторы Беларуси с соавторами из США, Германии, России, Японии и Украины – 25,2%, 20,6%, 18,7%, 15,4% и 12,6% соответственно.

Обобщенные показатели направлений научных исследований, представленные в статьях по медико-биологическим последствиям аварии на ЧАЭС, представлены на рисунке 2. Уместно указать, что в большинстве

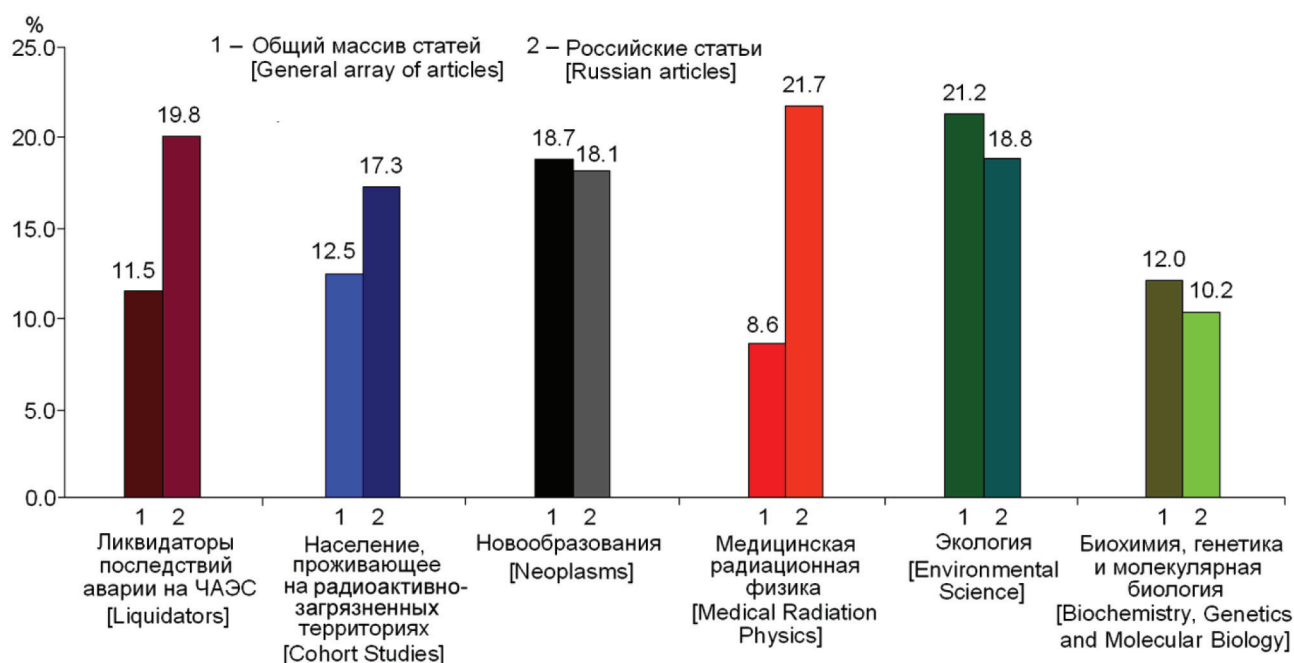


Рис. 2. Соотношение статей общей выборки и российских публикаций с изученными отраслями знания в Scopus
[Fig. 2. Articles in the general sample and Russian publications by branches of knowledge in Scopus]

статей были изучены результаты исследований по нескольким научным направлениям. Статистически значимых различий между структурными показателями в массивах статей Scopus и России не найдено.

В таблице 2 представлены наукометрические показатели статей в проанализированных отраслях знания. В общих массивах статей по отраслям знания (за исключением обследований ликвидаторов) демонстрировались достаточно высокие наукометрические индексы. В ряде случаев среднее число цитирований, приходящихся на 1 статью, в российской подборке были больше, чем в общем массиве. К сожалению, статьи в российских выборках по отраслям знания имели высо-

кие уровни самоцитирований. Уместно заметить, что в отечественной выборке статьи в Scopus стали индексироваться в основном после 1992 г.

При ничтожных коэффициентах детерминации полиномиальные тренды статей, в которых исследовались вопросы ядерной физики, изучения динамики эффективных доз облучения ликвидаторов и населения, величин и структур доз облучения в зависимости от этапа ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, модификации действующих методик, реконструкции доз внутреннего облучения, радиационно-гигиенического мониторинга, показывают тенденции незначительного увеличения данных (рис. 3а).

Таблица 2

Наукометрические показатели массива статей по отраслям знания (1986–2018 гг.)

[Table 2]

Scientometric indicators of an array of articles by branches of knowledge (1986–2018)]

Отрасль знания [Branches of knowledge]	Число статей [Number of articles]		Среднее число цитирований 1 статьи [Average number of citations of one article]		Процент процитированных статей [Percentage of cited articles]		Процент самоцитирований [Percentage of self-citations]		Индекс Хирша [Hirsch index]	
	1*	2*	1	2	1	2	1	2	1	2
Ликвидаторы последствий аварии на ЧАЭС [Liquidators]	355	95	9,70	13,02	65,1	73,7	16,1	21,5	29	17
Население, проживающее на радиоактивно загрязненных территориях [Cohort Studies]	410	83	23,89	23,96	87,6	86,7	14,9	25,1	52	27
Новообразования [Neoplasms]	648	87	21,56	27,86	82,7	81,6	15,0	25,3	59	26
Медицинская радиационная физика [Medical Radiation Physics]	232	104	17,07	13,37	90,9	77,9	19,3	32,6	32	20
Экология [Environmental Science]	743	90	11,53	19,53	86,9	93,3	15,9	46,5	39	26
Биохимия, генетика и молекулярная биология [Biochemistry, Genetics and Molecular Biology]	424	49	30,32	37,71	88,9	89,8	17,5	24,1	59	23

1* – статьи общего массива без России [Articles of the general array without Russia];

2* – российские статьи [Russian articles].

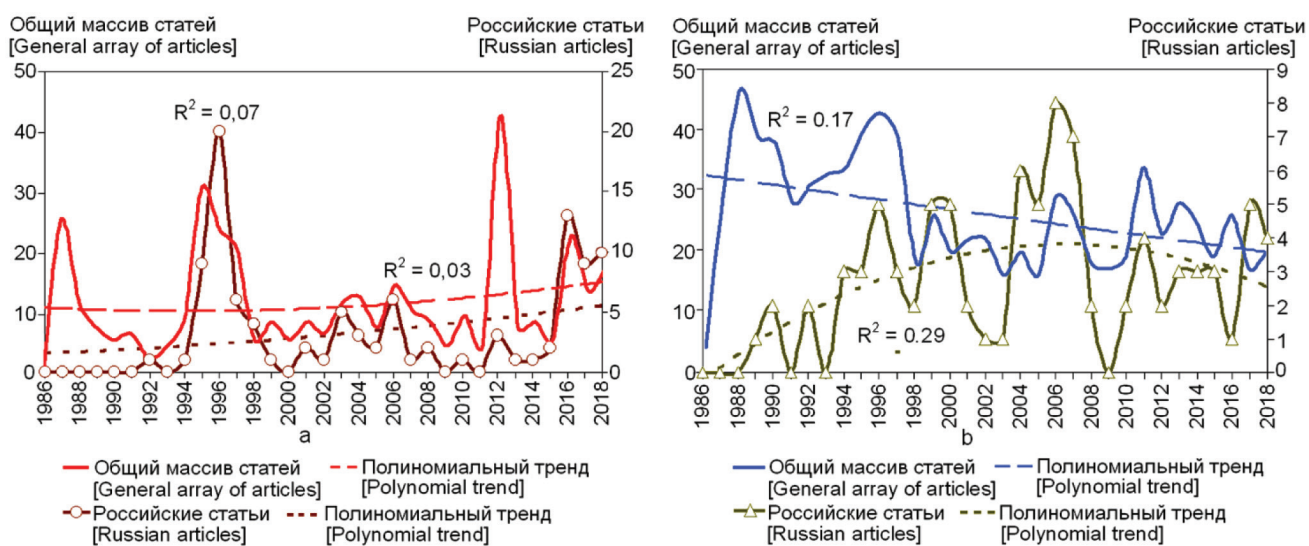


Рис. 3. Динамика статей в Scopus по проблемам ядерной физики (а) и экологии в сфере аварии на ЧАЭС (б)

[Fig. 3. Dynamics of Scopus-indexed articles on Medical Radiation Physics (a) and environmental issues associated with the Chernobyl nuclear power plant accident (b)]

Полиномиальный тренд статей, в которых исследовались проблемы экологии и радиоэкологии, эффективности защитных мероприятий в сфере сельского хозяйства на радиоактивно загрязненных территориях, оценки снижения активности радионуклидов в почве и водоемах, экологического состояния биоценозов в зоне отчуждения, комплексного экосистемного анализа техногенных изменений состава среды регионов и пр., в общем массиве показывает уменьшение данных, в российской выборке – напоминает инвертированную U-кривую с максимальными показателями в 2004–2007 гг. и увеличением статей в последний период наблюдения (рис. 3b).

Полиномиальные тренды статей, в которых изучались вопросы биохимии, генетики и молекулярной биоло-

гии, при разных по значимости коэффициентах детерминации в общем массиве и российской выборке напоминали инвертированные U-кривые с уменьшением показателей в последний период наблюдения (рис. 4a), а полиномиальные тренды статей по радиационно-обусловленным новообразованиям показывали увеличение данных (рис. 4b).

Полиномиальные тренды статей, в которых исследовались проблемы ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС и населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, при разных по значимости коэффициентах детерминации показывали увеличение публикационной активности (рис. 5).

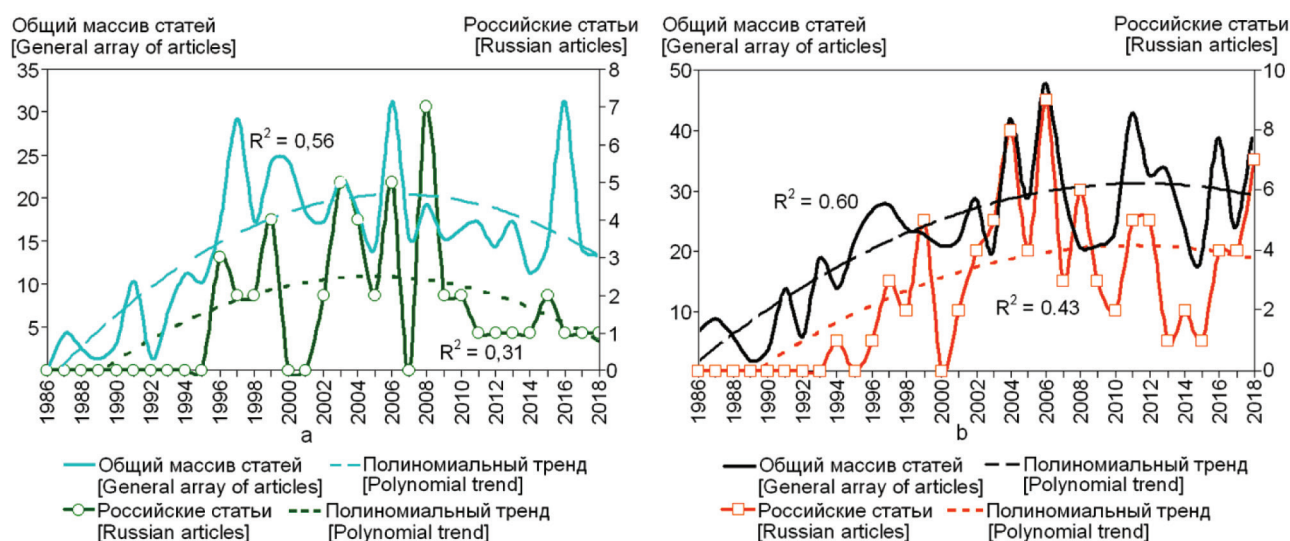


Рис. 4. Динамика статей в Scopus по биохимии, генетике и молекулярной биологии (а) и радиационно-обусловленным новообразованиям, возникшим в результате аварии на ЧАЭС (б)

[Fig. 4. The dynamics of Scopus-indexed articles on Biochemistry, Genetics and Molecular Biology (a), and on the radiation induced neoplasms resulting from the Chernobyl accident (b)]

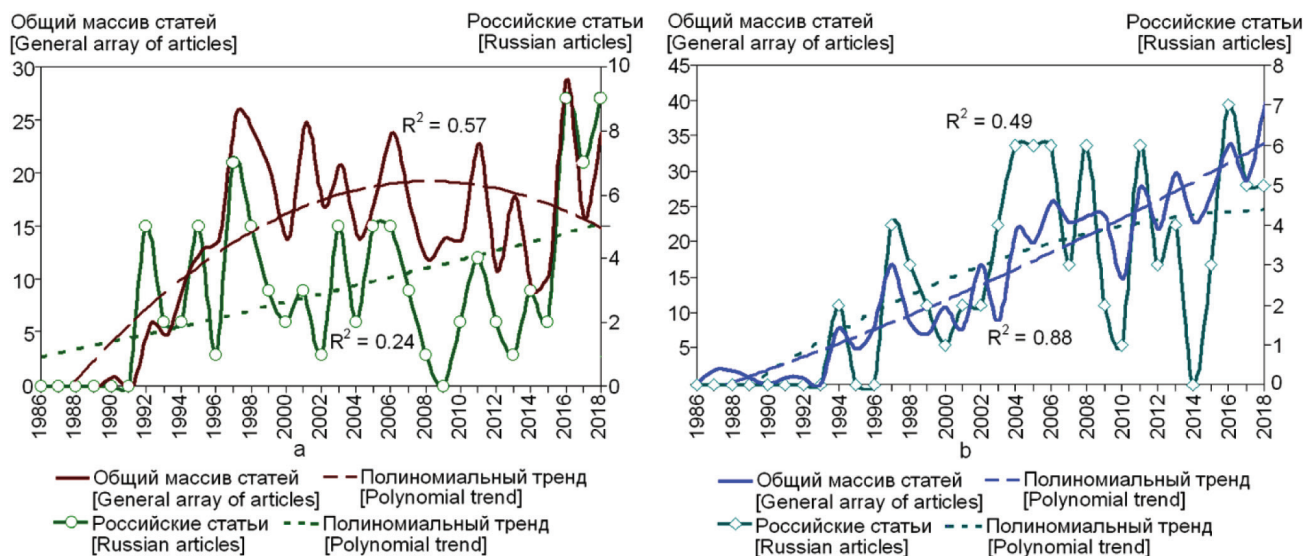


Рис. 5. Динамика статей в Scopus по медико-биологическим проблемам ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС (а) и по когортному анализу населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях (б)

[Fig. 5. The dynamics of Scopus-indexed articles on biomedical problems of the liquidators of the consequences of the Chernobyl accident (a) and on cohort analysis of the population living in radioactively-contaminated territories (b)]

Следует указать на достаточно выраженную вариативность количества статей в представленных ранее трендах. Согласованность кривых – умеренная (сильная) и статистически значимая ($r=0,55-0,79$; $p<0,001$), что указывает на влияние в их развитии однонаправленных факторов. Исключение составила динамика статей по экологии общего массива и российской выборки ($r=-0,01$ $p>0,05$).

У некоторых авторов и журналов из Украины и России выявлены низкие наукометрические показатели в статьях при высоких уровнях самоцитирований. Однако неоднородность самоцитирований может представлять такой факт: один автор таким образом продвигает собственные исследования, а другой – ссылается на статьи коллег, работающих в соседнем отделе организации. Также часто бывает, что на собственную работу просто необходимо сослаться: например, при совершенствовании метода, использовании опубликованных экспериментальных данных для построения модели или при написании обзора.

У ряда авторов и журналов (особенно при переименовании) в базе данных Scopus создано несколько профилей, что рассредоточивает и снижает их наукометрические показатели. Эти профили следует объединить, авторам необходимо указывать о себе и аффилированных организациях принятые однотипные англоязычные сведения.

Заключение

Поисковый запрос позволил создать в Scopus массив из 3929 статей, соотнесенных с рубрикой «Медицина» и опубликованных в 1986–2018 гг. Отмечается тенденция уменьшения публикационной активности авторов. Среднегодовое количество статей в сфере ликвидации медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС в общем массиве было 119 ± 6 , в российской выборке – 15 ± 2 . Трагедия на Чернобыльской АЭС стала актуальной для многих народов мира. Значительное количество статей издано с международным участием соавторов. Наибольшее количество статей опубликовали авторы из США – 518 (13,2%), Украины – 494 (12,6%) и России – 480 (13,2%).

В общем массиве 11,5% статей содержали исследования медико-биологических проблем у ликвидаторов аварии на ЧАЭС, в 12,5% – населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях, в 18,7% – новообразований, в 8,6% – медицинской радиационной физики, в 21,2% – радиэкологии, в 12,0% – биохимии, генетики и молекулярной биологии, в российской выборке – в 19,8%, 17,3%, 18,1%, 21,7%, 18,8%, 10,2% соответственно.

В среднем на 1 статью приходилось по 10,5 цитирований, были процитированы хотя бы 1 раз 70% статей, самоцитирования составили 17,6%, индекс Хирша – 81. Авторам, журналам и организациям (особенно при переименовании), имеющим несколько профилей в Scopus, следует их объединить и впредь в статьях указывать принятые сведения, что будет способствовать объективности и, возможно, повышению наукометрических показателей. Отмечается низкая издатель-

ская культура в некоторых отечественных журналах. Отсутствие транслитерации списка литературы не только является препятствием для индексации статей в Scopus, но и лишает цитирований ученых и аффилированных с ними научных организаций. Этот факт в определенной мере создает невысокие цитирования публикаций России в рейтинге стран [8].

Литература

1. Евдокимов В.И., Ермоленко Т.В. Ликвидация последствий аварии на Чернобыльской АЭС: библиогр. указ. кн. изд. (1987–2010 гг.) / Всерос. центр экстрен. и радиац. медицины им. А.М. Никифорова МЧС России. СПб.: Политехника-сервис, 2011. вып. 3. Радиация. Радиоактивность. Чернобыль. 158 с.
2. Евдокимов В.И., Попов В.И., Романович И.К. Анализ научных исследований по медико-биологическим аспектам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (по материалам диссертационных работ, 1990–2015 гг.) // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2016. № 3. С. 158–161.
3. Касинская А.И., Пятроўская З.А. Чернобыль [Электронный ресурс] = Чернобыль = Чернобыль: інфармацыйна-бібліяграфічнае выданне, 1991–2003/Нац. б-ка Беларусі; навук. рэдактар А.В. Прадзвіна. Мінск, 2006. 267 Мбайт, 1 CD-ROM. (20 год Чернобылю).
4. Макеева Е.Н. Дроماشко С.Е., Каган Л.М., и др. Чернобыль: междисциплинар. указ. лит. по проблеме Чернобыля. Минск. 1991. Вып. 1. 190 с.; 1995. Вып. 3. 203 с.; 1996. Вып. 4. 273 с.
5. Чумарина З.М. Психоневрологические аспекты аварии на Чернобыльской АЭС: указ. лит., 1989–1996 гг. / науч. ред. С.А. Игумнов; Респ. науч. мед. б-ка Минздрава Респ. Беларусь. Минск: Респ. науч. мед. б-ка, 1996. 73 с.
6. Falagas M.E., Pitsouni E.I., Malietzis G.A., Pappas G. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses // The FASEB J. 2007. Vol. 22, N 2. P. 338–342.
7. Meester W. Scopus content coverage & Increase visibility of Russian Research // Подготовка научных журналов к продвижению в международное информационное пространство: рекомендации Scopus: 2-й междунар. науч.-практ. семинар. М., 2018. URL: <https://conf.neicon.ru/materials/39-Sem0418/230418-02-Meester.pdf> (дата обращения: 15.04.2020).
8. Кириллова О.В. О влиянии языка статей на показатели научных журналов в международных наукометрических базах данных // Научный редактор и издатель. 2019. Т. 4, № 1-2. С. 21–33. DOI 10.24069/2542-0267-2019-1-2-21-33.
9. Стерлигов И.А. Библиометрия во благо российской науки. Открытое обращение ко всем, кто разрабатывает и внедряет количественные индикаторы публикационной активности. Научное издание международного уровня – 2018: мировая практика подготовки и продвижения публикаций: 7-я междунар. науч.-практ. конф. М., 2018. URL: <https://conf.neicon.ru/index.php/science/domestic0418/schedConf/program> (дата обращения: 15.04.2020).
10. Бредихин С.В., Кузнецов А.Ю., Щербакова Н.Г. Анализ цитирования в библиометрии / Ин-т вычислит. математики и математ. геофизики; НЭИКОН. Новосибирск: М., 2013. 344 с.
11. Афанасьев В.Н., Юзбашев М.М. Анализ временных рядов и прогнозирование. М.: Финансы и статистика, 2001. 228 с.

Поступила: 20.05.2020 г.

Евдокимов Владимир Иванович – доктор медицинских наук, профессор, кафедра безопасности жизнедеятельности, радиационной и экстремальной медицины, Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова МЧС России. **Адрес для переписки:** 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 4/2; E-mail: 9334616@mail.ru

Для цитирования: Евдокимов В.И. Анализ исследований, представленных в статьях по ликвидации медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской АЭС в мире (1986–2018 гг.) // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 40–48. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-40-48

Analysis of studies presented in articles on mitigation of biomedical consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant worldwide (1986–2018)

Vladimir I. Evdokimov

Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

A lack of accessible information about the demand for domestic articles on the mitigation of consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant in the early post-accident period necessitates referring to publications presented in international bibliographic databases, which can be a good help in planning research and preparing publications. The intention is an analysis of articles in the field of eliminating the biomedical consequences of the Chernobyl accident in the world and in Russia, indexed in the Scopus database in 1986–2018. A search query gave an array of 3929 articles in Scopus. The largest number of articles was published by authors from the USA (13.2%), Ukraine (12.6%) and Russia (12.2%). A significant number of articles were published by international authors. The average annual number of articles was (119 ± 6) in the whole array and (15 ± 2) in the Russian array. In the whole array, 11.5% of the articles dealt with the biomedical problems of the liquidators of the consequences of the Chernobyl accident; 12.5% – the population living in the radioactively-contaminated territories; 18.7% – neoplasms; 8.6% – medical radiation physics; 21.2% – radioecology; 12.0% – biochemistry, genetics and molecular biology. In the Russian array, these respective percentages were 19.8, 17.3, 18.1, 21.7, 18.8% and 10.2%. On average, there were 10.5 citations per article, 70% of the articles were at least once cited, self-citations made up to 17.6%, and the Hirsch index was 81. A quite high demand for articles in the field of eliminating the biomedical consequences of the Chernobyl accident has been revealed among the world scientific community. Russian scientists should form a habit of quoting articles from their colleagues more often. Some domestic magazines still have a low publishing culture. A lack of transliterated lists of references not only precludes from indexing articles in Scopus, but also interferes with citing research papers from domestic scientists, their affiliated research institutions, and Russia as a whole.

Key words: accident, disaster, Chernobyl nuclear power plant, radiobiology, radioactive contaminated area, clean-up worker, neoplasms, article, scientometric indicator, science of science, Scopus.

References

1. Evdokimov VI, Ermolenko TV. Elimination of the consequences of the Chernobyl accident: a bibliographic index of book publications (1987–2010). St. Petersburg; 2011. 158 p. (In Russian).
2. Evdokimov VI, Popov VI, Romanovich IK. Medico-biological aspects of Chernobyl atomic station accident management (following dissertations of 1990–2015). *Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii = Bulletin of Russian Military medical Academy*. 2016; 3: 158–161. (In Russian).
3. Kasinskaya AI, Pjatrowskaya ZA. Chernobyl [electronic resource]: information and bibliographic resource, 1991–2003. Ed. A.V. Pradzeina. Minsk; 2006. 1 CD-ROM. (In Belarusian)
4. Makeeva EN, Dromashko SE, Kagan LM, et al. Chernobyl: an interdisciplinary Index of Literature on the Chernobyl Problem. Minsk, 1991. Iss. 1. 190 p.; 1995. Iss. 3. 203 p.; 1996. Iss. 4. 273 p. (In Russian).
5. Chumarina ZM. Neuropsychiatric aspects of the Chernobyl accident: literature index, 1989–1996. Ed. S.A. Igumnov. Minsk; 1996. 73 p. (In Russian).
6. Falagas ME, Pitsouni EI, Malietzis GA, Pappas G. Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: Strengths and weaknesses. *The FASEB J*. 2007; 22 (2): 338–342.
7. Meester W. Scopus content coverage & Increase visibility of Russian Research. Preparation of scientific journals for promotion to the international Information space: Scopus rec-

Vladimir I. Evdokimov

Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine

Address for correspondence: Akademika Lebedeva str., 4/2, Saint-Petersburg, 194044, Russia; E-mail: 9334616@mail.ru

- ommendations : 2nd International Scientific and Practical Workshop. Moscow, 2018. Available on: <https://conf.neicon.ru/> [Accesed: 15/04/2020]
8. Kirillova OV. Publication language and the journal scientometric indicators in global citation databases. *Nauchnyi redaktor i izdatel = Science Editor and Publisher*. 2019;4(1-2): 21–33. DOI: 10.24069/2542-0267-2019-1-2-21-33. (In Russian).
9. Sterligov AI. Bibliometry for the benefit of Russian science. An open appeal to all those who develop and implement quantitative indicators of publication activity. World-class Scientific publication – 2018: Best practices in preparation and promotion of publicatio: 7th International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2018. Available on: <https://conf.neicon.ru/> [Accesed: 15/04/2020] (In Russian).
10. Bredikhin SV, Kuznetsov AYu, Scherbakova NG. Citation analysis in bibliometrics. Novosibirsk: Moscow; 2013. 344 p. (In Russian).
11. Afanasyev VN, Yuzbashev MM. Time Series Analysis and Forecasting. Moscow; 2001. 228 p. (In Russian).

Received: May 20, 2020

For correspondence: Vladimir I. Evdokimov – Doctor of medical sciences, professor, Department of Life Safety, Radiation and Extreme Medicine, Nikiforov Russian Center of Emergency and Radiation Medicine, EMERCOM of Russia (Academika Lebedeva Str. 4/2, St.-Petersburg, 194044, Russia; E-mail: 9334616@mail.ru)

For citation: Evdokimov V.I. Scientometric analysis of studies presented in articles on mitigation of biomedical consequences of the accident at the Chernobyl nuclear power plant worldwide (1986–2018). *Radiatsionnaya Gygiena=Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 1. P.40-48. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-40-48

Радиогенный риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у лиц, облучённых на Южном Урале в детском возрасте

Л.Ю. Крестинина, С.А. Шалагинов, С.С. Силкин, С.Б. Епифанова, А.В. Аклеев

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

Целью работы является оценка радиогенного риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у членов Уральской когорты, облучённых в детском возрасте. Данная когорта объединяет лиц, облучённых в возрасте до 20 лет в результате двух радиационных аварий на Производственном Объединении «Маяк» на Южном Урале (сбросы радиоактивных отходов в реку Течу и образование Восточно-Уральского радиоактивного следа). Численность когорты для анализа заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями составила 31 578 человек. Все члены подверглись постнатальному облучению, а некоторые — и внутриутробному. У части из них родители были облучены до зачатия. С 1956 по 2018 г. на территории наблюдения за заболеваемостью было зарегистрировано 2018 случаев заболеваний солидными злокачественными новообразованиями, число человеко-лет составило 818 083. Анализ проведен методом Пуассоновской регрессии с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска. Доверительные интервалы с 95% достоверностью оценены с помощью метода максимального правдоподобия. В первом анализе риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у членов данной когорты использована только постнатальная доза, при этом учтен факт преконцептивного облучения родителей. Средняя постнатальная доза на желудок, накопленная за весь период наблюдения у членов когорты, включенных в анализ заболеваемости, рассчитанная по дозиметрической системе TRDS-2016, составила 0,047 Гр. Анализ показал линейную зависимость избыточного относительного риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями от постнатальной дозы. При 5-летнем латентном периоде избыточный относительный риск составил 0,66/Гр, $p=0,006$. При оценке избыточного относительного риска в разных возрастных группах на начало облучения значимая величина риска сохранилась только в возрастной группе до 1 года на начало облучения, равная 2,16/Гр, $p<0,02$. Данные результаты согласуются с результатами анализа риска солидных злокачественных новообразований в когорте внутриутробно облученных на реке Тече, в которой был выявлен статистически значимый избыточный относительный риск от постнатальной дозы, а также с результатами анализа риска в японской когорте облученных внутриутробно и в раннем детстве.

Ключевые слова: Уральская когорта облученных в детстве, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, радиогенный риск, заболеваемость солидными злокачественными новообразованиями, избыточный относительный риск.

Введение

Проблема оценки риска развития злокачественных новообразований (ЗНО) у лиц, облучённых в различные периоды онтогенеза, не нашла однозначного решения. Особое значение при этом может иметь облучение в детском возрасте ввиду повышенной радиочувствительности детского организма. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН) отмечает особую важность изучения отдаленных эффектов облучения детей [1]. Опубликованные к настоящему времени значения пожизненного риска рака у лиц, облученных в детском возрасте, ограничены определенным достигнутым возрастом и требуют дальнейше-

го наблюдения (японская когорта, чернобыльские исследования, медицинское облучение и др.) [2–8].

Ранее проведенный анализ последствий постнатального облучения на реке Тече у лиц, часть которых была облучена внутриутробно или родители которых облучались до зачатия, показал, что риск смерти от солидных ЗНО и лейкозов во всей когорте имел положительные значения, не достигая уровня значимости. При этом было показано, что в группе, объединяющей внутриутробно облученных лиц и облученных в возрасте до 6 лет, величина риска существенно выше, чем у облученных в более старшем возрасте [7, 8].

Значительное число исследований состояния здоровья облучённых детей было проведено после аварии на

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

Чернобыльской АЭС [1, 5, 6]. Однако в этих работах использовались различные, иногда несопоставимые методологические подходы, как правило, отсутствовала необходимая дозиметрическая поддержка, исследования проводились без учёта особенностей, присущих детям различного возраста. В конечном счёте были получены противоречивые результаты, которые в настоящее время не могут быть однозначно интерпретированы с позиций современной классической радиобиологии.

Первые исследования заболеваемости солидными ЗНО в когорте внутриутробно облученных на реке Тече (КРТ-ВУО) [9] показали достоверное увеличение коэффициентов заболеваемости (КЗ) солидными ЗНО при постнатальной дозе >10 мГр и отсутствие увеличения КЗ в зависимости от внутриутробной дозы. В последующем при анализе избыточного относительного риска (ИОР) заболеваемости солидными ЗНО в КРТ-ВУО были получены подтверждающие результаты [10]: ИОР от постнатального облучения был статистически значим, но не получено доказательства влияния внутриутробной дозы на риск заболеваемости солидными ЗНО. При объединении членов КРТ ВУО с внутриутробно облученными потомками работников ПО «Маяк» была создана Уральская когорта пренатально облученных численностью 16 821 человек [11], в которой также не выявлено положительного риска заболеваемости солидными ЗНО в зависимости от внутриутробной дозы, но получена значимая величина относительного риска (ОР), зависящая от постнатальной дозы, $ОР = 1,02/10 \text{ мГр}$ (95% ДИ: 1,0-1,04).

Вновь сформированная исследуемая когорта объединяет лиц, облученных в возрасте до 20 лет в прибрежных селах на реке Тече, а также на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) с постнатальным или комбинированным облучением, имеет длительный (63 года) период наблюдения и увеличенную численность когорты относительно более ранних исследований, а максимальный возраст членов когорты достигает 90 лет. Таким образом, настоящее исследование может восполнить некоторые пробелы, связанные с изучением влияния хронического облучения с малой мощностью дозы на развитие ЗНО при облучении в детском возрасте.

Материалы и методы

Уральская когорта лиц, облученных в детском возрасте (УКОД), была сформирована в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) в 2019 г. [12]. Она включает лиц, постнатально облученных на территории Челябинской или Курганской области в результате двух радиационных ситуаций на Южном Урале (сброс радиоактивных отходов в реку Теча в 1950-е гг. и образование ВУРСа в 1957 г. при тепловом взрыве хранилища с радиоактивными отходами) в период с 1.1.1950 г. по 31.12.1960 г. в возрасте до 20 лет.

Критериями включения в когорту являлись: 1) облучение в возрасте до 20 лет; 2) проживание на территории 41 населенного пункта Челябинской или Курганской области на реке Теча в период с 1.1.1950 г. по 31.12.1960 г. и (или) 34 населенных пунктов ВУРСа в период с 29.9.1957 г. по 31.12.1960 г.

В 2020 г. в результате продолжающейся работы по активному уточнению неполной или противоречивой ранее

информации о датах и местах проживания и датах рождения отдельных лиц с соответствующими критериями из базы данных УНПЦ РМ облученного населения, численность УКОД, относительно зафиксированной в 2019 г., была дополнена и составила 32 936 человек. В дальнейшем для отдельных членов когорты информация может уточняться, но мы не ожидаем больших изменений численности когорты.

Аналитическая когорта для анализа заболеваемости ЗНО

Формирование когорты для анализа заболеваемости ЗНО имеет дополнительные ограничения, связанные с доступом к данным о заболеваемости ЗНО как по территории, так и по времени, за столь длительный период наблюдения. Сбор информации о заболеваемости ЗНО в Челябинской области официально был начат в Челябинском областном клиническом онкологическом диспансере с 1.01.1956 г. В связи с этим часть людей, которые выбыли из наблюдения до 1.01.1956 г., была исключена из когорты для анализа заболеваемости ЗНО. Исключены были умершие (620 чел.), заболевшие ЗНО (8 чел.) или выбывшие с территории наблюдения до 1.01.1956 г. (730 чел.). Таким образом, Уральская когорта лиц, облученных в возрасте до 20 лет, для анализа заболеваемости ЗНО (аналитическая УКОД) составила 31 578 человек.

Территория наблюдения за заболеваемостью злокачественными новообразованиями (ТНЗ) была также ограничена возможностью систематического доступа к данным по заболеваемости ЗНО и включала 5 районов Челябинской области (Аргашский, Сосновский, Каслинский, Кунашакский и Красноармейский), по территории которых протекала река Теча и которые включали территорию ВУРСа, на которой осело радиоактивное облако в 1957 г., а также города Челябинск и Озерск, в которые мигрировало большое число облученных людей в течение более чем 60-летнего периода наблюдения. В связи с этим 6480 членов УКОД, начавших облучение в населенных пунктах на реке Тече в Курганской области и не проживавших на ТНЗ в течение всего периода наблюдения, не включались в анализ заболеваемости (в отличие от анализа смертности, когда в территорию наблюдения включаются вся Челябинская и Курганская области).

Демографические характеристики аналитической УКОД и случаи солидных ЗНО, зарегистрированные на территории наблюдения за заболеваемостью, включенные в анализ, представлены в таблице 1.

Доля мужчин и женщин в когорте примерно одинаковая (около 50%), группа татар и башкир составляет одну треть когорты, а две трети составляет славянское, преимущественно русское население (представители других этнических групп составляют менее 1%). По числу солидных ЗНО, представленных в таблице 1, можно оценить как их количественную характеристику, так и относительный вес ЗНО среди отдельных групп когорты.

Можно видеть, что доля солидных ЗНО у мужчин 52,4% превышает долю мужчин в когорте 49,8%, и доля ЗНО в группе татар и башкир 42,4% также превышает их соответствующую долю в численности когорты – 32,4%. По возрасту на начало облучения группа до 5 лет составляет половину членов когорты – 51,1%. В Курганской области на начало облучения проживало 22% членов когорты, и только небольшая часть из них переезжала на ТНЗ в

течение 63-летнего периода наблюдения, поэтому только 3% (66 случаев) от всех солидных ЗНО было зарегистрировано среди этой группы.

Максимальная доля солидных ЗНО наблюдается у лиц, облучившихся в возрасте до 1 года, и в группе подростков с 10 до 14 лет (более 23%), что соответствует периодам наиболее активного роста организма и возможного влияния дозы на частоту солидных ЗНО.

Если сравнивать долю солидных ЗНО в дозовых группах и долю лиц в этих группах, можно видеть, что, начиная с группы, превышающей 50 мГр, и заканчивая группой «500 мГр и больше», доля лиц с солидными ЗНО почти в 2 раза превышает долю членов когорты в этих группах (13,5% относи-

тельно 7,7% в группе от 50 до 100 мГр; 13,0% относительно 7% в группе от 100 до 200 мГр и т.д.). Данные признаки могут косвенно указывать на связь солидных ЗНО с воздействием дозы.

Доза

Ежегодные индивидуальные дозы для членов УКОД были рассчитаны сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ по усовершенствованной дозиметрической системе TRDS-2016 [13]. Для анализа заболеваемости солидными ЗНО в качестве аналога дозы на мягкие ткани использована доза на стенки желудка, накопленная за весь период наблюдения. Доза включает компонен-

Таблица 1

Демографические характеристики аналитической УКОД и случаи ЗНО за 1956–2018 гг.

[Table 1]

Demographic characteristics of the analytical UChEC members and cancer incidence cases for 1956–2018]

Характеристики [Characteristics]	Человек [Persons]		Солидные ЗНО* на ТНЗ [Solid cancer on the catchment area]	
	n	%	n	%
Вся когорта 0–19 лет [Whole cohort 0–19 years old]	31 578	100,0	2018	100,0
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]	15 725	49,8	1058	52,4
Женщины [Female]	15 853	50,2	960	47,6
Этнический состав [Ethnicity]				
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	10 225	32,4	856	42,4
Русские [Russians]	21 353	67,6	1162	57,6
Область начала облучения [Exposure start area]				
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	24 539	78	1952	97
Курганская область [Kurgan Oblast]	7039	22	66	3
Факт облучения родителей [The fact of parental exposure]				
Родители не облучены [Not exposed parents]	18 721	59	1454	72
Родители облучены [Exposed parents]	11 643	37	509	25
Неизвестно [Unknown]	1214	4	55	3
Возраст на начало облучения, лет [Age at exposure beginning, years]				
До 1 года [Up to 1 year]	10 678	33,8	476	23,6
1–4	54 53	17,3	322	16,0
5–9	5090	16,1	309	15,3
10–14	5444	17,2	471	23,3
15–19	4913	15,6	440	21,8
Дозовые группы, Гр (Средняя кумулятивная доза на желудок) [Dose groups, Gy (Average cumulative stomach dose)]				
0 –< 0,010	16 252	51,5	713	35,3
0,010 – < 0,050	9427	29,9	613	30,4
0,050 – < 0,100	2425	7,7	273	13,5
0,100 – < 0,200	2215	7,0	262	13,0
0,200 – < 0,300	496	1,6	55	2,7
0,300 – < 0,500	487	1,5	64	3,2
0,500 >	276	0,9	38	1,9

* – из анализа исключены ЗНО кожи, не меланома (рубрика 173, МКБ-9) [skin cancer, not melanoma, excluded from the analysis (ICD-9 code 173)].

ты внутреннего и внешнего облучения, обусловленные у большинства членов когорты преимущественно долгоживущими радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Средняя доза облучения для всех членов когорты, накопленная за весь период наблюдения, составила 38 мГр, а для участвующих в анализе заболеваемости после исключения лиц, облученных и проживавших в Курганской области, – 47 мГр, максимальная – 1,13 Гр. По данным таблицы 1 можно видеть, что примерно половина членов когорты (51,5%) получила суммарную дозу облучения на стенки желудка до 10 мГр, около 30% в диапазоне от 10 до 50 мГр. Всего облучение в разряде низких доз (до 100 мГр) получили 89% членов когорты. Дозу в диапазоне от 100 до 500 мГр получило 10% членов когорты, а выше 500 мГр – около 1%.

Жизненный статус

Жизненный статус членов аналитической УКОД по состоянию на конец 2018 г. представлен в таблице 2. Можно видеть, что среди 17 882 членов когорты, проживавших на ТНЗ, 43% живы к концу 2018 г., 44% умерли на ТНЗ и 13% потеряны на ТНЗ (это значит, что адрес их проживания известен на дату ранее 31.12.2018 г.). К концу 2018 г. за пределами ТНЗ находилось 13 696 членов когорты. Из них 7216 (23% от всей когорты) мигрировали с наблюдаемой территории, а 6480 из 7039 человек, проживавших в Курганской области на начало наблюдения, не были зарегистрированы на ТНЗ с 1956 по 2018 г. Только 559 человек из 7039 резидентов Курганской области включались в анализ во время их проживания на ТНЗ. Необходимо отметить, что в анализ включаются все ЗНО, зарегистрированные на ТНЗ, и все человеко-годы проживания членов когорты на ТНЗ с 1.1.1956 г. до даты диагноза ЗНО или даты выбытия с ТНЗ или даты смерти или до 31.12.2018 г. (даты конца наблюдения). В связи с указанным лица, ко-

торые к концу 2018 г. вошли в группу потерянных или в группу мигрантов, также участвуют в анализе, но только до даты их выбытия с ТНЗ. Вышесказанное демонстрируют случаи ЗНО, попадающие в строки к мигрантам (16) или к потерянным из наблюдения (10). Это указывает на факт, что случаи ЗНО были зарегистрированы на территории наблюдения, а затем человек сменил место жительства. Такой человек будет участвовать в анализе с начала проживания на территории до точной даты выбытия. Исключение из анализа лиц с точной датой выбытия из наблюдения является цензурированием и минимизирует вероятность смещения оценок риска из-за процессов движения в когорте.

Всего за период с 1956 по 2018 г. у членов изучаемой когорты на ТНЗ зарегистрировано 2140 первичных случаев ЗНО, из них 2018 солидных ЗНО. Из этого числа исключены немеланомные раки кожи, что связано с возможностью их недоучета при длительном периоде наблюдения из-за снятия с наблюдения онкологом через 5 лет при отсутствии рецидивов.

Структура заболеваемости ЗНО

Структура заболеваемости ЗНО по локализациям в зависимости от пола и достигнутого возраста представлена в таблице 3. Можно видеть, что до достижения 20 лет чаще встречаются ЗНО кроветворной ткани (11 гемобластозов), а также опухолей нервной системы (4) и ЗНО кости и мышечной системы (4 ЗНО). При сравнении частоты ЗНО по полу можно видеть, что общее число ЗНО за весь период наблюдения у мужчин и женщин почти одинаковое (1122 и 1018) с небольшим превышением у мужчин. Можно отметить, что у мужчин намного чаще встречаются ЗНО, для которых значимым фактором риска является курение (ЗНО ротовой полости, пищевода, желудка, легких и других органов дыхательной системы).

Таблица 2

Жизненный статус членов когорты к 31.12.2018 г.

[Table 2]

Vital status of the cohort members as of December 31, 2018]

Жизненный статус к 31.12.2018 г. [Vital status as of December 31, 2018]	Число человек [Persons]	%	Солидные ЗНО на ТНЗ [Solid cancers on the catchment area]	%
Жив [Alive]	7697	43,0	528	26,2
Умер [Deceased]	7915	44,3	1464	72,5
В том числе:				
Причина смерти известна [Cause of death is known]	7324	92,5	1421	97,1
Причина смерти не известна [Cause of death is unknown]	591	7,5	43	2,9
Потерянные из наблюдения [Lost of follow-up]	2270	12,7	10	0,5
Всего на ТНЗ [Total on the catchment area]	17882	100	2002	99,2
Мигранты [Migrants]	7216	23	16	0,8
Проживавшие в Курганской области с начала облучения [Kurgan Oblast residents since the beginning of exposure]	6480	20	–	
Всего [Total]	31578	100	2018	100

У женщин самый частый рак – это рак молочной железы (198 случаев), на втором месте – ЗНО матки (88 случаев) и шейки матки (82 случая).

Методы статистического анализа

Для анализа риска заболеваемости солидными ЗНО методом Пуассоновской регрессии была использована простая параметрическая модель избыточного относительного риска и программы «DATAB» и «AMFIT» программной оболочки EPICURE. Для построения таблиц человеко-лет и случаев солидных ЗНО была применена

стратификация по полу, национальности (русские или татары и башкиры), календарным периодам по 5 лет (с 1956 по 2016 г. и после), периоду наблюдения (до 1991 г. или после), факту эвакуации, возрасту начала облучения (0–1, 1–4, 5–9, 10–14, 15–19), достигнутому возрасту (от 0 до 80 и старше по 5-летним категориям), году рождения членов когорты (до 1936 г. или после), дозе на желудок (с нижними границами 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,25; 0,5), категориям дозы с учетом латентного периода в 2, 5, 10, 15 лет (с теми же нижними границами). Доверительные интервалы с 95% вероятностью рассчитывались методом

Структура заболеваемости ЗНО по локализациям в зависимости от пола и достигнутого возраста

Таблица 3

[Table 3]

Cancer incidence structure by sites, gender and attained age

Локализация ЗНО (МКБ-9) [Cancer sites (ICD-9)]	Возраст, лет <20 [Age, years]	Все возрасты [All ages]			
		Мужчины [Male]	Женщины [Female]	Всего [Total]	
	n	n	n	n	%
Ротовая полость (140-149) [Oral cavity]	1	64	15	79	4
Пищевод (150) [Esophagus]		38	15	53	3
Желудок (151) [Stomach]		111	77	188	9
Толстый кишечник (153) [Colon]		51	68	119	6
Прямая кишка (154) [Rectum]		65	58	123	6
Печень (155) [Liver]	1	18	8	26	1
Поджелудочная железа (157) [Pancreas]		39	28	67	3
Другие и неуточненные органы пищеварительной системы (152, 156, 158–159) [Other and unspecified organs of digestive system]	2	18	21	39	2
Бронхи, легкие (162) [Bronchus, lungs]		325	55	380	19
Глотка, трахея, плевра, средостение и неопределенные локализации дыхательной системы (160–161, 163–165) [Pharynx, trachea, pleura, mediastinum and uncertain locations of respiratory system]		30	7	37	2
Кости (170), Мышечная и соединительная ткань (171) [Bones, muscle and connective tissue]	4	13	16	29	1
Меланома (172) [Melanoma]		12	19	31	2
Молочная железа (174) [Breast]		0	198	198	10
Шейка матки (180) [Cervix]		0	82	82	4
Тело матки и неуточненные части матки (179, 182) [Uterine body and unspecified parts of uterus]		0	88	88	4
Яичник, другие женские половые органы (181, 183–184) [Ovary, other female genital organs]		0	63	63	3
Простата, другие мужские половые органы (185, 186, 187) [Prostate, other male genital organs]		105	0	105	5
Мочевой пузырь (188) [Bladder]		34	8	42	2
Почки (189) [Kidneys]	1	65	38	103	5
Нервная система (191–192, 239.6), глаз (190) [Nervous system, eye]	4	27	26	53	3
Щитовидная железа (193) [Thyroid]	1	11	37	48	2
Неопределенная локализация (194–199) [Unspecified sites]	2	32	33	65	3
Все солидные ЗНО (140–199, 239.6) [All solid cancers]	16	1058	960	2018	100
Все гемобластозы (200–208) [All hemoblastoses]	11	64	58	122	6
Все злокачественные новообразования [All cancers]	27	1122	1018	2140	100

вероятного правдоподобия. Формула простой параметрической модели имела вид:

$$\lambda(a, d, z) = \lambda_0(a, z_0)(1 + ERR(d, z_1)) \quad (1),$$

где

$\lambda(a, d, z)$ – общий риск заболеваемости ЗНО в зависимости от достигнутого возраста (a), дозы (d) и других факторов (z);

$\lambda_0(a, z_0)$ – базовый уровень риска,

z_0 – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни риска;

$ERR(d, z_1)$ – избыточный относительный риск, моделируемый как:

$$ERR(d, z_1) = \rho(d)\varepsilon(z_1) \quad (2),$$

где $\rho(d)\varepsilon(z_1)$ – функция дозового ответа,

$\varepsilon(z_1)$ – функция модификации эффекта от факторов (z_1), которые могут модифицировать ИОР.

Результаты и обсуждение

Исследование зависимости базовых уровней от нерадиационных факторов

Была проанализирована зависимость базовых уровней заболеваемости солидными ЗНО от пола, этнической принадлежности, факта эвакуации, а также от временно-зависимых факторов – возраста начала облучения, достигнутого возраста, календарного периода, года рождения членов когорты (до 1936 г. и после). При одновременном включении всех указанных факторов в модель часть из них не оказывала значительного влияния на общие показатели, поэтому было проведено более детальное исследование влияния этих факторов в различных сочетаниях, т.к. временные факторы оказывают сильное влияние друг на друга.

После анализа влияния различных факторов и их сочетания на базовые уровни был выбран вариант с наибольшей статистической значимостью каждого компонента при их совместной комбинации. В итоге в базовую модель были включены следующие факторы: пол ($p < 0,001$), национальность ($p = 0,0017$), возраст начала облучения (до 5 лет и позже) ($p < 0,001$), период наблюдения (до 1991 г.

и после) ($p = 0,009$), полспецифичная зависимость от достигнутого возраста ($p < 0,001$).

Базовые показатели заболеваемости за весь период наблюдения у мужчин почти в два раза превышают таковые у женщин, у русского населения выше, чем у татар и башкир, у лиц в возрасте начала облучения до 5 лет выше, чем с 5 до 20 лет, в период после 1991 г. показатели выше, чем до 1991 года, у мужчин в возрасте 70 лет показатели выше, чем в более раннем возрасте у мужчин, и выше, чем в этом же возрасте у женщин, также у женщин, достигших 70 лет, показатели заболеваемости солидными ЗНО выше, чем в более раннем возрасте.

Дозовая зависимость. Характер дозовой зависимости

Исследование влияния дозы на заболеваемость солидными ЗНО (с исключением немеланомного рака кожи) среди облученных в возрасте до 20 лет за период наблюдения с 1956 по 2018 г. показало статистически значимый ИОР/Гр, равный 0,66 (95% ДИ: 0,18–1,22), $p = 0,006$ при расчете по линейной модели.

Добавление квадратичного компонента к линейному (линейно-квадратичная модель) подгонку модели не улучшило ($p > 0,5$).

Оценка квадратичной зависимости показала значимую величину ИОР, равную 1,11/Гр (95% ДИ: 0,19–2,21), $p = 0,015$. При этом показатель AIC (Информационный критерий Акаике) [14], применяющийся для выбора из нескольких статистических моделей при регрессионном анализе, был несколько выше, чем в линейной модели, и указывал на преимущество линейной модели.

Исследование влияния латентного периода

Исследуемое население получило длительное радиационное воздействие с низкой мощностью дозы в диапазоне низких и средних доз (до 1 Гр) (за исключением дозы на костный мозг и кости), поэтому последствия облучения могут иметь особенности, отличные от острого облучения. В связи с этим нами были рассчитаны величины ИОР и сопутствующие показатели при использовании различных минимальных латентных периодов (0, 2, 5, 10, 15 лет), необходимых для реализации ЗНО после радиационного воздействия (табл. 4).

Сравнительные показатели при оценке ИОР с использованием разных латентных периодов и моделей

Таблица 4

[Table 4]

Comparative indicators in assessing ERR using different latency periods and models

Латентный период, лет [Latency period, years]	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [CI]	P	Избыточные солидные ЗНО [Excessive solid cancer]	Фоновые солидные ЗНО [Background solid cancer]	AIC*
Линейная модель [Linear model]						
0	0,66	0,17–1,21	0,006	75,66	1942,3	9622,215
2	0,67	0,17–1,21	0,006	75,59	1942,4	9622,215
5	0,66	0,18–1,22	0,006	75,94	1942,0	9622,125
10	0,69	0,20–1,25	0,005	78,16	1939,8	9621,636
15	0,70	0,20–1,27	0,004	78,59	1939,4	9621,466
Квадратичная модель [Quadratic model]						
5	1,11	0,19–2,21	0,015	30,98	1987,0	9623,832

*AIC – информационный критерий Акаике, для выбора моделей [Akaike information criterion for model selection].

Судя по данным таблицы 4, можно видеть, что величина ИОР при минимальном латентном периоде от 0 до 5 лет включительно практически не отличается как по величине ИОР, так и по доверительному интервалу и значению Р, незначительные изменения наблюдаются и при 10- и 15-летнем периодах. По показателю АIC первые минимальные улучшения модели начинаются с 5-летнего периода. Очень незначительное увеличение оценки ИОР наблюдается при 10- и 15-летнем латентном периоде. Для облегчения сравнения показателей с нашими предыдущими исследованиями и в когорте LSS (выживших после атомной бомбардировки) далее в анализе мы использовали 5-летний минимальный латентный период. Показатели с 10-летним латентным периодом могут быть сравнены с результатами исследований, использующих 10-летний латентный период.

Атрибутивный риск

В таблице 5 представлены распределение по дозовым категориям числа человеко-лет и наблюдаемых на ТНЗ случаев солидных ЗНО, а также рассчитанные по линейной модели с 5-летним минимальным латентным периодом избыточные и фоновые случаи солидных ЗНО и атрибутивный риск.

Согласно линейной модели, с увеличением дозы увеличивается доля избыточных случаев ЗНО. Начиная с до-

зовой группы свыше 50 мГр, атрибутивный риск (доля избыточных случаев от суммы избыточных и фоновых случаев в группе, рассчитанных по модели) составляет от 4,6% и выше, достигая в наибольшей группе 29%. В целом, за весь период для членов данной когорты доля случаев солидных ЗНО, которая может быть вызвана радиационным воздействием, составляет 3,8%.

Модификация эффекта

Объединение всех облученных в детском возрасте на Южном Урале в одну когорту привело к увеличению исследуемой выборки и увеличило статистическую силу для изучения риска развития солидных ЗНО в отдельных группах населения, а соответственно, и возможности их сравнения.

Для оценки возможной модификации дозового ответа нерадиационными факторами ИОР заболеваемости солидными ЗНО был рассчитан для следующих групп: по полу, этнической принадлежности, возрасту начала облучения, достигнутому возрасту, календарному периоду, факту эвакуации, факту облучения родителей, факту облучения в результате проживания на территории ВУРСа или в прибрежных селах реки Теча.

В таблице 6 представлены величины ИОР с 95% доверительными интервалами, рассчитанными по линейной

Распределение избыточных случаев и атрибутивного риска по дозовым группам

Таблица 5

[Table 5]

Distribution of excess cases and attributive risk by dose groups

Дозовые группы [Dose groups]	Средняя доза [Mean dose]	Человеко-годы [Person-years]	Наблюдаемые солидные ЗНО [Observed solid cancer]	На основе линейной модели [Based on linear model]		
				Избыток ЗНО [Excess cancer]	Фоновый уровень [Background level]	Атрибутивный риск, % [Attributive risk]
0 -	0,001	261 491,0	394	0,2	416,4	0,1
0,002 -	0,005	138 110,0	323	1,1	321,5	0,3
0,01 -	0,01	90 321,3	254	2,3	236,1	1,0
0,02 -	0,03	118 366,0	356	7,3	354,0	2,0
0,05 -	0,07	89 362,3	280	11,8	243,2	4,6
0,1 -	0,14	89 716,4	287	25,7	274,9	8,6
0,25 -	0,36	22 978,0	86	16,8	69,5	19,4
0,5 +	0,63	7737,0	38	10,8	26,4	29,0
0-1,13	0,047	818 083	2018	76	1942	3,8

Таблица 6

Величины ИОР в различных группах членов УКОД

[Table 6]

ERR values in different groups of the UChEC

Параметры [Parameters]	Средняя доза [Mean dose]	ИОР/Гр(95% ДИ) [ERR/Gy(95%CI)]	p	Солидные ЗНО [Solid cancer]	Избыток [Excess]
Мужчины [Male]	0,045	0,15(-0,41;0,83)	>0,5	1058	8,8
Женщины [Female]	0,049	1,26(0,49; 2,19)	0,003	960	68,4
Татары и башкиры [Tatars & Bashkirs]	0,055	1,20(0,30;2,29)	0,02	856	68,0
Славяне [Slavs]	0,039	0,42(-0,11; 1,06)	0,16	1162	23,7
Эвакуированы [Evacuated]	0,088	0,64(0,16; 1,20)	0,02	895	55,5
Не эвакуированы [Non-evacuated]	0,019	1,80(0,14; 3,71)	0,04	1123	48,6

Параметры [Parameters]	Средняя доза [Mean dose]	ИОР/Гр(95% ДИ) [ERR/Gy(95%CI)]	p	Солидные ЗНО [Solid cancer]	Избыток [Excess]
Календарный период [Calendar period]					
1956–1990	–	-0,02(nf-0,89; 1,16)	>0,5	260	-0,4
1991–2018	–	0,82(0,27; 1,47)	<0,005	1758	79,5
Статус облучения родителей [Parents exposure status]					
Не облучены [Not exposed]	0,069	0,61(0,12; 1,17)	0,02	1454	61,4
Облучены [Exposed]	0,019	1,86(-0,06; 4,23)	<0,08	509	23,8
Неизвестно [Unknown]	0,013	0,02(Nf**<0; 15,4)	>0,5	55	0,01
Территория облучения на реке Тече или на ВУРС [Area of exposure on the Techa River or EURT]					
Только река [Only Techa river]	0,049	0,88(0,18; 1,70)	0,02	1414	68,8
Только ВУРС [Only EURT]	0,012	1,0(-1,66; 4,24)	>0,5	463	6,7
Река+ВУРС [Techa river +EURT]	0,199	0,49(-0,08; 1,17)	0,13	141	14,4
Все облученные на реке [All exposed on the river]	0,062	0,66(0,17; 1,22)	0,02	1555	71,3
Все облученные на ВУРС [All exposed at EURT]	0,043	0,51(-0,06; 1,19)	0,11	604	18,4
Возраст начала облучения, лет [Age at exposure, years old]					
<1	0,025	2,16(0,47; 4,30)	<0,02	476	32,2
1–4	0,053	0,79(-0,34; 2,23)	0,19	322	14,8
5–9	0,056	0,82(-0,11; 1,98)	0,14	309	16,3
10–14	0,079	0,33(-0,29; 1,09)	0,35	471	12,9
15–19	0,047	0,48(-0,44; 1,66)	0,38	440	10,5
Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]					
30		0,43(Nf 0,02; 1,61)	0,5		
70		0,74(Nf 0,20; 1,40)	0,02		
Вся когорта [Whole cohort]	0,047	0,66(0,18; 1,22)	0,006	2018	75,9

* Nf (Not found) – программа не может корректно рассчитать показатель с указанной степенью вероятности [The program cannot correctly calculate the value with the specified degree of probability].

модели в каждой из исследуемых групп, а также средняя доза, накопленная в стенках желудка и рассчитанная с 5-летним лагом, число наблюдаемых солидных ЗНО и число избыточных солидных ЗНО, рассчитанных по модели.

Величина ИОР у женщин превышает таковую во всей когорте и является статистически значимой (1,26/Гр; 95% ДИ: 0,49–2,19). У мужчин, несмотря на большее число случаев ЗНО, величина ИОР в зависимости от дозы небольшая и не является значимой ($p>0,5$).

При оценке зависимости ИОР от этнической принадлежности наблюдается статистически значимый ИОР 1,2/Гр; 95% ДИ: 0,3–2,3 в группе татар и башкир, тогда как у русского населения не получено значимой оценки ($p=0,16$).

Относительно высокие средние дозы облучения наблюдаются у эвакуированного населения, что логично, т.к. переселение проводилось в первую очередь с сильно загрязненных территорий, при этом величина риска является значимой (0,64/Гр; 95% ДИ: 0,16–1,2) и соответствует таковой во всей когорте (0,66/Гр). Более высокая точечная оценка ИОР среди неэвакуированного населения (1,8/Гр, 95% ДИ: 0,14–3,7) имеет широкий довери-

тельный интервал (почти в 3 раза больше, чем у эвакуированного населения), и различия в группах не являются достоверными.

Сравнения ИОР в зависимости от календарного периода показывают более высокий риск, чем во всей когорте (0,82/Гр; 95% ДИ: 0,27–1,47) в период после 1991 г., а до 1991 г. показатель имеет большие неопределенности. Фактор календарного периода может отражать комплексную зависимость от достигнутого возраста, времени после облучения, накопления дозы.

Приведены величины ИОР у членов УКОД в зависимости от статуса облучения их родителей. Значимая величина ИОР (0,61/Гр, 95% ДИ: 0,12–1,7), близкая к показателю во всей когорте, наблюдается только в группе с необлученными родителями. Группа с облученными родителями, в основном, представлена лицами, облученными в более позднем периоде, поэтому средняя доза, накопленная в стенках желудка, у них в 3 раза ниже, значения ИОР имеют большую неопределенность и не имеют статистической значимости ($p<0,08$).

Наиболее высокие значения средней накопленной дозы наблюдаются в группе лиц, облученных сразу

в двух ситуациях (на реке Теча и на ВУРСе – 199 мГр). Малочисленность самой группы не позволяет получить значимые оценки ИОР, но ее добавление к группе лиц, облученных только на реке или только на ВУРСе, увеличивает статистическую силу и уменьшает разброс доверительного интервала в оценках ИОР. Добавление лиц с более высокими дозами в группу облученных только на ВУРСе уменьшает неопределенности, что приводит к снижению величины риска и уменьшению доверительного интервала (0,51/Гр; 95% ДИ – 0,06; 1,19), но показатели остаются незначимыми.

Интересным оказалось сравнение показателей ИОР в зависимости от возраста начала облучения: достоверные и самые высокие показатели оказались только в группе облученных в возрасте до 1 года (ИОР=2,16/Гр; 95% ДИ: 0,47–4,3; $p < 0,02$). Получено, что 32 из 476 солидных ЗНО могут быть связаны с воздействием радиации, атрибутивный риск составляет 6,5%. В остальных группах величина ИОР была в 3–4 раза меньше, и доверительные интервалы включали отрицательные значения. При этом число ЗНО в данных группах было сопоставимо.

В возрасте облучения 10–14 лет средняя накопленная доза больше, чем в других возрастных группах (79 мГр) и наблюдается несколько большее число солидных ЗНО, но величина ИОР не является значимой.

Для оценки изменения ИОР с увеличением достигнутого возраста была оценена величина ИОР при достижении членами УКОД 30 лет, равная 0,43/Гр ($p=0,5$), и 70 лет, равная 0,74/Гр, $p=0,02$. Величина ИОР в 70 лет была выше, но для обоих возрастов нижняя граница доверительного интервала не могла быть определена, и сохранялась большая неопределенность.

Несмотря на указанную неопределенность нижней границы у этих показателей, такая зависимость (увеличение величины ИОР с увеличением достигнутого возраста) наблюдалась нами и во всех предыдущих исследованиях в когорте реки Теча и на ВУРСе.

Заключение

В настоящее время сформирована когорта населения, облученного в возрасте до 20 лет в двух радиационных ситуациях на Южном Урале. Численность когорты для анализа заболеваемости составила 31 578 человек, у которых в течение 818 083 человеко-лет под риском было зарегистрировано 2018 солидных ЗНО. Индивидуальные дозы на желудок были рассчитаны сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ с использованием усовершенствованной дозиметрической системы TRDS-2016. Средняя доза, накопленная в стенках желудка за 63-летний период, с учетом 5-летнего латентного периода у лиц, включенных в анализ заболеваемости, составила 0,047 Гр, максимальная – 1,13 Гр.

Первые исследования риска заболеваемости солидными ЗНО в этой когорте показали линейную зависимость от дозы облучения и статистически значимый избыточный относительный риск, равный 0,66/Гр (95%ДИ: 0,18–1,22) для всех членов когорты. При этом было установлено, что дозовая зависимость заболеваемости солидными ЗНО, в основном, обусловлена облучением в возрасте до 1 года.

Необходимо отметить, что часть членов когорты получила дополнительное внутриутробное облучение, или имело место преконцептивное облучение их родителей.

В настоящем исследовании доза внутриутробного облучения не была включена в анализ, но были оценены величины ИОР у членов когорты с необлученными родителями и с облученными родителями. Сравнение показало наличие статистически достоверной величины ИОР у членов когорты с необлученными родителями (0,61/Гр, 95% ДИ: 0,12–1,7), близкой к значению ИОР для всей УКОД. В то же время ИОР в группе с облученными родителями был статистически незначим и с большими неопределенностями, что свидетельствует об отсутствии влияния облучения родителей до зачатия на радиационный риск ЗНО.

Сформированная когорта обладает потенциалом для анализа риска ЗНО отдельных локализаций у облученных в раннем детстве и более углубленного изучения влияния дозы (постнатальной или внутриутробной) на заболеваемость и смертность облученных детей.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года». Выражаем глубокую благодарность коллективу биофизической лаборатории УНПЦ РМ, возглавляемому кандидатом технических наук М.О. Дегтевой и ответственному за оценку доз облученного населения, а также коллективу отдела Базы данных «Человек», возглавляемому Н.В. Старцевым, за поддержку в актуальном состоянии регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ.

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. Preston D.L., Cullings H., Suyama A., et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children // Journal of the National Cancer Institute . 2008. Vol. 100. P. 428-436.
3. Wakeford R., Little M.P. Risk coefficients for childhood cancer after intrauterine irradiation: a review // International Journal of Radiation Biology. 2003. Vol. 79, No. 5. P. 293-309.
4. Johnson K.J., Alexander B.H., Doody M.M., et al. Childhood cancer in the offspring born in 1921-1984 to US radiologic technologists // British Journal of Cancer. 2008. Vol. 99, No. 3. P. 545-50.
5. Hatch M., Brenner A., Bogdanova T., et al. A screening study of thyroid cancer and other thyroid diseases among individuals exposed in utero to iodine-131 from Chernobyl fallout // The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism. 2009. Vol. 94, No. 3. P. 899-906. doi: 10.1210/jc.2008-2049.
6. Neta G., Hatch M., Kitahara C.M., et al. In utero exposure to iodine-131 from Chernobyl fallout and anthropometric characteristics in adolescence // Radiation Research. 2014. Vol. 181, No. 3. P. 293-301. doi: 10.1667/RR13304.1.
7. Ostroumova Y.V., Akleyev A.V., Hall P. Cancer incidence among a cohort of subjects exposed to low dose rate chronic radiation in utero and after birth in the Techa Riverbank villages // International Journal of Radiation Medicine. 2003. Vol. 5, No. 1-2. P. 73-83.
8. Ostroumova E.V., Akleyev A.V. Cancer Mortality Among Techa Riverside Residents (Southern Urals), Chronically Exposed to Radiation During the Prenatal Period and in Childhood. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association [Internet]; 2004 May 23-28 [cited 2004 April]; Madrid, Spain. URL: irpa11.irpa.net/pdfs/1b21.pdf. 2003. (дата обращения: 15.11.2020).

9. Харюзов Ю.Е., Крестинина Л.Ю., Толстых Е.И., Аклеев А.В. Методология наблюдения и описательный анализ смертности и онкологической заболеваемости в когорте лиц, облучившихся на Реке Теча в период внутриутробного развития // Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 3. С. 92-104.
10. Krestinina L.Yu., Kharyuzov Yu.E., Epifanova S.B., et al. Cancer Incidence after In Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents // Radiation Research. 2017. Vol. 188. P. 314-324. DOI: 10.1667/RR14695.1
11. Akleyev A., Deltour I., Krestinina L., et al. Incidence and Mortality of Solid Cancers in People Exposed In Utero to Ionizing Radiation: Pooled Analyses of Two Cohorts from the Southern Urals, Russia // PLoS ONE. 2016. Vol. 11, No. 8. P. e0160372. doi:10.1371/journal.pone.0160372
12. 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
13. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I., et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // Health Physics. 2019. Vol. 117, No. 4. P. 378-387.
14. Akaike H. A new look at the statistical model identification. In IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. Vol. 19, No 6. P. 716-723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705

Поступила: 15.11.2020 г.

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук, заведующая эпидемиологической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ludmila@urcrm.ru

Шалагинов Сергей Александрович – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Силкин Станислав Сергеевич – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Епифанова Светлана Борисовна – старший инженер эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., Силкин С.С., Епифанова С.Б., Аклеев А.В. Радиогенный риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у лиц, облучённых на Южном Урале в детском возрасте // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 49-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-49-59

Radiogenic risk of solid cancer incidence in persons exposed to radiation in childhood in the Southern Urals

Lyudmila Yu. Krestinina, Sergey A. Shalaginov, Stanislav S. Silkin, Svetlana B. Epifanova, Aleksandr V. Akleyev

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

The aim of this work is to assess the radiogenic risk of solid cancers incidence in the members of the Urals Childhood Exposure Cohort. The cohort includes people exposed under 20 years of age as a result of two radiation accidents at the Mayak Production Association in the Southern Urals (discharges of radioactive waste into the Techa River and the formation of the East Ural radioactive trace). The number of the cohort for solid cancer incidence analysis is 31,578 individuals. All the members were postnatally exposed and some of them – in-utero. Some of their parents were exposed before conception. 2,018 solid cancers were registered on the incidence catchment area during the period 1956-2018, the total amount of person years was 818,083. The analysis was carried out by the Poisson regression method with a simple parametric excess relative risk model. 95% confidence intervals were estimated with maximum likelihood approach. Only a postnatal dose

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

was used in the first solid cancer incidence analysis of this cohort members with due account for preconception exposure of parents. TRDS-2016 mean postnatal dose accumulated over the entire follow-up period in the stomach of cohort members was 0.047 Gy. The analysis showed linear dependence of solid cancer incidence excess relative risk on postnatal dose. Excess relative risk was 0.66/Gy, $p=0.006$ with a five-year latency period. While estimating excess relative risk in different age groups at the beginning of exposure, a significant risk was present only in the age group under 1 year and amounted to 2.16/Gy; $p<0.02$ at the onset of exposure. The present results are in agreement with the results of the solid cancer incidence risk analysis both in the Techa River Cohort of exposed In-Utero where a statistically significant excess relative risk from a postnatal dose was revealed, and with the results of risk analysis in the Japanese cohort of people exposed in-utero and in early childhood.

Key words: Urals Childhood Exposure Cohort, the Techa River, East Urals radioactive trace, radiogenic risk, solid cancer incidence, excess relative risk.

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. Preston DL, Cullings H, Suyama A, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors exposed in utero or as young children. *Journal of the National Cancer Institute*. 2008;100: 428-436.
3. Wakeford R, Little MP. Risk coefficients for childhood cancer after intrauterine irradiation: a review. *International Journal of Radiation Biology*. 2003;79(5): 293-309.
4. Johnson KJ, Alexander BH, Doody MM, Sigurdson AJ, Linet MS, Spector LG, et al. Childhood cancer in the offspring born in 1921-1984 to US radiologic technologists. *British Journal of Cancer*. 2008;99(3): 545-50.
5. Hatch M, Brenner A, Bogdanova T, Derevyanko A, Kuptsova N, Likhtarev I, et al. A screening study of thyroid cancer and other thyroid diseases among individuals exposed in utero to iodine-131 from Chernobyl fallout. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 2009;94(3): 899-906. doi: 10.1210/jc.2008-2049.
6. Neta G, Hatch M, Kitahara CM, Ostroumova E, Bolshova EV, Tereschenko VP, et al. In utero exposure to iodine-131 from Chernobyl fallout and anthropometric characteristics in adolescence. *Radiation Research*. 2014;181(3): 293-301. doi: 10.1667/RR13304.1.
7. Ostroumova YV, Akleyev AV, Hall P. Cancer incidence among a cohort of subjects exposed to low dose rate chronic radiation in utero and after birth in the Techa Riverbank villages. *International Journal of Radiation Medicine*. 2003;5(1-2): 73-83.
8. Ostroumova EV, Akleyev AV. Cancer Mortality Among Techa Riverside Residents (Southern Urals), Chronically Exposed to Radiation During the Prenatal Period and in Childhood. 11th International Congress of the International Radiation Protection Association [Internet]; 2004 May 23-28 [cited 2004 April]; Madrid, Spain. – Available from: irpa11.irpa.net/pdfs/1b21.pdf. 2003. [Accessed 15 November 2020].
9. Kharyuzov YuE, Krestinina LYu, Tolstykh EI, Akleyev AV. Follow-up methodology and analysis of mortality and cancer incidence in the cohort of people in utero exposed to radiation as a result of radioactive contamination of environment and the Techa River. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2015;24(3): 92-104. (In Russian).
10. Krestinina LYu, Kharyuzov YuE, Epifanova SB, Tolstykh EI, Deltour I, Schüz J, et al. Cancer Incidence after In Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents. *Radiation Research*. 2017;188: 314-324. DOI: 10.1667/RR14695.1
11. Akleyev A, Deltour I, Krestinina L, Sokolnikov M, Tsareva Y, Tolstykh E, et al. Incidence and Mortality of Solid Cancers in People Exposed In Utero to Ionizing Radiation: Pooled Analyses of Two Cohorts from the Southern Urals, Russia. *PLoS ONE*. 2016;11(8): e0160372. doi:10.1371/journal.pone.0160372
12. Shalaginov SA, Krestinina LYu. 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
13. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387.
14. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *In IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974;19(6): 716-723. doi:10.1109/TAC.1974.1100705

Received: November 15, 2020

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, Head, Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia. (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)

Sergey A. Shalaginov – Candidate of Medical Sciences, Senior researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Stanislav S. Silkin – Researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Svetlana B. Epifanova – Senior engineer of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

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, Chelyabinsk, Russia

For citation: Krestinina L.Yu., Shalaginov S.A., Silkin S.S., Epifanova S.B., Akleyev A.V. Radiogenic risk of solid cancer incidence in persons exposed to radiation in childhood in the Southern Urals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 1. P. 49-59. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-49-59

Оценка консервативности предположений об условиях облучения населения, принятых при установлении нормативов предельно допустимых выбросов

А.И. Крышев¹, А.А. Бурякова¹, М.Е. Васянович², А.А. Екидин²

¹ Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

² Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Нормативы предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух устанавливаются из условия непревышения годовой дозовой квоты облучения населения. При расчетах годовой дозы в методиках установления предельно допустимых выбросов принимаются консервативные предположения об условиях облучения населения: возможно проживание человека в любой точке местности за пределами санитарно-защитной зоны; доза по всем путям воздействия, включая потребление продуктов питания, определяется местом проживания. Для количественной оценки консервативности этих предположений проведены расчеты годовой дозы облучения взрослого населения, проживающего в районе расположения Смоленской, Ростовской и Билибинской АЭС. Оценки выполнены для 3 сценариев: постоянное проживание в критической точке местности с потреблением всех продуктов питания, выращенных в этой точке (сценарий 1) или определенной части привозных продуктов (сценарий 2); постоянное проживание в населенном пункте в районе расположения АЭС с учётом реалистичных характеристик ведения хозяйственной деятельности (сценарий 3). Исходными данными являлись уровни поступления радиоактивных веществ в атмосферный воздух, оцененные в рамках радиационно-технического обследования источников выбросов АЭС (2017–2019 гг.). Показано, что предположения об условиях облучения существенно влияют на консервативность оценки годовой дозы от выбросов АЭС. Оценки, выполненные способом, принятым в методиках установления предельно допустимых выбросов, выше расчетной годовой дозы при реалистичных характеристиках хозяйственной деятельности для Смоленской АЭС в 6,3 раза, для Ростовской – в 8,4 раза, для Билибинской АЭС – в 883 раза. Наибольшая степень консервативности характерна для оценок дозы внутреннего облучения. Результаты расчета годовой дозы от выбросов АЭС сильно зависят от выбора метода оценки дозы от ^3H и ^{14}C . Учет региональных значений доли продуктов местного производства в рационе населения позволяет обоснованно снизить консервативность расчетов годовой дозы от постоянных выбросов АЭС.

Ключевые слова: доза, выброс, население, продукты питания, тритий, углерод-14, атомная электростанция.

Введение

Нормативы предельно допустимых выбросов (ПДВ) радиоактивных веществ в атмосферный воздух устанавливаются,

исходя из условия соблюдения годовой дозовой квоты для населения¹. Действующие методики определения ПДВ^{2,3,4} содержат метод расчета годовой дозы от постоянных выбросов радионуклидов. Годовая доза

¹ Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Утверждена приказом Ростехнадзора от 07.11.2012 № 639. [Methodology for development and establishment of radioactive substances maximum permissible atmospheric discharge limits approved by the order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service No.639 of 07.11.2012. (In Russ.)]

² РБ-106-15 Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуются методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. [RB-106-15. Safety guide on nuclear energy use. Recommended methods of parameters calculation which are necessary to prepare and establish permissible limits of radioactive substances discharges into atmosphere. (In Russ.)]

Крышев Александр Иванович

Научно-производственное объединение «Тайфун»

Адрес для переписки: 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4; E-mail: ecomod@yandex.ru

для населения рассчитывается как сумма доз внешнего облучения от радиоактивного облака и выпадений на поверхность почвы, внутреннего облучения от вдыхания радионуклидов и их поступления с продуктами питания. Метод содержит следующие консервативные предположения об условиях облучения населения:

- возможно проживание человека в любой точке местности за пределами санитарно-защитной зоны предприятия;

- годовая доза рассчитывается в точке наибольшей приземной концентрации радионуклидов в атмосферном воздухе и наибольших радиоактивных выпадений за пределами санитарно-защитной зоны (далее – критическая точка местности);

- весь спектр сельскохозяйственной продукции (молоко, мясо, хлеб, картофель, овощи, фрукты) выращивается в критической точке местности и потребляется местными жителями.

Консервативные методы рекомендуется применять в случае отсутствия необходимой информации об условиях формирования дозы и уровнях воздействия на население, что соответствует принципу ALARA. Для действующих АЭС систематический мониторинг и периодические комплексные радиационно-технические обследования дают представление об источниках выбросов и содержании радионуклидов в окружающей среде при нормальной эксплуатации станции. Условия формирования облучения во многом определяются местом проживания и хозяйственной деятельностью человека, особенностями его питания.

Цель исследования – количественная оценка консервативности предположений об условиях облучения, принятых при расчетах годовой дозы при установлении нормативов ПДВ радиоактивных веществ АЭС. Для этого выполнен расчет годовой дозы облучения взрослого человека от постоянных выбросов для 3 различных сценариев проживания и ведения хозяйственной деятельности.

Задачи исследования

Задачей исследования является оценка консервативности метода расчета годовой дозы при установлении нормативов ПДВ и рекомендации по возможности ее обоснованного снижения.

Объект исследования

Объектом исследования являются условия формирования годовых доз облучения населения в результате штатных газоаэрозольных выбросов 3-атомных станций,

различающихся как по типу реакторных установок, так и по климатическим характеристикам и образу жизни населения – Смоленской, Ростовской, Билибинской.

Смоленская АЭС расположена в европейской части России, на юге Смоленской области, в 35 км от г. Рославля. Санитарно-защитная зона Смоленской АЭС определена окружностью радиусом 3 км. Населенные пункты в зоне наблюдения, в основном, составляют села и поселки городского типа. Ближайшим к станции является г. Десногорск (3 км). На Смоленской АЭС эксплуатируются 3 энергоблока (№ 1 и 2 – первая очередь, № 3 – вторая очередь), введенные в эксплуатацию в 1982, 1985 и 1990 гг. соответственно, с реакторами РБМК-1000 одноконтурного типа общей мощностью 3000 МВт. Выброс радионуклидов осуществляется из двух вентиляционных труб высотой 150 м.

Ростовская АЭС расположена в южной степной части Русской равнины, в Ростовской области, в 13,5 км восточнее г. Волгодонска на южном берегу Цимлянского водохранилища, созданного в нижнем течении р. Дон. Вокруг Ростовской АЭС установлена санитарно-защитная зона радиусом 3 км. Проект Ростовской АЭС относится к серии унифицированных проектов с реакторами ВВЭР-1000 (В-320) третьего поколения. Каждый из четырех энергоблоков электрической мощностью по 1 ГВт размещается в отдельно стоящем главном корпусе. Газоаэрозольные выбросы Ростовской АЭС удаляются в атмосферу через 5 вентиляционных труб, высотой 100 м каждая.

На Ростовской АЭС, как и на многих АЭС с ВВЭР, функционируют брызгальные бассейны, применяющиеся для непрерывного охлаждения технологического оборудования реакторного отделения. Особенностью проектов АЭС, подобных Ростовской, является то, что их технический регламент предусматривает сброс дебалансных вод, содержащих тритий в форме НТО, в брызгальные бассейны. Присутствие трития в воде системы технического водоснабжения ответственных потребителей реакторного отделения создает условия для поступления трития в атмосферу в процессе функционирования брызгальных бассейнов [1]. Этот источник поступления трития в атмосферный воздух учитывается при расчете годовой дозы облучения населения от выбросов Ростовской АЭС.

Билибинская АЭС расположена в Билибинском районе Чукотского АО, на северо-востоке России, за Полярным кругом, в зоне вечной мерзлоты. Билибинская АЭС включает в себя 4 однотипных энергоблока, установленная электрическая мощность станции составляет 48 МВт. Все 4 энергоблока Билибинской АЭС используют реакторную установку ЭГП-6. Источником выброса радиоактивных

³ Методические рекомендации по расчету нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ из организованных источников в атмосферный воздух применительно для организаций Госкорпорации «Росатом». Утверждены 15.07.2014 г. № 1-1/310-Р. Госкорпорация «Росатом». [Methodological guidelines for calculating the maximum permissible emissions of radioactive substances from organized sources into the atmosphere for organizations of the State Atomic Energy Corporation «Rosatom». Approved by the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» No 1-1/310-P of 15.07.2014. (In Russ.)]

⁴ Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. Методика. МТ 1.2.1.15.1176-2016. АО «Концерн Росэнергоатом». [Guidance MT 1.2.1.15.1176-2016. Development and approval of the standards for maximum permissible air emissions of radioactive substances by nuclear power plants. Moscow, АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. (In Russ.)]

веществ Билибинской АЭС являются 2 вентиляционные трубы высотой 50 м.

Материалы и методы

В 2017–2019 гг. было проведено радиационно-техническое обследование источников выбросов радионуклидов АЭС России [2, 3]. Обследование выполнялось в рамках работ по установлению нормативов предельно допустимых выбросов с целью определения источников и перечня радионуклидов, подлежащих нормированию и контролю в соответствии с требованиями Ростехнадзора. Обследование позволило оценить уровни поступления радиоактивных веществ в атмосферный воздух, в том числе тех радионуклидов, для которых регламентный контроль выбросов станциями не проводился, поскольку они не входили в перечень нормируемых по СП АС-03⁵. Годовые выбросы радионуклидов Смоленской, Ростовской и Билибинской АЭС, оцененные по результатам радиационно-технического обследования, используются как исходные данные для расчета доз (табл. 1).

Среднегодовые объемные активности радионуклидов в приземном воздухе и атмосферные выпадения вычислялись с помощью модели рассеивания примеси, изложенной в методике разработки и установления нормативов ПДВ радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух⁴. Годовые дозы внешнего облучения населения от радиоактивного облака и поверхности почвы, внутреннего облучения от вдыхания радионуклидов и потребления продуктов питания рассчитывались по методике⁴.

При оценке дозы облучения населения от выбросов ^3H и ^{14}C все действующие методики расчета ПДВ делают консервативное предположение об установлении равновесия в распределении радионуклидов между организмом человека и атмосферным воздухом. При этом годовая доза от ^3H определяется по формуле^{2,4}:

$$D_{3\text{H}} = DCF_{3\text{H}} \cdot C_{3\text{H}} / H_a, \quad (1)$$

где $DCF_{3\text{H}} = 2,6 \times 10^{-8} \frac{\text{Зв}}{\text{год}} \frac{\text{Бк}}{\text{л}}$ – дозовый коэффициент для ^3H ; $C_{3\text{H}}$ – объемная активность ^3H в воздухе, Бк/м³; H_a – абсолютная влажность воздуха, л/м³.

Годовая доза от ^{14}C при условии равновесия^{2,4}:

$$D_{14\text{C}} = DCF_{14\text{C}} \cdot C_{14\text{C}} / C_{12\text{C}}, \quad (2)$$

где $DCF_{14\text{C}} = 5,6 \times 10^{-5} \frac{\text{Зв}}{\text{год}} \frac{\text{Бк}}{\text{г}}$ – фактор конверсии, связывающий годовую дозу внутреннего облучения от ^{14}C (Зв/год) с его концентрацией в тканях человека в расчете на 1 г стабильного углерода; $C_{14\text{C}}$ – объемная активность ^{14}C в воздухе, Бк/м³; $C_{12\text{C}} = 0,18 \text{ г/м}^3$ концентрация стабильного углерода в воздухе.

Предположение об установлении равновесия ^3H и ^{14}C между организмом человека и атмосферным воздухом, принятое в методиках расчета ПДВ, не учитывает того, что значительная часть потребляемой населением продукции является привозной. Чтобы учесть этот фактор, будем считать, что равновесие в распределении ^3H и ^{14}C устанавливается между атмосферным воздухом и местной растительной и животной продукцией, тогда как равновесие между атмосферным воздухом и организмом человека может отсутствовать [4].

Тогда доза облучения взрослого человека от ^3H , Зв/год, вместо (1) вычисляется по формуле:

$$D_{3\text{H}} = C_{3\text{H}} \cdot (2 \cdot U \varepsilon_{\text{инг}, 3\text{H}} + \varepsilon_{\text{пищ}, 3\text{H}} \cdot \sum_k f_{w,k} \cdot R_k \cdot \alpha_k / H_{\text{возд}}), \quad (3)$$

где принято, что поступление ^3H через кожу равно его поступлению ингаляционным путем⁶, $\varepsilon_{\text{инг}, 3\text{H}} = 1,8 \times 10^{-11} \text{ Зв/Бк}$ – дозовый коэффициент при ингаляции ^3H в форме НТО [5]; $\varepsilon_{\text{пищ}, 3\text{H}} = 1,8 \times 10^{-11} \text{ Зв/Бк}$ – дозовый коэффициент при пищевом поступлении ^3H в форме НТО [5]; $f_{w,k}$ – доля воды в k -м продукте питания. Значение $f_{w,i} = 0,87$ для молока, 0,69 – мяса, 0,87 – картофеля и корнеплодов, 0,84 – овощей, 0,85 – фруктов; 0,12 – зерновых культур [6]. Среднегодовая абсолютная влажность воздуха для района расположения Смоленской АЭС $H_{\text{возд}} = 6,57 \text{ г/м}^3$, Ростовской АЭС – 7,27 г/м³, Билибинской АЭС – 2,82 г/м³.

Выброс техногенных радионуклидов по данным радиационно-технического обследования, Бк/год

Таблица 1

[Table 1]

Release of technogenic radionuclides according to radiation and technical survey data, Bq/year						
АЭС [NPP]	^3H	^{14}C	^{60}Co	^{131}I	^{137}Cs	ИРГ [RIG]
Смоленская [Smolensk]	$2,4 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{13}$	$8,5 \cdot 10^7$	$6,6 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$	$4,7 \cdot 10^{14}$
Ростовская [Rostov]	$6,4 \cdot 10^{12}$	$7,4 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^{13}$
Билибинская [Bilibino]	$2,9 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$5,8 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^{12}$

⁵ СанПиН 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, Первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 22.04.2003. М., Минздрав РФ, 2003. [SanPiN 2.6.1.24-03. Sanitary rules for design and operation of nuclear plants (SP AS-03). Approved by the Chief State Health Officer of the Russian Federation, First Deputy Minister of Health of the Russian Federation G.G. Onishchenko on 22.04.2003. Moscow, RF Minzdrav, 2003. (In Russ.)]

⁶ МУ 2.6.5.010-2016. Обоснование границ и условия эксплуатации санитарно-защитных зон и зон наблюдения радиационных объектов. Утв. главным государственным санитарным врачом ФМБА России 22.04.2016 г. [MU 2.6.5.010-2016. Justification of borders and operating conditions of sanitary protection zones and radiation monitoring zones. Approved by the chief state sanitary doctor of the FMBA (Russia) of 22.04.2016. (In Russ.)]

Доза облучения взрослого человека от ^{14}C , Зв/год, при отсутствии равновесия между атмосферным воздухом и организмом человека вместо (2) рассчитывается по формуле:

$$D_{14\text{C}} = \varepsilon_{\text{инг},14\text{C}} U C_{14\text{C}} + \varepsilon_{\text{пищ},14\text{C}} \cdot \sum_k (\alpha_{k,v} \cdot R_{k,v} \cdot f_{k,v} + \alpha_{k,a} \cdot R_{k,a} \cdot f_{k,a} \cdot f_{\text{ком}}) \cdot C_{14\text{C}} / C_{12\text{C}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{инг},14\text{C}} = 6,2 \times 10^{-12}$ Зв/Бк – дозовый коэффициент при ингаляции ^{14}C в форме CO_2 [5]; $U = 8,1 \cdot 10^3$ м³/год – объем вдыхаемого воздуха; индекс v относится к продуктам питания растительного происхождения, индекс a – животного; $\varepsilon_{\text{пищ},14\text{C}} = 5,8 \times 10^{-10}$ Зв/Бк – дозовый коэффициент при пищевом поступлении ^{14}C ; $f_{k,v}$ – доля углерода в k -й растительной продукции, кг С/кг продукции: 0,059 – овощи, 0,046 – корнеплоды и картофель, 0,062 – фрукты, 0,39 зерновые культуры [7]; $f_{k,a}$ – доля углерода в k -й животной продукции, кг С/кг продукции: 0,065 – молоко, 0,2 – мясо [7]; $f_{\text{ком}}$ – доля загрязненных кормов животного.

Для оценки консервативности предположений об условиях облучения, принятых в методиках установления ПДВ, для каждого объекта исследований выполнены расчеты годовой дозы для трех сценариев.

Сценарий 1

Взрослый человек постоянно проживает в критической точке местности и потребляет 100% продуктов пита-

ния, выращенных в этой же точке. Расположение критической точки местности относительно геометрического центра источников выбросов, с учетом размеров санитарно-защитных зон: для Смоленской АЭС – 3 км к востоку, Ростовской – 3 км к востоку, Билибинской – 1,6 км к юго-юго-западу.

Сценарий 2

Аналогично сценарию 1, но учитывается, что часть продуктов питания – местные (выращиваются и производятся в критической точке местности), часть – привозные. Годовое потребление продуктов питания населением в районах расположения АЭС, включая долю продуктов местного производства (далее – локальная доля), определено Федеральным исследовательским центром питания и биотехнологии в 2016 г. как часть работ по подготовке методики разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ АЭС в атмосферный воздух⁴ (табл. 2, 3). Локальная доля для хлеба в методике⁴ не оценена, поэтому в расчетах этот параметр принят равным 0,5 для района расположения Смоленской и Ростовской АЭС и 0 для района расположения Билибинской АЭС.

Годовое потребление продуктов питания взрослым человеком в районе расположения АЭС⁴, кг

Таблица 2

[Table 2]

Annual food consumption by an adult in the nuclear power plant location area⁴, kg]

Продукт [Product]	АЭС, городское/сельское население [NPP, urban/ rural population]		
	Смоленская [Smolensk]	Ростовская [Rostov]	Билибинская [Bilibino]
Молоко [Milk]	292/361	262/245	274/217
Мясо [Meat]	96/87	91/97	102/85
Хлеб [Bread]	82/110	84/106	80/106
Картофель [Potato]	67/90	56/70	62/60
Овощи [Vegetables]	100/84	105/100	82/63
Фрукты [Fruit]	91/83	79/63	77/52

Доля местных продуктов в рационе взрослого человека в районе расположения АЭС⁴, %

Таблица 3

[Table 3]

Percentage of local food products in the adult diet in the nuclear power plant location area⁴, %]

Продукт [Product]	АЭС, городское/сельское население [NPP, urban/ rural population]		
	Смоленская [Smolensk]	Ростовская [Rostov]	Билибинская [Bilibino]
Молоко [Milk]	1/9	1/7	0,4/0
Мясо [Meat]	1/2	0,4/19	0,4/0,8

Продукт [Product]	АЭС, городское/сельское население [NPP, urban/ rural population]		
	Смоленская [Smolensk]	Ростовская [Rostov]	Билибинская [Bilibino]
Картофель [Potato]	24/61	4/33	0/0,8
Овощи [Vegetables]	48/59	44/75	0,8/5
Фрукты [Fruit]	48/70	49/79	1,7/0,8

Сценарий 3

Годовая доза рассчитывается для взрослого человека с учетом реалистичных характеристик его проживания и ведения хозяйственной деятельности (далее – резидент).

Для оценки дозы от выбросов Смоленской АЭС в качестве резидента рассматривается житель г. Десногорска, проживающий в части города с наибольшей расчетной среднегодовой объемной активностью радионуклидов в воздухе (3,5 км к юго-востоку от геометрического центра источников выбросов АЭС) и имеющий дачный участок в местном садовом товариществе (3 км к северо-востоку). Резидент проводит 80% времени в городе, 20% – в доме на дачном участке, где выращивает растительную продукцию для личного потребления. Предполагается, что всю локальную долю потребляемого картофеля, овощей и фруктов резидент получает со своего участка, остальные продукты являются привозными.

Для оценки дозы от выбросов Ростовской АЭС в качестве резидента рассматривается житель ст. Подгоренской – ближайшего населенного пункта, расположенного в 4 км к югу от геометрического центра источника выбросов АЭС. Это сельскохозяйственный регион, поэтому предполагается, что всю локальную долю потребляемой продукции жители ст. Подгоренской производят сами.

Для оценки дозы от выбросов Билибинской АЭС в качестве резидента рассматривается житель г. Билибино, проживающий в части города с наибольшей расчетной среднегодовой объемной активностью радионуклидов в воздухе (3,8 км к юго-западу от геометрического центра источников выбросов АЭС). Все продукты питания в районе расположения Билибинской АЭС считаются привозными.

Результаты и обсуждение

В таблице 4 представлены результаты расчетов годовых доз облучения населения от штатных выбросов Смоленской, Ростовской и Билибинской АЭС, полученные по трем сценариям.

Как видно из таблицы 4, предположения об условиях облучения, принятые в методиках установления ПДВ, существенно влияют на консервативность оценок годовой дозы от выбросов АЭС. Учет только одного фактора (доли потребления продуктов питания местного производства) снижает консервативность расчетов годовой дозы для Смоленской АЭС в 2,4 раза, Ростовской АЭС – в 3,2 раза, Билибинской АЭС – в 74 раза.

Оценки, выполненные наиболее консервативным способом (сценарий 1), оказались выше расчетной годовой дозы при реалистичных характеристиках хозяйственной деятельности (сценарий 3) для Смоленской АЭС в 6,3 раза, Ростовской АЭС – в 8,4 раза, Билибинской АЭС – в 883 раза. Оценки годовой дозы, полученные с учетом локальной доли потребления продуктов питания (сценарий 2), достаточно консервативны по сравнению со сценарием 3: для Смоленской и Ростовской АЭС в 2,6 раза, Билибинской АЭС – в 12 раз.

Результаты расчета годовой дозы от выбросов АЭС очень чувствительны к выбору метода оценки дозы от ^3H и ^{14}C . Например, если для Смоленской АЭС в рамках сценария 2 рассчитать дозу от ^{14}C по формуле (2) вместо (4), то суммарные годовые дозы, вычисленные по сценариям 1 и 2, будут различаться менее чем на 1%. В методике⁴ при наличии региональных данных допускается учет долей потребляемой местной продукции в расчетах годовой дозы от поступления всех радионуклидов с продуктами питания, за исключением ^3H и ^{14}C . На практике

Доза облучения населения от штатных выбросов АЭС, рассчитанная по разным сценариям, 10^{-7} Зв/год

Таблица 4

Radiation dose of the population from regular NPP emissions, calculated for different scenarios, 10^{-7} Sv/year

[Table 4]

АЭС [NPP]	Сценарий 1 [Scenario 1]	Сценарий 2 [Scenario 2]	Сценарий 3 [Scenario 3]
Смоленская [Smolensk]	76,6	32,1	12,2
Ростовская [Rostov]	4,2	1,3	0,5
Билибинская [Bilibino]	88,3	1,2	0,1

это означает, что при установлении нормативов ПДВ АЭС расчеты годовой дозы допускается проводить по сценарию 2, однако вклад в дозу от выбросов ^3H и ^{14}C вместо (3), (4) все равно необходимо вычислять по формулам (1), (2). Такое исключение, по нашему мнению, является необоснованным.

В таблице 5 представлены результаты расчетов вклада в годовую дозу внутреннего и внешнего облучения при штатных выбросах АЭС, полученные для разных сценариев.

Таблица 5 показывает, что предположения, принятые в методиках установления ПДВ, в большей степени влияют на консерватизм оценок дозы внутреннего облучения. Годовая доза внутреннего облучения от выбросов Смоленской АЭС, рассчитанная по наиболее консервативному сценарию, в 17 раз выше, чем по реалистичному, Ростовской АЭС – в 11 раз, Билибинской АЭС – в 8750 раз. При этом расчетная годовая доза внешнего облучения от выбросов Смоленской АЭС по консервативному сценарию всего в 1,1 раза выше, чем по реалистичному, Ростовской АЭС – в 2,3 раза, Билибинской АЭС – в 9 раз, что обусловлено различием среднегодовой объемной активности радионуклидов в воздухе в месте проживания человека относительно критической точки местности.

В таблице 6 представлен относительный вклад ^3H , ^{14}C , ИРГ, суммы радиоактивных аэрозолей и изотопов йода в годовую дозу облучения населения от штатных выбросов АЭС для разных сценариев.

Таблица 6 показывает, что предположения об условиях облучения населения, принятые в методиках установ-

ления ПДВ, могут существенно влиять на расчетные значения относительного вклада радионуклидов в годовую дозу от постоянных выбросов. При оценках наиболее консервативным способом почти 90% дозы для населения от выбросов Смоленской АЭС формирует ^{14}C , тогда как при расчетах по реалистичному сценарию 2/3 годовой дозы создает внешнее облучение от инертных радиоактивных газов (ИРГ). Для штатных выбросов Ростовской АЭС вклад ^3H в годовую дозу при расчетах по реалистичному сценарию снижается с 74 до 44%, вклад ИРГ повышается с 8 до 27%.

Для штатных выбросов Билибинской АЭС относительный вклад радионуклидов в дозу при расчетах по реалистичному сценарию противоположен консервативным оценкам. В рамках консервативного сценария 96% годовой дозы формирует ^{14}C , тогда как при реалистичном его вклад около 2%, а 88% годовой дозы формируют выбросы ИРГ и ^{60}Co .

При оценке полученных результатов необходимо иметь в виду, что даже наиболее консервативный подход приводит к расчетному значению годовой дозы от штатных выбросов АЭС на уровне существенно ниже основного предела дозы для населения 1 мЗв/год. Однако нормативы ПДВ и ДВ рассчитываются не по критерию недопустимости превышения основного предела дозы, а по критерию недопустимости превышения установленной дозовой квоты. В России для выбросов АЭС санитарными правилами⁵ установлена двухуровневая система квот. Значения предельно допустимых выбросов (ПДВ) рассчитываются, исходя из дозовой квоты 50 или 250 мкЗв/

Таблица 5

Вклад внутреннего и внешнего облучения от штатных выбросов АЭС, рассчитанный по разным сценариям, 10^{-7} Зв/год

[Table 5]

Contribution of internal and external radiation from regular NPP emissions, calculated for different scenarios, 10^{-7} Sv/year

АЭС [NPP]	Внутреннее облучение [Internal exposure]			Внешнее облучение [External exposure]		
	Сценарий 1 [Scenario 1]	Сценарий 2 [Scenario 2]	Сценарий 3 [Scenario 3]	Сценарий 1, 2 [Scenario 1, 2]	Сценарий 3 [Scenario 3]	
Смоленская [Smolensk]	67,4	22,9	3,9	9,2	8,3	
Ростовская [Rostov]	3,9	1,0	0,37	0,3	0,13	
Билибинская [Bilibino]	87,5	0,4	0,01	0,8	0,09	

Таблица 6

Относительный вклад компонентов штатных выбросов АЭС в годовую дозу облучения населения, %

[Table 6]

Relative contribution of components from regular NPP emissions to the annual radiation dose of the population, %

АЭС [NPP]	^3H			^{14}C			ИРГ [IRG]			Аэрозоли и йод [Aerosols and iodine]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Смоленская [Smolensk]	0,5	0,2	0,4	87	71	32	12	28	67	0,3	0,5	0,9
Ростовская [Rostov]	74	47	44	17	26	28	7,9	25	27	1	1,7	1,9
Билибинская [Bilibino]	3,2	8,3	11	96	29	1,6	0,5	40	56	0,4	23	31

год, в зависимости от года ввода энергоблока в эксплуатацию. Превышение ПДВ недопустимо в режиме нормальной эксплуатации АЭС и может служить основанием для приостановки эксплуатации АЭС (п. 5.22 СП АС-03⁵).

В соответствии с п. 5.11 СП АС-03⁵ значения допустимых выбросов (ДВ) АЭС рассчитываются, исходя из критерия не превышения дозы облучения населения 10 мкЗв/год. Если фактический выброс АЭС превышает ДВ, но ниже ПДВ, то «радиационное воздействие АЭС на население и окружающую среду не соответствует принципу оптимизации, что свидетельствует о нарушении культуры производства и подлежит анализу с целью устранения выявленного превышения ДВ» (п. 5.21 СП АС-03⁵).

Как видно из таблицы 4, годовая доза от выбросов АЭС с реакторами РБМК-1000 и ЭГП-6, вычисленная с учетом вклада ³H и ¹⁴C наиболее консервативным способом, составляет 80–90% от дозовой квоты, установленной для расчета нормативов ДВ АЭС. Таким образом, избыточная консервативность оценок дозы снижает «запас» между фактическими и допустимыми выбросами АЭС, необходимый с учетом того, что годовые выбросы радионуклидов могут варьировать в зависимости от выполняемых плановых работ.

Можно сделать вывод о желательности учета региональных значений доли продуктов местного производства в рационе населения при разработке нормативов ПДВ радиоактивных веществ АЭС и других объектов использования атомной энергии. Это позволит обоснованно снизить консерватизм расчетов годовой дозы от постоянных выбросов, а также избежать искажений при оценке относительного вклада радионуклидов в дозу и определении перечня радиоактивных веществ, подлежащих регламентному контролю.

Заключение

Предположения об условиях облучения населения, принятые в методиках установления ПДВ, существенно влияют на консервативность оценки годовой дозы от постоянных выбросов. При учете этих предположений расчетная годовая доза от выбросов АЭС для взрослого

населения выше оцененной для реалистичных условий хозяйственной деятельности в 6,3–883 раза. Наибольшая степень консервативности характерна для оценок доз внутреннего облучения от продуктов питания и связана с предположением, что вся сельскохозяйственная продукция производится в критической точке местности и потребляется местными жителями. Расчетное значение годовой дозы от выбросов АЭС сильно зависит от выбора метода определения дозы от ³H и ¹⁴C. Консервативность оценки годовой дозы при разработке нормативов ПДВ может быть обоснованно снижена путем учета доли местных продуктов питания в рационе населения, особенно для тех регионов России, где потребляется преимущественно привозная продукция.

Литература

1. Vasilyev A., Ekinin A., Vasyanovich M., et al. Conservative tritium exposure assessment in the atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP // *Fusion Science and Technology*. 2020. Vol. 76, № 4. P. 526–535.
2. Vasyanovich M., Vasilyev A., Ekinin A., et al. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases // *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51, № 4. P. 1176–1179.
3. Vasyanovich M.E., Ekinin A.A., Vasilyev A.V., et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 208–209. P. 106006.
4. Крышев А.И., Крышев И.И., Васянович М.Е., и др. Оценка дозы облучения населения от выброса ¹⁴C АЭС с РБМК-1000 и ЭГП-6 // *Атомная энергия*. 2020. Т. 128, № 1. С. 46–52.
5. Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP. 2012. Vol. 41, suppl. 1. P. 1–130.
6. Tritium and the environment. IRSN Radionuclide Fact Sheet. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. France, 2010. 26 p.
7. Carbon-14 and the environment. IRSN Radionuclide Fact Sheet. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. France, 2010. 19 p.

Поступила: 18.08.2020 г.

Крышев Александр Иванович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией эколого-геофизического моделирования и анализа риска Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия. **Адрес для переписки:** 249038, Калужская область, г. Обнинск, ул. Победы, 4; E-mail: ecomod@yandex.ru

Бурякова Анна Александровна – младший научный сотрудник лаборатории эколого-геофизического моделирования и анализа риска Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск, Россия

Васянович Максим Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник радиационной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия

Екидин Алексей Акимович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник радиационной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия

Для цитирования: Крышев А.И., Бурякова А.А., Васянович М.Е., Екидин А.А. Оценка консервативности предположений об условиях облучения населения, принятых при установлении нормативов предельно допустимых выбросов // *Радиационная гигиена*. 2021. Т. 14, № 1. С. 60–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-60-67

Assessment of conservatism of assumptions on the population exposure conditions applied for establishing the permissible atmospheric release levels

Alexander I. Kryshev¹, Anna A. Buryakova¹, Maksim E. Vasyanovich², Aleksey A. Ekinin²

¹ Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet, Obninsk, Russia

² Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

The annual permissible atmospheric release levels of radionuclides are established with the condition that the population annual dose should not exceed the dose quota. Two conservative assumptions on the population exposure are applied in handbooks for calculation of the permissible release levels: a person can reside in any point outside the sanitary protection zone of nuclear facility; all exposure pathways, including food consumption, are determined by the place of residence. Calculation of the annual dose for adults living near the Smolensk, Rostov and Bilibino NPP was performed for three scenarios to evaluate the degree of conservatism of these assumptions. Scenario 1 assumed permanent residence in a critical point of the area with production of all food in this point and consumption only local food by the population. Scenario 2 assumed that a certain part of food is imported. In scenario 3 dose assessment was made for a permanent resident of the closest settlement near NPP, taking into consideration realistic characteristics of the exposure conditions. Atmospheric release levels of radionuclides assessed during the radiation and technical surveys of the NPP's emission sources in 2017–2019 were used as the initial data. It is shown that the assumptions on the conditions of population exposure significantly affect the conservatism of the annual dose assessment. The calculated annual dose for the most conservative scenario is higher than for realistic scenario by 6,3 times (for the Smolensk NPP), 8,4 times (Rostov NPP), 883 times (Bilibino NPP). The highest degree of conservatism was shown for the internal radiation dose estimates. The results of calculation of the annual dose from NPP's emissions strongly depend on the method for dose assessment from releases of ³H and ¹⁴C. Use of the regional values of consumption of locally produced food allows reasonable reducing the conservatism of the annual dose estimates from the NPP's permanent radionuclide releases.

Key words: dose, release, population, food, tritium, carbon-14, nuclear power plant.

References

1. Vasilyev A, Ekinin A, Vasyanovich M, Pyshkina M, Antonov K, Antushevsky A, et al. Conservative tritium exposure assessment in the atmosphere from the spray ponds of the Balakovo NPP. *Fusion Science and Technology*. 2020(4): 526-535.
2. Vasyanovich M, Vasilyev A, Ekinin A, Kapustin I, Kryshev A. Special monitoring results for determination of radionuclide composition of Russian NPP atmospheric releases. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019;(4): 1176-1179.
3. Vasyanovich ME, Ekinin AA, Vasilyev AV, Kryshev AI, Sazykina TG, Kosykh IV, et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;208-209: 106006.
4. Kryshev AI, Kryshev II, Vasyanovich ME, Ekinin AA, Kapustin IA, Murashova EL. Assessment of doses to population caused by ¹⁴C releases from the Nuclear Power Plants with RBMK-1000 and EGP-6. *Atomnaya Energiya = Atomic Energy*. 2020;128(1): 46-52 (In Russian).
5. Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP; 2012. Vol. 41, suppl. 1, P. 1–130.
6. Tritium and the environment. IRSN Radionuclide Fact Sheet. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. France; 2010. 26 p.
7. Carbon-14 and the environment. IRSN Radionuclide Fact Sheet. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. France; 2010. 19 p.

Received: 18 August, 2020

For correspondence: Alexander I. Kryshev – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Ecological and Geophysical Modeling and Risk Analysis of the Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet. (Pobedy str., 4, Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia; E-mail: ecomod@yandex.ru)

Anna A. Buryakova – Researcher of the Laboratory of Ecological and Geophysical Modeling and Risk Analysis of the Research and Production Association «Typhoon», Roshydromet, Obninsk, Russia.

Maksim E. Vasyanovich – PhD in Physics and Mathematics, Researcher of Radiation Laboratory of the Institute of Industrial Ecology Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russia

Aleksey A. Ekinin – PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher of Radiation Laboratory of the Institute of Industrial Ecology Ural Branch of Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russia

For citation: Kryshev A.I., Buryakova A.A., Vasyanovich M.E., Ekinin A.A. Assessment of conservatism of assumptions on the population exposure conditions applied for establishing the permissible atmospheric release levels. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 1. P. 60-67. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-60-67

Alexander I. Kryshev

Research and Production Association «Typhoon»

Address for correspondence: Pobedy str., 4, Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia; E-mail: ecomod@yandex.ru

Влияние вида солеобразующих кислот на противолучевую активность аналогов T1023 – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевины

М.В. Филимонова, А.С. Сабурова, Л.И. Шевченко, В.М. Макачук, А.А. Лычагин, А.С. Филимонов

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

Обширный арсенал противолучевых средств, имеющийся на сегодняшний день в мире, по мнению ведущих специалистов, далеко не в полной мере отвечает современным практическим потребностям как в области обеспечения противолучевой защиты, так и в области профилактики и лечения осложнений лучевой терапии. Целью работы являлось экспериментальное исследование влияния вида солеобразующих кислот на противолучевую активность химических аналогов ингибитора NOS T1023. Химическая часть работы включала методы химического синтеза, физико-химический и элементный анализ, фармакологическая часть – оценку острой токсичности экспресс-методом по В.Б. Прозоровскому и изучение противолучевой активности по методу Тилла и МакКаллока по числу эндогенных гемопоэтических селезеночных колоний на 8-е сутки после тотального гамма-облучения в дозе 6 Гр в 6 независимых экспериментах. В результате направленного химического синтеза наработано, идентифицировано и охарактеризовано 6 новых соединений, аналогов T1023 – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевины. Результаты изучения безопасности и противолучевой активности синтезированных соединений свидетельствуют, что изменение солеобразующей кислоты значительно не изменяет токсические характеристики: все они относятся к 3 классу токсичности и опасности. Вместе с тем, замена солеобразующей кислоты существенно влияла на характер и выраженность противолучевого действия. Выделено два перспективных соединения, противолучевая эффективность которых сопоставима либо превосходит исходное соединение T1023 в области меньших, относительно безопасных доз. Полученные данные свидетельствуют о перспективности дальнейшей разработки ингибиторов NOS – производных изотиомочевины в качестве противолучевых средств.

Ключевые слова: противолучевая эффективность, острая токсичность, гемопоэтические селезеночные колонии, ингибиторы синтаз оксида азота.

Введение

В связи с развитием атомной энергетики, широким применением радиологических методов лечения и диагностики, распространением ядерного оружия и возрастающими угрозами терроризма проблемы обеспечения радиационной безопасности и эффективной противолучевой защиты вошли в число приоритетных для всего мирового сообщества [1–3]. Важную роль в решении этой комплексной проблемы играет разработка эффективных и безопасных фармакологических противолучевых средств.

На сегодняшний день известно значительное число соединений различных химических классов, снижающих при профилактическом применении частоту и тяжесть острых радиационных поражений [1, 4]. Но практически все разрешенные к медицинскому применению противолучевые средства имеют серьезные побочные эффекты и часто эффективны только в субтоксических для человека дозах, что существенно ограничивает их широкое приме-

нение и стимулирует поиск новых более безопасных соединений [5]. Ориентиром в поиске новых противолучевых средств служит так называемый «идеальный радиопротектор», который должен отвечать перечню требований: защищать организм при остром и хроническом лучевом воздействии; быть высокоэффективным; приемлемым для перорального введения; химически стабильным; не иметь выраженных токсических эффектов. [6, 7].

Обширный объем экспериментальных данных о биологической роли оксида азота (NO) в различных физиологических и патологических процессах стал основанием для развития новых подходов к созданию лекарственных средств. Так, показано, что ингибиторы NO синтаз (NOS) в той или иной степени способны сдерживать рост опухоли и процессы метастазирования; а кроме того, повышать радиорезистентность тканей и организма в целом [8–10].

Наиболее эффективный на сегодня ингибитор NOS – вазоактивный радиопротектор T1023, разработанный в лаборатории радиационной фармаколо-

Филимонова Марина Владимировна

Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации

Адрес для переписки: 249036, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: mari_fil@mail.ru

гии Медицинского радиологического научного центра (МРНЦ) им. А.Ф. Цыба, обеспечивает при относительно безопасных дозах (1/5–1/4 ЛД₅₀) выраженную профилактику костномозговой и энтеральной форм острой лучевой болезни, не уступая в эффективности известным противолучевым средствам различных классов [11, 12].

Вместе с тем, мировой опыт разработки лекарственных средств свидетельствует, что и безопасность, и специфическая фармакологическая активность соединения могут определяться не только химическим строением его каркаса, но и структурными особенностями всей молекулы, в частности – видом заместителей и солеобразующих кислот или оснований, входящих в его состав. Влияние таких структурных факторов на различные виды фармакологической активности ингибиторов NOS в настоящее время остается неисследованным. В этой связи для разработки оптимального прототипа лекарственного средства на основе N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевина нами проведено сравнительное исследование безопасности и противолучевой эффективности его солей.

Цель исследования – экспериментальное изучение влияния вида солеобразующих кислот на противолучевую активность химических аналогов ингибитора NOS – соединения T1023.

Задачи исследования

1. Направленный синтез химических аналогов соединения T1023 – его солей с различными кислотами.
2. Сравнительное изучение острой токсичности и противолучевой активности новых синтезированных производных T1023 – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевина.

Материалы и методы

Исследуемые соединения

Для проведения исследований в лаборатории радиационной фармакологии МРНЦ им. А.Ф. Цыба были разработаны методы синтеза и осуществлена разработка исходного соединения T1023 и его производных – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевина с хлористоводородной (T1080), йодистоводородной (T1091), фосфорной (T1082), фосфористой (T1095), оксиэтилендифосфоновой (T1096), малеиновой (T1100) кислотами. Структуру новых соединений подтверждали методами физико-химического и элементного анализа. Контроль чистоты соединений осуществляли методом тонкослойной хроматографии на пластинках Silufol UV-254 (Чехия) в системе бензол-этанол-триэтиламин 9:1:0,1. Спектры ПМР получены в DMSO-d₆ на спектрометре DRX-500 (Bruker, Германия) при частоте 500 Гц с тетраметилсиланом в качестве стандарта. Температуру плавления определяли на приборе ПТП (Лаборприбор, РФ). Для всех экспериментальных исследований *in vivo* соединения готовили *ex tempore* в асептических условиях. В качестве растворителя использовали 0,9% раствор натрия хлорида (Дальхимфарм, РФ).

Лабораторные животные

Исследования выполнены на 56 аутбредных мышам-самцах и 1394 мышам-самцах линии F1(CBAxH57Bl/6j)

в возрасте 2–2,5 месяцев. Животные содержались в виварии МРНЦ им. А.Ф. Цыба в клетках Т-4 в условиях естественного освещения помещения при температуре 18–20°C и относительной влажности воздуха 40–70% на подстилке из простерилизованных древесных стружек, со свободным доступом к питьевой воде и брикетированному корму.

Острая токсичность

Оценку острой токсичности новых соединений проводили в соответствии с Руководством по проведению доклинических исследований лекарственных средств экспресс-методом по В.Б. Прозоровскому [13, 14]. Рабочие растворы изготавливали перед введением на основе 0,9% асептического раствора натрия хлорида (Дальхимфарм, РФ). Исследуемые вещества вводили мышам внутрибрюшинно однократно (4 группы по два наблюдения в каждой) в дозах 250–631 мг/кг. Наблюдение за подопытными животными осуществляли в течение 14 суток, регистрировали данные об общем состоянии, динамике веса и гибели.

Противолучевая эффективность

Противолучевую активность полученных соединений изучали по методу Тилла и МакКаллока по числу эндогенных гемопоэтических селезеночных колоний (ГСК) на 8-е сутки после лучевого воздействия [15]. Противолучевая активность каждой изучаемой соли была проведена в отдельном независимом эксперименте по отдельной схеме. В каждом опыте мышей распределяли на 9 экспериментальных групп: одну контрольную и 8 опытных (по 15–20 особей в каждой). Все животные получали воздействие γ -излучения в дозе 6 Гр на установке «Рокус» (РФ) с источником Co⁶⁰ при мощности дозы 0,45–0,50 Гр/мин. При этом животным опытных групп за 30 минут до облучения однократно, внутрибрюшинно вводили исследуемое соединение и соединение сравнения (T1023) в эквивалентных дозах: 93, 149, 279 и 483 мкмоль/л. На 8-е сутки всех животных выводили из опыта путём цервикальной дислокации под эфирным наркозом, выделяли селезенки, фиксировали их 24 ч в кислой жидкости Буэна и далее при 5-кратном увеличении (лупа Levenhuk Zeno 500, США) проводили подсчёт числа гемопоэтических колоний на их поверхности.

При анализе для корректного сопоставления данных независимых экспериментов все количественные показатели по каждому опыту нормировались на среднее число эндоколоний контрольной группы (не получавшей введение каких-либо веществ) для данного опыта. То есть после такой нормировки число эндоколоний в контрольной группе каждого опыта становилось равным $1,0 \pm SD$, и эффекты изучаемого соединения и соединения-сравнения в каждом опыте сопоставлялись с этим уровнем и между собой при эквивалентных дозах.

Статистическая обработка

Выраженность противолучевых эффектов соединений и их сопоставление между собой проводили при множественном межгрупповом сравнении числа эндоколоний путём дисперсионного анализа рангов Краскела – Уоллиса с применением Q-критерия Данна [16].

Результаты и обсуждение

Перед началом практических фармакологических исследований нами был выполнен поиск и химический синтез в обширном ряду химических аналогов соединения T1023 и его солей с различными кислотами с целью выявления химически стабильных соединений с более выраженными противолучевыми свойствами.

Для фармакологических исследований было синтезировано, выделено, идентифицировано и охарактеризовано 6 новых соединений. Направленный синтез включал либо реакцию алкилирования подходящим галоидным алкилом с образованием нужной соли либо использование метода выделения свободного основания из соли исходного соединения T1023 и последующего взаимодействия его с фармакологически инертными неорганическими и органическими кислотами. Чистота полученных соединений была подтверждена данными элементного анализа и тонкослойной хроматографии.

Для оценки безопасности новых синтезированных соединений определены показатели средней летальной дозы (LD_{50}) экспресс-методом по В.Б. Прозоровскому. Наблюдение за подопытными животными осуществляли непрерывно в течение первых 5 ч после инъекции и далее – ежедневно в течение 2 недель с регистрацией гибели и динамики массы тела.

В диапазоне исследованных доз все новые синтезированные соединения вызывали развитие острой интоксикации, проявления которой были аналогичны действию токсических доз исходного соединения T1023. В картине интоксикации наблюдались гиперкинезы различной степени выраженности: развивались адинамия, тремор, инициация сосудов хвоста и ушных раковин, обильный диурез, дефекация, тенезмы. Ухудшение состояния сопровождалось урежением дыхания, развитием приступов клонических судорог, на пике которых регистрировалась

гибель. При вскрытии павших животных видимых изменений внутренних органов отмечено не было.

На основании данных о выживаемости животных определены показатели LD_{50} , представленные в таблице 1.

Таблица 1

Показатели «острой» токсичности синтезированных соединений по В.Б. Прозоровскому для аутбредных мышей

[Table 1]

Indicators of acute toxicity of synthesized compounds for outbred mice according to V. B. Prozorovsky method

Соединения [Compounds]	LD_{50} (95% доверительный интервал), мг/кг [LD_{50} (95% confidence interval), mg/kg]
T1023	410 (388–432)
T1080	325 (219–455)
T1082	410 (268–552)
T1091	460 (153–861)
T1095	355 (249–461)
T1096	447 (312–596)
T1100	410 (316–552)

Сопоставление полученных показателей LD_{50} с показателями острой токсичности для T1023, полученными нами ранее, свидетельствует, что все синтезированные соединения умеренно токсичны – замена солеобразующей кислоты значимо не изменяет токсические характеристики [17].

Радиозащитную эффективность синтезированных производных также сопоставляли с исходным соединением T1023. Обобщенные результаты 6 независимых экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Скрининг противолучевой активности новых синтезированных соединений в сравнении с исходным T1023

[Table 2]

Screening of the radioprotective activity of the new synthesized compounds in comparison with the original compound T1023

Солеобразующая кислота [Salifiable acid]	Соединения [Compounds]	Число эндоколоний, отн. ед. ¹ ($M \pm SD$) [Numbers of endocolonies, relative units ¹ ($M \pm SD$)]			
		93 мкмоль/л [93 mcmmole/l]	149 мкмоль/л [149 mcmmole/l]	279 мкмоль/л [279 mcmmole/l]	483 мкмоль/л [483 mcmmole/l]
HI pK=-11,0	T1091	1,2 ± 0,5#	1,6 ± 0,9	1,3 ± 0,5#	2,1 ± 0,6*
	T1023 ²	1,7 ± 0,6*	1,9 ± 0,9*	2,1 ± 0,7*	1,8 ± 0,8*
HCl pK=-7,0	T1080	1,0 ± 0,6#	1,2 ± 0,6#	1,6 ± 1,0#	1,4 ± 0,5
	T1023 ²	1,6 ± 0,6	1,7 ± 0,6*	2,3 ± 1,0*	1,7 ± 0,7*
C ₂ H ₅ (OH)(H ₂ PO ₃) ₂ pK=1,7	T1096	1,2 ± 0,5#	1,5 ± 0,5	1,7 ± 0,6#	1,3 ± 0,5#
	T1023 ²	1,5 ± 0,5	1,6 ± 0,5*	2,1 ± 0,4*	1,7 ± 0,7*
H ₃ PO ₃ pK=1,8	T1095	2,2 ± 1,3*	3,0 ± 1,2*	3,3 ± 1,9*	2,7 ± 1,7*
	T1023 ²	2,5 ± 1,4*	2,6 ± 1,3*	3,7 ± 1,8*	3,4 ± 2,3*

Солеобразующая кислота [Salifiable acid]	Соединения [Compounds]	Число эндоколоний, отн. ед. ¹ (M ± SD) [Numbers of endocolonies, relative units ¹ (M ± SD)]			
		93 мкмоль/л [93 mcmmole/l]	149 мкмоль/л [149 mcmmole/l]	279 мкмоль/л [279 mcmmole/l]	483 мкмоль/л [483 mcmmole/l]
H ₄ C ₄ O ₄ pK=1,9	T1100	1,4 ± 1,0	1,6 ± 0,8	1,7 ± 0,8*#	1,5 ± 0,6
	T1023 ²	1,5 ± 0,6	1,8 ± 0,7*	2,5 ± 1,0*	1,8 ± 1,1
H ₃ PO ₄ pK=2,1	T1082	2,8 ± 1,6* #	3,1 ± 1,6*	3,7 ± 1,7*	3,0 ± 2,1*
	T1023 ²	1,9 ± 1,0	3,1 ± 1,4*	3,2 ± 1,3*	2,8 ± 1,7*

Примечания: 1 – данные нормированы на среднее число селезеночных эндоколоний в контроле облучения каждого опыта, после такой нормировки число эндоколоний в контрольной группе каждого опыта равно 1,0 ± SD; 2 – в каждом опыте соединение T1023 использовано в качестве соединения сравнения; символы *, # – статистически достоверное различие (p < 0,05) по Q-критерию Данна с группой контроля облучения (*) и с группой, получавшей эквимоллярную дозу T1023 (#) [Notes: 1 – data are normalized to the average number of splenic endocolonies in the irradiation control for each experiment, and after such normalization, the number of endocolonies in the control of each experiment is 1.0 ± SD; 2- in each experiment compound T1023 was used as a reference compound; symbols *, # – statistically significant difference (p < 0.05) according to Dunn's test with control group].

Если токсичность новых соединений существенно не отличалась от исходного, то их противолучевая эффективность различалась значительно.

Введение в исходную химическую структуру T1023 йодистоводородной, хлористоводородной, оксиэтилидендифосфоновой и малеиновой кислот ослабляло противолучевую активность. Если исходное соединение T1023 проявляло выраженное противолучевое действие при всех использованных дозах, то противолучевая активность соединений T1080, T1091, T1096 и T1100 реализовывалась только при использовании их в высоких дозах (483 мкмоль/л) – выживаемость ГСК повышалась максимум в 2,1 раза в сравнении с облученным контролем.

Наличие в химической структуре фосфористой кислоты не ослабляло противолучевую активность. Соединение T1095 при применении во всех использованных дозах оказывало значимое противолучевое действие, не уступавшее в эффективности исходному T1023. Оба изучаемых соединения оказывали выраженное, равное по эффективности противолучевое действие при применении в дозах 93 мкмоль/л, увеличивая выживаемость ГСК в 2,2–2,5 раза. С увеличением доз до 149 мкмоль/л выживаемость ГСК повышалась в 2,6–3,0 раза. Наиболее выраженное противолучевое действие обоих соединений реализовывалось при использовании в дозах 279 мкмоль/л – в этом случае выживаемость ГСК увеличивалась в 3,3–3,7 раза. Но дальнейшее повышение дозы до 483 мкмоль/л вызывало снижение противолучевой активности.

Введение в химическую структуру фосфорной кислоты не только не ослабляло, но и увеличивало противолучевую активность. Соединение T1023 и его производное – соединение T1082 реализовали наиболее выраженное, равное по эффективности противолучевое действие при дозах, равных 279 мкмоль/л, которое в этих опытах повышало выживаемость ГСК в 3,2–3,7 раза. Снижение доз соединений до 149 мкмоль/л умеренно ослабляло их противолучевое действие, но, в целом, их противолучевая эффективность также оставалась высокой и равной – выживаемость ГСК повышалась в 3,1 раза. Вместе с тем, снижение доз соединений до 93 мкмоль/л сопро-

вождалось качественно различной противолучевой активностью T1023 и T1082 (рис.). Если соединение T1023 в этом эксперименте, как и в предыдущих повторностях, при такой дозе не оказывало значимого противолучевого действия, то противолучевая активность T1082 при такой дозе была достоверно более выраженной и сохранялась на высоком, статистически значимом уровне – выживаемость ГСК повышалась в 2,8 раза.

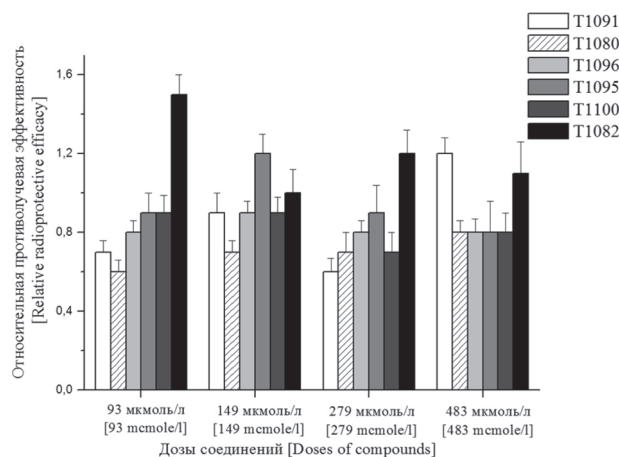


Рис. Относительная противолучевая эффективность исследованных соединений в сравнении с T1023 при различных эквимоллярных дозах. Разброс в точках соответствует ±SME.

[Fig. Relative radioprotective efficacy of the studied compounds in comparison with T1023 at different equimolar doses. The scatter in points corresponds to ±SME]

Таким образом, нами были разработаны методы синтеза и осуществлена наработка производных соединения T1023 – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевин с хлористоводородной (T1080), йодистоводородной (T1091), фосфорной (T1082), фосфористой (T1095), оксиэтилидендифосфоновой (T1096), малеиновой (T1100) кислотами.

По результатам скрининга противолучевой активности новых синтезированных производных T1023 отобрано два соединения, противолучевая эффективность которых сопоставима (T1095) либо превосходит (T1082) исходное соединение в области меньших, относительно безопасных доз.

Заключение

Анализ современного состояния исследований в области противолучевых средств свидетельствует о том, что как в России, так и за рубежом проблема защиты населения от радиационного воздействия остаётся нерешённой. В настоящее время к медицинскому применению на территории Российской Федерации допущены цистамин, мексамин, Б-190 (индралин); амифостин (этиол, WR-2721) является основным противолучевым средством, одобренным в США и Западной Европе [1]. Однако данные препараты не в полной мере отвечают современным требованиям по эффективности и переносимости.

Использование ингибиторов NOS в качестве противолучевых средств может стать перспективным решением сложившейся проблемы. Результаты проведённого скрининга свидетельствуют, что соединение T1023 и его производные – соли N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевина оказывают выраженное противолучевое действие при их применении в относительно безопасных малотоксичных дозах, обеспечивая существенно большую терапевтическую (радиозащитную) широту в сравнении с известными радиозащитными средствами. Дальнейшая экспериментальная работа в этой области может послужить основанием к проведению доклинических исследований полученных соединений в качестве инновационных отечественных противолучевых лекарственных средств.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-415-40000р_а.

Литература

1. Grebenyuk A.N., Gladkikh V.D. Modern condition and prospects for the development of medicines towards prevention and early treatment of radiation damage // *Biology bulletin*. 2019. Vol. 46, No 11. P. 1540-1555.
2. Рождественский Л.М. Проблемные вопросы разработки противолучевых средств // *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2019. Т.59, № 2. С. 117-126.
3. Singh V.K., Newman V.L., Romaine P.L., et al. Radiation countermeasure agents: an update (2011-2014) // *Expert Opin Ther Pat*. 2014. Vol. 24, No 11. P. 1229-1255.
4. Singh V.K., Seed T.M., Olabisi A.O. Drug discovery strategies for acute radiation syndrome // *Expert Opin Drug Discov*. 2019. Vol. 14, No 7. P. 701-715.
5. Рождественский Л.М. Актуальные вопросы поиска и исследования противолучевых средств // *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2013. Т. 53, № 5. С. 513-520.
6. Гудков С.В., Попова Н.Р., Брусков В.И. Радиозащитные вещества: история, тенденции и перспективы // *Биофизика*. 2015. Т. 60, № 4. С. 801-811.
7. Филимонова М.В., Филимонов А.С. Современные проблемы и перспективы разработки и внедрения отечественных противолучевых лекарственных средств // *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2019. Т. 59, № 2. С. 127-131.
8. Vítěček J., Lojek A., Valacchi G., et al. Arginin-based inhibitors of nitric oxide synthase: therapeutic potential and challenges // *Mediators Inflamm*. 2012. 2012: Art.ID: 318087.
9. Филимонова М.В., Проскурников С.Я., Шевченко Л.И., и др. Радиозащитные свойства производных изотиомочевина с NO-ингибирующим механизмом действия // *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2012. Т. 52, № 6. С. 593-601.
10. Minhas R., Bansal Y., Bansal G. Inducible nitric oxide synthase inhibitors: A comprehensive update // *Medicinal Research Reviews*. 2020. Vol. 40, No 3. P. 823-855.
11. Филимонова М.В., Шевченко Л.И., Трофимова Т.П., и др. К вопросу о механизме радиозащитного действия ингибиторов NO-синтаз // *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2014. Т. 54, № 5. С. 500-506.
12. Филимонова М.В., Шевченко Л.И., Макачук В.М. и др. Радиозащитные свойства ингибитора NO-синтаз T1023. I. Показатели противолучевой активности и взаимодействие с другими радиопротекторами // *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2015. Т. 55, № 3. С. 250-259.
13. Миронов А.Н., Бунятян Н.Д., Васильев А.Н., и др. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. М.: Гриф и К, 2012. Т. 1. 944 с.
14. Прозоровский В.Б., Прозоровская М.П., Демченко В.М. Экспресс-метод определения средней эффективной дозы и ее ошибки // *Фармакол. и токсикол*. 1978. Т. 41, № 4. С. 497-502.
15. Till J.E., McCulloch E.A. A direct measurement of the radiation sensitivity of normal mouse bone marrow cells // *Radiat. Res*. 2012. Vol. 178, No 2: AV3-7.
16. Гланц С. Медико-биологическая статистика. М.: Практика, 1998. 462 с.
17. Березовская И.В. Классификация химических веществ по параметрам острой токсичности при парентеральных способах введения // *Химико-фармацевтический журнал*. 2003. Т. 37, № 3. С. 32-34.

Поступила: 11.09.2020 г.

Филимонова Марина Владимировна – доктор биологических наук, заведующая лабораторией, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 249036, Россия, Калужская область, г. Обнинск, ул. Королёва, д. 4; E-mail: mari_fil@mail.ru

Сабурова Алина Сергеевна – научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

Шевченко Людмила Ивановна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

Макарчук Виктория Михайловна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

Лычагин Анатолий Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

Филимонов Александр Сергеевич – научный сотрудник, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Россия

Для цитирования: Филимонова М.В., Сабурова А.С., Шевченко Л.И., Макарчук В.М., Лычагин А.А., Филимонов А.С. Влияние вида солеобразующих кислот на противолучевую активность аналогов T1023 – солей N-изобутаноил-S-изопропилизотиомочевины // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 68-74. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-68-74

Influence of the type of salt-forming acids on the antiradiation activity of T1023 analogs – salts of N-isobutanoyl-S-isopropylisothiurea

Marina V. Filimonova, Alina S. Saburova, Lyudmila I. Shevchenko, Victoria M. Makarchuk, Anatoly A. Lychagin, Alexander S. Filimonov

A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

According to leading experts, the vast arsenal of radioprotective agents available in the world today does not fully meet modern practical needs, both in the field of radiation protection, and in the prevention and treatment of complications of radiotherapy. The purpose of the study was to evaluate the effect of the salt-forming acids type on the radioprotective activity of NOS inhibitor T1023. The chemical part of this study included methods of chemical synthesis, physicochemical and elemental analysis. Pharmacological part – assessment of acute toxicity using V.B. Prozorovsky express method and the study of radioprotective activity using Till and McCulloch method based on the ability of mice hematopoietic cells to form spleen colonies after irradiation. The number of endogenous hematopoietic spleen colonies were assessed on the 8th day after total exposure to gamma-irradiation at a dose of 6 Gy in six independent experiments. As a result of directed chemical synthesis, six new derivatives of T1023 – salts of N-isobutanoyl-S-isopropylisothiurea have been developed, identified and characterized. The results of studying the safety and radioprotective activity of the synthesized compounds showed that changes in the salt-forming acid don't significantly influence the toxicity: all studied compounds are in the 3rd class of toxicity and hazard. At the same time, it was found that the replacement of the salt-forming acid significantly influenced the severity of the radioprotective effect. For some of these compounds radioprotective efficacy is comparable to or exceeds the efficacy of the initial compound T1023. It is important to note that these new compounds were used in lower, more save doses than T1023. The results suggest promising further development of NOS inhibitors – isothiurea derivatives as radioprotective agents.

Key words: radioprotective efficacy, acute toxicity, hematopoietic splenic colonies, NO synthase inhibitors.

References

1. Grebenyuk AN, Gladkikh VD. Modern condition and prospects for the development of medicines towards prevention and early treatment of radiation damage. *Biology bulletin*. 2019;46(11): 1540-1555.
2. Rozhdestvensky LM. Challenges of development of radiation countermeasures. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2019;59(2): 117-126. (In Russian).
3. Singh VK, Newman VL, Romaine PL, Wise AY, Seed TM. Radiation countermeasure agents: an update (2011-2014). *Expert Opinion on Therapeutic Patents*. 2014;24(11): 1229-1255.
4. Singh VK, Seed TM, Olabisi AO. Drug discovery strategies for acute radiation syndrome. *Expert Opinion on Drug Discovery*. 2019;14(7): 701-715.
5. Rozhdestvensky LM. Actual problems of searching and studying radiation countermeasures. *Radiatsionnaya bi-*

Marina V. Filimonova

A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation

Address for correspondence: Koroleva str., 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: mari_fil@mail.ru

- ologiya. *Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2013;53(5): 513-520. (In Russian).
6. Gudkov SV, Popova NR, Bruskov VI. Radioprotectors: History, Trends and Prospects. *Biofizika = Biophysics*. 2015;60(4): 801-811. (In Russian).
7. Filimonova MV, Filimonov AS. Contemporary problems and perspectives of development and implementation of domestic radioprotective drugs. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2019;59(2): 127-131. (In Russian).
8. Viteček J, Lojek A, Valacchi G, Kubala L. Arginine-Based Inhibitors of Nitric Oxide Synthase: Therapeutic Potential and Challenges. *Mediators of Inflammation*. 2012. 2012: Art.ID: 318087.
9. Filimonova MV, Proskuryakov SI, Shevchenko LI, Shevchuk AS, Lushnikova GA, Makarchuk VM, et al. Radioprotective properties of isothiourea derivatives with NO-inhibitory mechanism of action. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2012;52(6): 593-601. (In Russian).
10. Minhas R, Bansal Y, Bansal G. Inducible nitric oxide synthase inhibitors: A comprehensive update. *Medicinal Research Reviews*. 2020;40(3): 823-855.
11. 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).
12. Filimonova MV, Shevchenko LI, Makarchuk VM, Chesnakova EA, Izmaytyeva 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).
13. Mironov AN, Bunyatyan ND, Vasilyev AN, Verstakova OL, Zhuravleva MV. Guidelines of preclinical trials of drugs. Moscow; 2012. Vol. 1. 944 p. (In Russian).
14. Prozorovsky VB, Prozorovskaya MP, Demchenko VM. Express method for determining the average effective dose and its error. *Farmakologiya i toksikologiya = Pharmacology and toxicology*. 1978;41(4): 497-502. (In Russian).
15. Till JE, McCulloch EA. A direct measurement of the radiation sensitivity of normal mouse bone marrow cells. *Radiation Research*. 2012;178(2): AV3-7.
16. Glantz S. Primer of biostatistics. Moscow, 1998. 462 p. (In Russian).
17. Berezovskaya IV. Classification of substances with respect to acute toxicity for parenteral administration. *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2003;37(3): 139-141.

Received: September 11, 2020

For correspondence: Marina V. Filimonova – Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (Koroleva str., 4, Obninsk, 249036, Kaluga region, Russia; E-mail: mari_fil@mail.ru)

Alina S. Saburova – Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

Lyudmila I. Shevchenko – Candidate of Chemistry Sciences, Leading Research, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

Victoria M. Makarchuk – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

Anatoly A. Lychagin – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

Alexander S. Filimonov – Researcher, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

For citation: Filimonova M.V., Saburova A.S., Shevchenko L.I., Makarchuk V.M., Lychagin A.A., Filimonov A.S. Influence of the type of salt-forming acids on the antiradiation activity of T1023 analogs – salts of N-isobutanoyl-S-isopropylisothiourea. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14 No. 1. P. 68-74. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-68-74

Некоторые аспекты радиационной защиты в отделениях радионуклидной терапии

В.Ю. Голиков¹, Л.А. Чипига^{1,2}, А.В. Водоватов^{1,3}, М.Я. Смолярчук⁴

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

В статье представлены данные, позволяющие рассчитать для спектров гамма-излучения радионуклидов ^{131}I и ^{177}Lu кратности ослабления в свинце, вольфраме и бетоне различной толщины или толщину защиты из этих материалов при заданной кратности ослабления. С использованием этих данных была рассчитана эффективность защиты вспомогательного оборудования (переносные контейнеры, экранированные шприцы и др.) и возможные дозы внешнего облучения медицинского персонала в отделении радионуклидной терапии. Показано, что в производственном процессе существуют кратковременные операции, когда источник излучения (контейнер с капсулой с радиофармацевтическими препаратами, шприц с радиофармацевтическими препаратами), находясь вблизи тела медицинского работника, создает значительную мощность дозы. По этой причине годовая индивидуальная доза внешнего облучения медицинского работника может приближаться или превышать 1/3 от значения предела дозы. Расчет ослабления гамма-излучения ^{131}I стационарной защитой показал, что толщина стен и перекрытий из бетона 200–400 мм будет обеспечивать непревышение проектных значений мощностей доз гамма-излучения в воздухе при годовом обороте активности в отделении радионуклидной терапии $\sim 3,3 \cdot 10^{12}$ Бк.

Ключевые слова: радионуклидная терапия, йод-131, медицинский персонал, защита от гамма-излучения.

Введение

Использование источников ионизирующего излучения для радионуклидной терапии (РНТ) характеризуется МКРЗ как ситуация планового облучения, находящаяся под регулирующим контролем и требующая соответствующего разрешения со стороны регулирующего органа до начала выполнения процедур [1]. При этом облучение каждой из категорий лиц, вовлекаемых в эту сферу деятельности, – пациентов (медицинское облучение), персонала (профессиональное облучение) и населения, – должно регулироваться на основании применения трех основных принципов радиационной защиты: обоснования, оптимизации и ограничения облучения. При проведении процедур РНТ облучение персонала и населения регулируется с использованием всех трех принципов радиационной защиты, в то время как облучение пациентов с помощью только двух (ограничение доз облучения пациентов не применяется) [1, 2, 3].

Снижение доз облучения представителей любой из вышеперечисленных категорий лиц (оптимизация защиты) может быть достигнуто за счет:

- использования соответствующих организационных процедур, по управлению потоками пациентов, персонала, радиофармацевтических препаратов (РФП);
- использования персоналом вспомогательного защитного оборудования;
- рационального размещения помещений различного назначения и проектирования их размеров с целью обеспечения необходимых защитных свойств стационарных конструкций (стен, перекрытий);
- обучения и подготовки персонала требованиям радиологической защиты.

Для лечения различных заболеваний используются многие радионуклиды, однако в этой статье, в основном, рассматривается ^{131}I , поскольку он представляет наибольшую опасность облучения по нескольким причинам:

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

– этот радионуклид давно (около 70 лет) и широко используется в РНТ для лечения различных заболеваний, включая рак [4–6];

– его терапевтическое применение сопровождается использованием высоких вводимых активностей (до 12 ГБк) [7];

– спектр гамма-излучения ^{131}I содержит высокоэнергетическое гамма-излучение, способное подвергать облучению не только самих пациентов, но и персонал и окружающих людей, находящихся в других помещениях, далеко от источника излучения.

В настоящее время перспективным гамма-излучающим радионуклидом в контексте его применения в РНТ является ^{177}Lu (лечение нейроэндокринных опухолей) [8]. Средняя энергия испускаемого им гамма-излучения и, соответственно, проникающая способность ниже, чем у ^{131}I . Пока что опыт использования в медицинской практике ^{177}Lu ограничен. Поэтому целесообразно сравнить радиационную опасность при использовании ^{177}Lu и ^{131}I в РНТ. Другие радионуклиды, такие как «чистые» β -излучатели (например, ^{32}P , ^{89}Sr) или α - β - γ -излучатели (например, ^{223}Ra , ^{225}Ac), обычно используются не так широко, имеют в спектре гамма-излучение с меньшей энергией и выходом фотонов на распад, и их активности, вводимые пациентам, относительно малы. Следовательно, они представляют гораздо меньшую радиационную опасность, чем ^{131}I или ^{177}Lu [9].

Пациентам, проходящим курс РНТ с использованием ^{131}I , может потребоваться госпитализация после введения активности до достижения ее остаточного значения в теле пациента в соответствии с национальными нормами и правилами выписки пациентов¹. При госпитализации пациентов возникают дополнительные риски облучения различных групп медицинского персонала (медсестры, медицинские физики, врачи). Поэтому требуются тщательные меры защиты, чтобы свести к минимуму облучение персонала, как непосредственно от источника излучения, так и от пациента с введенной активностью. Для этого используется специальное оборудование (переносные контейнеры, экранированные шприцы и др.). При необходимости следует обеспечить дополнительную защиту для медицинского персонала от излучения от «ак-

тивных» пациентов. Для этого могут использоваться подвижные экраны в палатах пациентов [3, 10].

Чтобы гарантировать, что граничные дозы в помещениях, прилегающих к процедурной комнате или палатам с «активными» пациентами, не превышаются и защита оптимизирована, важно правильно спроектировать стационарную защиту (стены, перекрытия) [11].

Существующие сведения о защитных свойствах различных материалов по отношению к гамма-излучению, позволяющие их использовать для расчета защиты от гамма-излучения ^{131}I либо относятся к ограниченному набору материалов защиты [12, 13], либо приведены для отдельных моноэнергетических линий фотонного излучения [14], т. е. требуют проведения дополнительных расчетов применительно к спектру гамма-излучения радионуклида ^{131}I . Аналогичных сведений для спектра гамма-излучения радионуклида ^{177}Lu в доступной нам литературе обнаружено не было.

Цель исследования – проведение расчетов ослабления гамма-излучения радионуклидов ^{131}I и ^{177}Lu в различных материалах, оценка эффективности стационарной защиты и вспомогательного оборудования, расчет возможных доз внешнего облучения медицинского персонала в отделении РНТ.

Расчеты ослабления гамма-излучения в материалах защиты

Спектры радионуклидов ^{131}I и ^{177}Lu насчитывают более 30 монолиний фотонного излучения с энергией более 10 кэВ. Тем не менее, учитывая их выход, для проведения расчетов ослабления излучения в различных материалах достаточно каждый спектр представить двумя монолиниями в пропорции, определяемой их вкладами в значение кермы в воздухе.

В таблице 1 представлены характеристики радионуклидов [15], использовавшиеся при расчете ослабления гамма-излучения в материалах защиты.

Из представленных в таблице 1 данных видно, что гамма-излучение ^{177}Lu дает значительно меньший вклад в мощность дозы гамма-излучения в воздухе по сравнению с гамма-излучением ^{131}I вследствие меньшей (приблизи-

Характеристики радионуклидов, использовавшиеся при расчете ослабления гамма-излучения

Таблица 1

[Table 1]

Characteristics of radionuclides used to calculate the attenuation of gamma radiation

Нуклид [Nuclide]	Период полураспада, сут. [Half-life, days]	Энергия монолинии и ее вклад в керму в воздухе [Energy of mono line and its contribution in air kerma]	Керма постоянная, мкГр×м ² /ч·Бк [Air Kerma–Rate Constant, μGy·m ² /h·Bq]
^{131}I	8,02	0,36 МэВ – ¹⁾ 85% 0,70 МэВ – ¹⁾ 15%	5,22E-08
^{177}Lu	6,65	0,10 МэВ – ¹⁾ 21% 0,20 МэВ – ¹⁾ 79%	4,75E-09

¹⁾ – вклад в керму в воздухе [¹⁾ – contribution to air kerma].

¹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы) (зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936 [Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936] (In Russ.)

тельно на порядок) керма-постоянной и меньшей энергии монолиний, входящих в спектр излучения.

В качестве исходных данных для проведения расчетов мы использовали значения кратностей ослабления моноэнергетического фотонного излучения точечного изотропного источника в различных средах из Справочника В.П. Машковича и А.В. Кудрявцевой «Защита от ионизирующего излучения» [14]. Эти значения были аппроксимированы аналитическими функциями, чтобы пользователь мог быстро и просто получить необходимый результат. Были получены несколько видов аппроксимирующих функций, представляющих:

– зависимость кратности ослабления K_{att}^E (отн.ед.) гамма-излучения с энергией E (МэВ) от толщины защиты d^E (см)

$$K_{att}^E = a_1 + a_2 \cdot (d^E)^{a_3} \quad (1)$$

или $K_{att}^E = \exp(a_4 \cdot (d^E - a_5)); \quad (2)$

– зависимость толщины защиты d^E (см) от K_{att}^E (отн.ед.)

$$d^E = a_6 + a_7 \cdot \log_{10}(K_{att}^E) . \quad (3)$$

Значения параметров $a_1 - a_7$, определенные методом нелинейной регрессии с помощью программы STATISTICA 10 [16], представлены в таблице 2. Значения параметров a_6 и a_7 в таблице 2 пригодны во всем диапазоне значений K_{att}^E (от 2 до 10^7) при дополнительной погрешности за счет процедуры аппроксимации не более 10%. Значения параметров $a_1 - a_5$ приведены в таблице для различных диапазонов значений толщины защиты d^E (см). При этом дополнительная погрешность за счет процедуры аппроксимации оригинальных значений из [14] составляла не более 25%.

На рисунках 1 и 2 в качестве примера показаны зависимости кратности ослабления гамма-излучения от толщины защиты из свинца и обратной зависимости толщины защиты из свинца от кратности ослабления гамма-излучения, соответственно для монолиний с энергией 0,36 и 0,7 МэВ, определяющих спектр излучения ^{131}I . Зависимость кратности ослабления гамма-излучения от толщины защиты для всех материалов защит невозможно было представить с удовлетворительной погрешностью функцией с одним набором параметров для всего диапазона толщин защиты. Поэтому, как видно из рисунка 1, в этом случае использовали кусочную аппроксимацию или даже подбирали другой вид функции ((2) вместо (1)), чтобы сохранить приемлемую погрешность. С другой стороны, обратная зависимость толщины защиты от кратности ослабления гамма-излучения, как видно из рисунка 2, прекрасно описывалась функцией

Таблица 2

Значения параметров аппроксимирующих функций (1), (2) и (3)

[Table 2]

The values of the parameters of the approximating functions (1), (2) and (3)]

Параметр [Parameter]	Энергия гамма-излучения, МэВ [Energy of gamma radiation, MeV]			
	0,10	0,20	0,36	0,70
Свинец ($\rho = 11,34 \text{ г см}^{-3}$) [Lead, $\rho = 11,34 \text{ g cm}^{-3}$]				
a_1	2,1; $0,03 \leq d \leq 0,2$ 114; $0,2 < d \leq 0,6$	2,2; $0,08 \leq d \leq 0,6$ 118; $0,6 < d \leq 1,4$	1,7; $0,2 \leq d \leq 1,7$ 50; $1,7 < d \leq 3,5$	1,7; $0,5 \leq d \leq 5$ 70; $5 < d \leq 10$
a_2	$1,03 \cdot 10^5$; $0,03 \leq d \leq 0,2$ $5,55 \cdot 10^7$; $0,2 < d \leq 0,6$	$2,7 \cdot 10^3$; $0,08 \leq d \leq 0,6$ $4,53 \cdot 10^4$; $0,6 < d \leq 1,4$	13; $0,2 \leq d \leq 1,7$ 0,62; $1,7 < d \leq 3,5$	0,24; $0,2 \leq d \leq 1,7$ $0,66 \cdot 10^{-4}$; $5 < d \leq 10$
a_3	3,91; $0,03 \leq d \leq 0,2$ 8,85; $0,2 < d \leq 0,6$	4,15; $0,08 \leq d \leq 0,6$ 11,1; $0,6 < d \leq 1,4$	3,63; $0,2 \leq d \leq 1,7$ 8,10; $1,7 < d \leq 3,5$	3,84; $0,2 \leq d \leq 1,7$ 8,54; $5 < d \leq 10$
a_6	-0,01	0,02	0,025	0,075
a_7	0,10	0,22	0,85	2,36
Вольфрам ($\rho = 19,3 \text{ г см}^{-3}$) [Tungsten, $\rho = 19,3 \text{ g cm}^{-3}$]				
a_1	–	2,33; $0,06 \leq d \leq 0,5$ 860; $0,5 < d \leq 1,0$	2,44; $0,21 \leq d \leq 1,8$ 1560; $1,8 < d \leq 4,0$	2,23; $0,6 \leq d \leq 3,6$ 200; $3,6 < d \leq 8,5$
a_2	–	$1,28 \cdot 10^4$; $0,06 \leq d \leq 0,5$ 10^6 ; $0,5 < d \leq 1,0$	41,2; $0,21 \leq d \leq 1,8$ 0,077; $1,8 < d \leq 4,0$	0,69; $0,6 \leq d \leq 3,6$ 0,26; $3,6 < d \leq 8,5$
a_3	–	4,42; $0,06 \leq d \leq 0,5$ 11,9; $0,5 < d \leq 1,0$	4,76; $0,21 \leq d \leq 1,8$ 12,9; $1,8 < d \leq 4,0$	4,28; $0,6 \leq d \leq 3,6$ 11,0; $3,6 < d \leq 8,5$
a_4	61,1; $0,02 \leq d \leq 0,12$ 47,4; $0,12 \leq d \leq 0,32$	–	–	–
a_5	0,0078; $0,02 \leq d \leq 0,12$ 0,024; $0,12 \leq d \leq 0,32$	–	–	–
a_6	0,005	0,01	0,034	0,17
a_7	0,041	0,165	0,60	1,48

Параметр [Parameter]	Энергия гамма-излучения, МэВ [Energy of gamma radiation, MeV]			
	0,10	0,20	0,36	0,70
	Бетон (ρ = 2,3 г см ⁻³) [Concrete, 2,3 g cm ⁻³]			
a_1	–	–	4,92; 17≤d≤45 117; 45<d≤67	4,02; 20≤d≤45 93,6; 45<d≤75
a_2	–	–	0,33·10 ⁻⁸ ; 17≤d≤45 0,14·10 ⁻¹⁵ ; 45<d≤67	0,66·10 ⁻⁷ ; 20≤d≤45 0,64·10 ⁻¹⁵ ; 45<d≤75
a_3	–	–	6,81; 17≤d≤45 11,2; 45<d≤67	5,62; 20≤d≤45 10,3; 45<d≤75
a_4	0,33	0,24	–	–
a_5	5,5	8,8	–	–
a_6	5,0	8,9	8,4	8,4
a_7	7,1	4,2	13,1	17,1

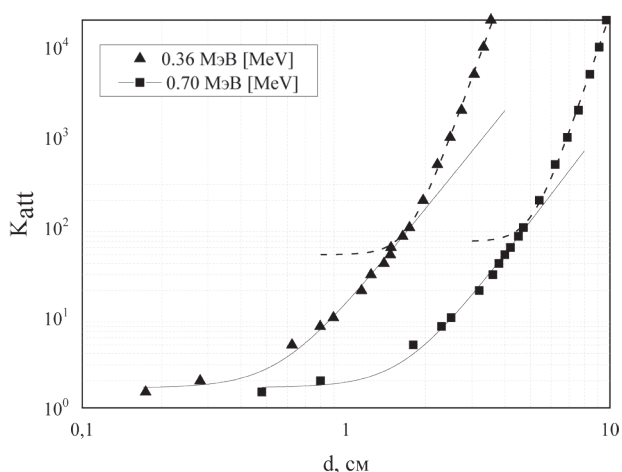


Рис. 1. Зависимость кратности ослабления гамма-излучения с энергией 0,36 МэВ и 0,7 МэВ от толщины защиты из свинца [Fig. 1. Dependence of the attenuation factor for gamma radiation with an energy of 0.36 MeV and 0.7 MeV on the thickness of the lead shield]

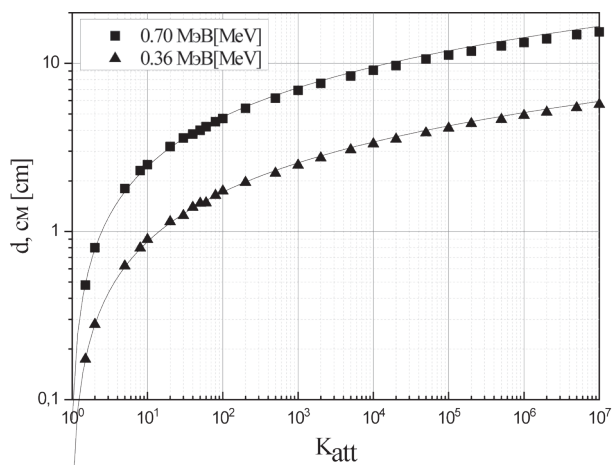


Рис. 2. Зависимость толщины защиты из свинца от кратности ослабления гамма-излучения с энергией 0,36 МэВ и 0,7 МэВ [Fig. 2. Dependence of the lead shield thickness on the attenuation factor for gamma radiation with energies of 0.36 MeV and 0.7 MeV]

вида (3) на всем диапазоне значений и для K_{att}^E всех материалов защит.

После расчета значений K_{att}^E или d^E для монолиний их расчет для спектра гамма-излучения радионуклидов с учетом их вклада в значение кермы в воздухе (см. табл. 1) проводится с помощью соотношений:

для ^{131}I

$$K_{att}^{sp} = \frac{1}{\left(\frac{0.85}{K_{att}^{0.36}} + \frac{0.15}{K_{att}^{0.7}}\right)} \quad \text{или} \quad d^{sp} = \frac{1}{\left(\frac{0.85}{d^{0.36}} + \frac{0.15}{d^{0.7}}\right)} \quad (4)$$

для ^{177}Lu

$$K_{att}^{sp} = \frac{1}{\left(\frac{0.21}{K_{att}^{0.1}} + \frac{0.79}{K_{att}^{0.2}}\right)} \quad \text{или} \quad d^{sp} = \frac{1}{\left(\frac{0.21}{d^{0.1}} + \frac{0.79}{d^{0.2}}\right)} \quad (5)$$

Приводимые в литературе значения слоев половинного и десятикратного ослабления гамма-излучения радионуклида ^{131}I в свинце (3 мм и 11 мм соответственно) [12] и бетоне (5,5 см и 18 см соответственно) [13] не отличаются более чем на 22% от аналогичных значений, рассчитанных по формулам (3), (4), (5). Исключение составляет значение слоя половинного ослабления в бетоне. Оно оказалось в 2,3 раза больше, чем значение 5,5 см из [13].

Для оценки эффективности стационарной защиты (стены, перекрытия) и типового вспомогательного оборудования, используемого медицинским персоналом при работе в отделении РНТ, были выполнены расчеты кратностей ослабления гамма-излучения радионуклидов ^{131}I и ^{177}Lu в материалах из свинца, вольфрама и бетона. Толщина материалов из свинца и вольфрама соответствовала характеристикам типового вспомогательного оборудования:

- радиационно-защитный шкаф – толщина свинцовой защиты 50 мм;
- контейнер для флакона с РФП – толщина защиты из вольфрама – 29 мм;

- защита шприца – толщина защиты из вольфрама 9 мм;
- защита контейнера для шприцов – толщина свинцовой защиты 5 мм;
- радиационно-защитная ширма – толщина свинцовой защиты 15 мм.

Толщина стен и перекрытий из бетона была выбрана в диапазоне 200 – 500 мм.

Результаты расчетов приведены в таблице 3. Эти данные в дальнейшем были использованы для оценки доз облучения персонала при выполнении той или иной операции с РФП.

Таблица 3

Кратности ослабления фотонного излучения радионуклидов ^{131}I и ^{177}Lu в бетоне, вольфраме и свинце

[Table 3]

Attenuation factors for photon radiation of ^{131}I and ^{177}Lu radionuclides in concrete, tungsten and lead

Толщина защиты, мм [Thickness of the shield, mm]	Радионуклид [Radionuclide]	
	^{131}I	^{177}Lu
K_{att} (бетон) [concrete]		
200	6,9	18
300	35	200
400	190	2,25E+03
500	790	2,50E+04
K_{att} (вольфрам) [tungsten]		
9	11,6	3,62E+05
29	450	> 1,00E+07
K_{att} (свинец) [lead]		
5	2,5	170
10	7,4	5,75E+04
15	15	> 1,00E+07
50	870	> 1,00E+07

Прогнозные оценки доз внешнего облучения персонала при нормальной работе

При нормальной работе с РФП поля гамма-излучения на рабочих местах медицинского персонала (ситуации формирования доз внешнего облучения) можно подразделить следующим образом:

- мало меняющиеся в пространстве и во времени, когда персонал находится далеко от источника излучения;
- сильно меняющиеся в пространстве и во времени, при выполнении кратковременных операций в непосредственной близости от источника излучения.

В первом случае не превышение допустимых значений мощности дозы на рабочих местах обеспечивается, в основном, стационарной защитой (стены помещений, перекрытия). Во втором случае мощность дозы излучения может превышать допустимые средние значения, и радиационная безопасность дополнительно должна обеспечиваться другими оптимизационными мероприятиями, такими как использование вспомогательного защитного оборудования, сокращение времени выполнения операции и др.

Значения мощностей доз гамма-излучения в воздухе при выполнении однократной операции с РФП будут зависеть от вводимой пациенту активности, а годовых накопленных доз внешнего облучения – еще и от количества пациентов, обслуживаемых за это время. Согласно современным протоколам терапии, с помощью ^{131}I mIBG пациентам вводится от 3,7 до 11,2 ГБк ^{131}I [17]. Рассмотрим следующий сценарий работы отделения РНТ, предполагающий один из максимально возможных годовых оборотов активности: в 4 госпитальных палатах содержатся по одному пациенту с введенной активностью 11 ГБк радионуклида ^{131}I . Пятая палата предназначена для амбулаторных пациентов, для лечения которых используется радионуклид ^{177}Lu активностью 9 ГБк.

Оценим применительно к рассматриваемому сценарию необходимое время нахождения пациента в стационаре для снижения активности ^{131}I в теле пациента с 11 ГБк до значения 0,4 ГБк, указанного в НРБ-99/2009 в качестве критерия для выписки. Для этого необходимо знать эффективный период полувыведения активности ^{131}I у пациентов, лечащихся по поводу рака щитовидной железы. Согласно данным литературы, его среднее значение оценивается как 11–12 ч, а 95% квантиль – 20,6 ч [18, 19]. Используя в качестве консервативной оценки последнее значение, получаем необходимое время пребывания в стационаре:

$$0,4 \text{ ГБк} = 11 \text{ ГБк} \cdot \exp\left(-\frac{0,693 \cdot x \text{ сут.}}{0,86 \text{ сут.}}\right),$$

$$\ln(0,4) = \ln(11) - \frac{0,693}{0,86} \cdot x; \quad x=4,1 \text{ сут.}$$

На основе времени пребывания пациента в стационаре, равного 4 суткам, было рассчитано годовое количество пациентов в рассматриваемом сценарии:

$$\text{Количество пациентов на одно койко-место} = \frac{300 \text{ дней}}{4 \text{ дня}} = 75$$

$$\text{Общее количество пациентов} = 75 \cdot 4 = 300$$

$$\text{Годовой оборот активности } ^{131}\text{I} = 300 \cdot 11 \cdot 10^9 \text{ Бк} = 3,3 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$$

На основании представленного выше сценария и защитных характеристик типового вспомогательного оборудования были проведены расчеты мощностей доз гамма-излучения в воздухе в условиях использования медицинским персоналом защитного оборудования. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Для некоторых операций с РФП приведенные в таблице 4 значения мощностей доз в воздухе, используемые для получения консервативных оценок эквивалентной дозы в коже рук (0,1 м) и эффективной дозы (1 м), оказались больше допустимых значений, рассчитанных для условий равномерного облучения в течение всего года (выделены жирным шрифтом). Условия выполнения этих операций следует оптимизировать прежде всего.

С учетом выше представленных данных были рассчитаны возможные дозы внешнего облучения персонала при нормальной работе с РФП в случае выполнения крат-

Результаты расчета мощностей доз гамма-излучения в воздухе при использовании вспомогательного оборудования

Таблица 4

[Table 4]

Results of the gamma radiation dose rates calculations in the air when using supporting equipment]

Оборудование [Equipment]	Мощность дозы на 1 м без защиты, мкГр/ч [Dose rate at 1 m without protection, $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]	Расчетная точка [Projection point]	Материал и толщина защиты, мм [Protection mate- rial and thickness, mm]	Кратность ослабления излучения [Attenuation fac- tor for radiation]	Мощность дозы в расчетной точке за защитой, мкГр/ч [Dose rate at projection point behind the shield, $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]
Радиационно- защитный шкаф [Protective safe]	^{131}I 5,74E+02 ¹⁾	1 м от источника [1 m from the source]			6,6E-01
		0,4 м от источника [0.4 m from the source]		870	4,1
	^{177}Lu 4,28E+01 ¹⁾	1 м от источника [1 m from the source]	50 свинец [lead]		~ 0
		0,4 м от источника [0.4 m from the source]		> 1,0E+07	~ 0
Защитный контейнер для флакона с РФП [Protective container]	^{131}I 5,74E+02	1 м от источника [1 m from the source]	29 вольфрам [tungsten]		1,28
		0,1 м от источника [0.1 m from the source]		450	1,28E+02
	^{177}Lu 4,28E+01	1 м от источника [1 m from the source]	29 вольфрам [tungsten]		~ 0
		0,1 м от источника [0.1 m from the source]		> 1,0E+07	~ 0
Защита шприца с РФП [Syringe protection]	^{131}I 5,74E+02	1 м от источника [1 m from the source]	9 вольфрам [tungsten]		4,95E+01 ²⁾
		0,1 м от источника [0.1 m from the source]		11,6	4,95E+03 ²⁾
	^{177}Lu 4,28E+01	1 м от источника [1 m from the source]	9 вольфрам [tungsten]		1,2E-04
		0,1 м от источника [0.1 m from the source]		3,62E+05	1,2E-02
Защитный шприц с РФП + контейнер для шприца с РФП [Syringe protection + protective container]	^{131}I 5,74E+02	1 м от источника [1 m from the source]	9 вольфрам + 5 свинец [9 tungsten+ 5 lead]		1,9E+01 ²⁾
		0,1 м от источника [0.1 m from the source]		30	1,9E+03 ²⁾
	^{177}Lu 4,28E+01	1 м от источника [1 m from the source]	9 вольфрам + 5 свинец [9 tungsten+ 5 lead]		7,1E-07
		0,1 м от источника [0.1 m from the source]		6,0E+07	7,1E-05
Защитная ширма для персонала [Protective screen]	^{131}I 5,74E+02	1 м от источника [1 m from the source]	15 свинец [lead]	14,8	3,88E+01 ²⁾

¹⁾ В расчетах принято, что 1 флакон находится внутри шкафа без защитного контейнера.²⁾ Операции с превышением допустимой мощности дозы.[¹⁾ In the calculations it is assumed that one flacon is inside the protective safe without the protective container][²⁾ Operations exceeding the permissible dose rate].

современных операций в непосредственной близости от источника излучения:

- для операций с фасовкой и введением РФП с 11 ГБк ¹³¹I в капельницу;
- при обходе/наблюдении врачом стационарных пациентов с введенной активностью 11 ГБк ¹³¹I.

Результаты расчетов приведены в таблицах 5 и 6.

Время выполнения операций с РФП, перечисленных в таблице 5, зависит от многих факторов, в частности, от правильности организации потоков РФП, пациентов и самого персонала и от его квалификации. Тем не менее, представляется целесообразным предположить, что это время будет варьировать от долей минуты до нескольких минут. Поэтому для грубых оценок продолжительности каждой операции в качестве типичного значения

можно использовать время, равное 1 мин. Тогда годовую дозу медицинского персонала, выполняющего операции, перечисленные в таблице 5 (например, медицинская сестра), можно оценить, просуммировав дозы отдельных операций и умножив полученное значение на годовое количество пациентов. Для кожи кистей рук (оценка максимальной эквивалентной дозы в коже) и всего тела (оценка эффективной дозы) эти значения составят около 60 мЗв/год и 2,2 мЗв/год.

При обходе/наблюдении врачом пациентов с введенной активностью предполагалось, что эта процедура занимает 10, 5, 5 и 10 мин времени в течение 1-го, 2-го, 3-го и 4-го дня пребывания пациента в стационаре. Тогда аналогичный расчет приводит к оценке эффективной дозы у врача за год, равной 5,8 мЗв при лечении 300 пациентов.

Таблица 5

Результаты расчета доз облучения персонала в течение 1 мин при выполнении работ по фасовке и введению в капельницу РФП с 11 ГБк ¹³¹I

[Table 5]

Results of calculation of personnel doses during 1 min when performing the operations on filling and introducing into the dropper the drug with 11 GBq of ¹³¹I

Операция [Operation]	Мощность дозы в воздухе, мкГр/ч [Dose rate in air, μGy·h ⁻¹]	Расстояние, м [Distance, m]		Оценка дозы за 1 мин, мкЗв [Dose value per 1 min., μSv]	
		до кистей рук [up to the hands]	до тела [up to the body]	для кожи кистей рук [for the skin of the hands]	для всего тела [for the whole body]
Перенос флаконов в защитных контейнерах к месту заправки шприца (вытяжной шкаф) [Transfer of flacons in protective containers to the place of filling the syringe]	1,28 на 1 м за защитой контейнера [1.28 at 1 m behind the container protection]	0,1	0,4	2,1	0,13
Работа у защитного шкафа (фасовка в шприцы) [Work at the protective safe (filling in syringes)]	49,5 на 1 м за защитой шприца или 0,66 за защитой шкафа [49.5 at 1 m behind the syringe shield or 0.66 behind the safe shield]	0,1	0,4	82,5	0,07
Транспортировка шприца к капельнице [Transporting the syringe to the dropper]	19 на 1 м за защитой контейнера для переноски шприцев [19 at 1 m behind the shield of the syringe carrier container]	0,1	0,4	31,7	2,0
Введение РФП в капельницу [Introducing the drug into the dropper]	49,5 на 1 м за защитой шприца [49.5 at 1 m behind the syringe shield]	0,1	0,4	82,5	5,2

Таблица 6

Результаты расчета доз облучения персонала при обходе/наблюдении врачом стационарных пациентов с максимальной введенной активностью 11 ГБк ¹³¹I

[Table 6]

Results of calculation of personnel doses when observing by a doctor of patients with a maximum administered activity of 11 GBq ¹³¹I

Операция [Operation]	Мощность дозы в воздухе, мкГр/ч [Dose rate in air, μGy·h ⁻¹]	Расстояние, м [Distance, m]	Оценка дозы за 1 мин, мкЗв [Dose value per 1 min., μSv]
		до тела [up to the body]	для всего тела [for the whole body]
Пребывание с пациентом [Stay with the patient]	38,8 на 1 м за защитной ширмой [38.8 at 1 m behind a protective screen]	1,0	0,65

Отметим, что эти значения индивидуальных доз у персонала соответствуют достаточно «жесткому» сценарию работы отделения РНТ в течение года с активностями у пациентов, близкими к максимальным значениям. При работе со значениями, близкими к нижней границе диапазона вводимых активностей (~4 ГБк), рассчитанные выше значения доз нужно уменьшить приблизительно в 2 раза. Тем не менее, эти прогнозные расчеты показывают, на какие операции с РФП при работе с ^{131}I следует обратить внимание в первую очередь. Более адекватный ответ об уровнях облучения различных категорий персонала может дать только аккуратное проведение индивидуального дозиметрического контроля (ИДК). К настоящему времени такого рода данные для медперсонала, работающего

в Российской Федерации в отделениях РНТ, обнаружить не удалось.

При выполнении аналогичных операций с ^{177}Lu рассчитанные значения мощностей доз гамма-излучения в воздухе значительно меньше, чем при работе с ^{131}I , и значительно ниже допустимых мощностей доз для всех операций (см. табл. 4).

В случае нахождения персонала вдали от источника излучения (ситуации достаточно равномерного облучения во времени и пространстве) защита от гамма-излучения обеспечивается оптимально спроектированной компоновкой помещений различного назначения, толщиной их стен и перекрытий, выполненных, как правило, из бетона. В таблице 7 в качестве иллюстрации приведены

Таблица 7

Результаты расчета толщины стен и перекрытий в помещениях

[Table 7]

Results of calculation the thickness of walls and floors in rooms

Источник и мощность дозы на 1 м, мкГр/ч [Source and dose rate at 1 m, $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]	Расчетная точка [Projection point]	Проектная мощность дозы, мкЗв/ч [Permissible dose rate, $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]	Расстояние до расчетной точки, м [Distance to the projection point, m]	Мощность дозы, без защиты мкГр/ч [Dose rate without protection, $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]	Толщина и материал защиты, мм [Thickness and shield material, mm]	Кратность ослабления [Attenuation factor]	Мощность дозы, за защитой мкГр/ч [Dose rate behind the shield, $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$]
Хранилище РФП (расчет произведен для 4 флаконов в защитных контейнерах) [Storage (The calculation is made for 4 flacons in protective containers)]							
^{131}I , 574×4	Палата стационара с «неактивными» пациентами [the ward with «inactive» patients]	1,2	4,0	1,44E+02	200 бетон (стена) +29 вольфрам (контейнер) [200 concrete + 29 tungsten]	3,10E+03	4,6E-02
Помещение для персонала [staff room]		6,0	2,0	5,74E+02	200 бетон +29 вольфрам [200 concrete + 29 tungsten]	1,9E-01	
«Активная» палата на 1 койко-место [«Active» ward for 1 bed]							
1-я палата [1 st ward]	Территория [territory]	1,2	7,0	11,7			6,2E-02
2-я палата [2 nd ward]			5,0	23	400 бетон (стена) [400 concrete]	190	1,2E-01
3-я палата [3 rd ward]			5,0	23			1,2E-01
4-я палата [4 th ward]			7,0	11,7 =69,4			6,2E-02 =0,36
^{131}I 574 Одна палата [one ward]	Коридор [corridor]	5,0	4,0	3,59E+01	10 свинец (дверь) [10 lead]	7,4	4,85
Одна палата [one ward]	Палата стационара с «неактивными» пациентами [the ward with «inactive» patients]	1,2	3,0	6,38E+01	400 бетон (перекрытие) [400 concrete]	190	3,4E-01

результаты расчетов мощностей доз в воздухе в помещениях, где может находиться персонал или лица из населения, расположенных рядом с помещениями, где находятся источники излучения с радионуклидом ^{131}I (например, контейнеры с емкостями с РФП) или пациенты с введенной активностью. При расчете стационарной защиты источники с радионуклидом ^{177}Lu могут не учитываться из-за их маленького вклада (менее 10%) в суммарную мощность дозы за защитой.

Результаты расчетов стационарной защиты показывают, что толщина стен и перекрытий из бетона 200–400 мм будет обеспечивать непревышение проектных значений мощностей доз гамма-излучения в воздухе даже при таком «жестком» сценарии работы отделения РНТ, какой использовался в этом примере.

Заключение

В статье представлены данные, позволяющие рассчитать для спектров гамма-излучения радионуклидов ^{131}I и ^{177}Lu кратности ослабления в свинце, вольфраме и бетоне различной толщины или толщину защиты из этих материалов при заданной кратности ослабления. Используя эти данные, была рассчитана защитная эффективность вспомогательного оборудования (переносные контейнеры, экранированные шприцы и др.) и возможные дозы внешнего облучения медицинского персонала в отделении РНТ. Показано, что в производственном процессе существуют кратковременные операции, когда источник излучения (контейнер с капсулой с РФП, шприц с РФП), находясь вблизи тела медицинского работника, создает значительную мощность дозы. По этой причине годовая индивидуальная доза внешнего облучения медицинского работника может приближаться или превышать $1/3$ от значения предела дозы. Для таких категорий персонала, даже если они не отнесены к персоналу группы А, рекомендуется введение ИДК, по крайней мере, в течение года, чтобы получить реальные значения индивидуальных доз, зависящие от значений вводимых активностей пациентам и количества пациентов в конкретной медицинской организации. Иллюстративный расчет стационарной защиты показал, что толщина стен и перекрытий из бетона 200–400 мм будет обеспечивать непревышение проектных значений мощностей доз гамма-излучения в воздухе при годовом обороте активности в отделении РНТ $\sim 3,3 \cdot 10^{12}$ Бк.

Литература

- ICRP. Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 37 (2-4); 2007. p. 332.
- ICRP. Publication 105. Radiological protection in medicine. Ann. ICRP 37 (6); 2007. p. 63.
- ICRP. Publication 94. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. Ann. ICRP 34 (2); 2004. p. 80.
- Luster M., Clarke S.E., Dietlein M., et al. Guidelines for radioiodine therapy of differentiated thyroid cancer // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2008. Vol. 35, No. 10. P. 1941–1959.
- Giammarile F., Bodei L., Chiesa C., et al. EANM procedure guideline for the treatment of liver cancer and liver metastases with intra-arterial radioactive compounds // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2011. Vol. 38, No. 7. P. 1393–1406.
- Marcel P., Stokkel M., Handkiewicz Junak D., et al. EANM procedure guidelines for therapy of benign thyroid disease // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2010. Vol. 37. P. 2218–2228.
- Giammarile F., Chiti A., Lassmann M., et al. EANM procedure guidelines for ^{131}I -meta-iodobenzylguanidine (^{131}I -mIBG) therapy // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2008. No. 35. P. 1039–1047.
- Zaknun J.J., Bodei L., Mueller-Brand J., et al. The joint IAEA, EANM, and SNMMI practical guidance on peptide receptor radionuclide therapy (PRRT) in neuroendocrine tumours // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2013. Vol. 40, No. 5. P. 800–816.
- Наркевич Б.Я., Лысак Ю.В. Обеспечение радиационной безопасности при амбулаторном режиме применения терапевтических радиофармпрепаратов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60, № 4. С. 27–35.
- Rushforth D.P., Pratt B.E., Chittenden S.J., et al. InfuShield: a shielded enclosure for administering therapeutic radioisotope treatments using standard syringe pumps // Nuclear Medicine Communications. 2017. Vol. 38, No. 3. P. 266–252.
- IAEA. Radiation protection in the design of radiotherapy facilities. IAEA. Vienna, Safety Report Series No. 47; 2006. p. 129.
- Delacroix D., Guerre J.P., Leblanc P., Hickman C. Radionuclide and radiation protection data handbook // Radiation Protection Dosimetry. 2002. No. 98(1) P. 1–168.
- Schleien B., Birky B., Slaback I. Handbook of health physics and radiological health. 3rd ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 700 p.
- Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующего излучения. Справочник. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
- ICRP. Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. Ann. ICRP 38(3); 2008. p. 96.
- Data analysis software system StatSoft, Inc. STATISTICA, version 10. 2011. [Internet]: www.statsoft.com (Дата обращения: 12.11.2020)
- Giammarile F., Chiti A., Lassmann M., et al. EANM procedure guidelines for ^{131}I -meta-iodobenzylguanidine (^{131}I -mIBG) therapy // Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging. 2008. No. 35. P. 1039–1047.
- Al-Haj A.N., Lagarde C.S., Lobriguito A.M. Patient parameters and other radiation safety issues in ^{131}I therapy for thyroid cancer treatment // Health Physics. 2007. Vol. 93, No. 6. P.656–666.
- Willegaingon J., Malvestiti L.F., Guimarães M.I.C., et al. ^{131}I effective half-life for patients with thyroid cancer // Health Physics. 2006. Vol. 91, No. 2. P. 119–122.

Поступила: 24.09.2020 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

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, 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; научный сотрудник, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия

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

Смолярчук Максим Ярославович – заместитель главного внештатного специалиста по лучевой диагностике Департамента здравоохранения Москвы по радионуклидной диагностике, Москва, Россия

Для цитирования: Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Смолярчук М.Я. Некоторые аспекты радиационной защиты в отделениях радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 75-85. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-75-85

Some aspects of radiation protection in radionuclide therapy departments

Vladislav Yu. Golikov¹, Larisa A. Chipiga^{1,2}, Aleksandr V. Vodovатов^{1,3}, Maksim Ya. Smolyarchuk⁴

¹ Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

² A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

³ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health, Moscow, Russia

The paper presents the data that allow calculate the attenuation factors in lead, tungsten and concrete of various thicknesses or the thickness of shielding made of these materials for a given attenuation factor for the spectra of gamma radiation of ¹³¹I and ¹⁷⁷Lu radionuclides. Using these data the effectiveness of the protection of supporting equipment (portable containers, shielded syringes, etc.) and the possible doses of external radiation of medical personnel in the radionuclide therapy department were calculated. It is shown that there are short-term operations in the production process when a radiation source (container with a capsule with activity, syringe with activity), being near the body of a medical worker, creates a significant dose rate. For this reason the annual individual dose of external exposure of a medical worker can approach or exceed 1/3 of the dose limit. Calculation of the attenuation of ¹³¹I gamma radiation by stationary shield showed that the thickness of walls and floors made of concrete 200 – 400 mm will ensure that the permissible values of the dose rates of gamma radiation in the air do not exceed at annual turnover of activity in the radionuclide therapy department of ~ 3.3 · 10¹² Bq.

Key words: radionuclide therapy, iodine-131, medical personnel, protection from gamma radiation.

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

References

1. ICRP. Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 37(2–4); 2007. 332 p.
2. ICRP. Publication 105. Radiological protection in medicine. Ann. ICRP 37(6); 2007. 63 p.
3. ICRP. Publication 94. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. Ann. ICRP 34(2); 2004. 80 p.
4. Luster M, Clarke SE, Dietlein M, Lassmann M, Lind P, Oyen WJG, et al. Guidelines for radioiodine therapy of differentiated thyroid cancer. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2008;35(10): 1941–1959.
5. Giammarile F, Bodei L, Chiesa C, Flux G, Forrer F, Kraeber-Bodere F, et al. EANM procedure guideline for the treatment of liver cancer and liver metastases with intra-arterial radioactive compounds. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2011;38(7): 1393–1406.
6. Marcel P, Stokkel M, Handkiewicz JD, Lassmann M, Dietlein M, Luster M. EANM procedure guidelines for therapy of benign thyroid disease. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2010; 37: 2218–2228.
7. Giammarile F, Chiti A, Lassmann M, Brans B, Flux G. EANM procedure guidelines for ¹³¹I-meta-iodobenzylguanidine (¹³¹I-mIBG) therapy. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2008; 35: 1039–1047.
8. Zaknun JJ, Bodei L, Mueller-Brand J, Baum RP, Horsch D, O'Dorisio MS, et al. The joint IAEA, EANM, and SNMMI practical guidance on peptide receptor radionuclide therapy (PRRT) in neuroendocrine tumours. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2013;40(5): 800–816.
9. Narkevich BY, Lysak YV. Radiation Safety in the Ambulatory Use of Therapeutic Radiopharmaceuticals. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2015;60(4): 27–35. (In Russian).
10. Rushforth DP, Pratt BE, Chittenden SJ, Murray IS, Causer L, Grey MJ, et al. InfuShield: a shielded enclosure for administering therapeutic radioisotope treatments using standard syringe pumps. *Nuclear Medicine Communications*. 2017;38(3): 266–252.
11. IAEA. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Safety Report Series No. 47. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2006. 129 p.
12. Delacroix D, Guerre JP, Leblanc P, Hickman C. Radionuclide and radiation protection data handbook. *Radiation Protection Dosimetry*. 2002;98(1): 1–168.
13. Schlegel B, Birky B, Slaback I. Handbook of health physics and radiological health. 3rd edn. Williams and Wilkins, Baltimore, MD. 1998. 700 p.
14. Mashkovich VP, Kudryavtseva AV. Protection from ionizing radiation. Reference Book. 4th edn. Moscow: Energoatomizdat; 1995. 496 p. (In Russian).
15. ICRP. Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations. Ann. ICRP 38(3); 2008. 96 p.
16. Data analysis software system StatSoft, Inc. STATISTICA, version 10. 2011. Available from: www.statsoft.com. [Accessed November 12, 2020].
17. Giammarile F, Chiti A, Lassmann M, Brans B, Flux G. EANM procedure guidelines for ¹³¹I-meta-iodobenzylguanidine (¹³¹I-mIBG) therapy. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2008;35: 1039–1047.
18. Al-Haj AN, Lagarde CS, Lobreguit AM. Patient parameters and other radiation safety issues in ¹³¹I therapy for thyroid cancer treatment *Health Physics*. 2007;93(6): 656–666.
19. Willegaignon J, Malvestiti LF, Guimarães MIC, Sapienza MT, Endo IS, Neto GC, et al. ¹³¹I effective half-life for patients with thyroid cancer. *Health Physics*. 2006;91(2): 119–122.

Received: September 24, 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)

Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being; research fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, Saint-Petersburg, Russia

Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., 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; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Maksim Ya. Smolyarchuk – deputy chief specialist in nuclear medicine, Moscow Department of Health, Moscow, Russia

For citation: Golikov V.Yu., Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Smolyarchuk M.Ya. Some aspects of radiation protection in radionuclide therapy departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 75–85. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-75-85

Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС

А.В. Панов¹, А.В. Трапезников², А.В. Коржавин², И.В. Гешель¹, С.В. Коровин¹, М.А. Эдомская¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
Министерства образования и науки России, Обнинск, Россия

²Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия

В статье дана радиационно-гигиеническая оценка современного состояния источников питьевого водоснабжения населения в зоне наблюдения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов. На примере тестовых населенных пунктов, расположенных на разном расстоянии и направлениях от радиационно-опасных объектов, определено содержание природных (^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th) и техногенных (^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am) радионуклидов в питьевой воде водопроводов, скважин и колодцев. Результаты мониторинга источников водопользования в 2012–2013 гг. и в 2019 г. показали радиационную безопасность питьевых вод в регионе Белоярской АЭС по ряду критериев. Так, максимальные уровни удельной суммарной альфа-активности радионуклидов в пробах были в 3,9 раза ниже критерия предварительной оценки соответствия воды требованиям радиационной безопасности (0,2 Бк/кг), удельной суммарной бета-активности — в 5,7 раза меньше данного критерия (1 Бк/кг). За весь период наблюдений ни в одной из проб питьевых вод не были превышены как уровни вмешательства по отдельным радионуклидам, определенные Приложением 2а к НРБ-99/2009, так и критерий соответствия питьевой воды требованиям радиационной безопасности — сумма отношений удельных активностей радионуклидов к уровням вмешательства не превышала 1. Содержание природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде района Белоярской АЭС снижается в ряду: колодцы > скважины > водопроводы. Показано уменьшение за последние 20 лет удельной активности трития в питьевой воде района Белоярской АЭС на 20–35% в зависимости от источника водоснабжения. Отмечено, что начало эксплуатации реактора БН-800 не привело к увеличению содержания техногенных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs) в подземных водах. Средняя годовая эффективная доза внутреннего облучения населения от потребления питьевой воды в зоне потенциального влияния Белоярской АЭС составляет 0,05 мЗв, по консервативным оценкам — 0,07 мЗв, что ниже референтного дозового уровня ожидаемой эффективной дозы за счет потребления питьевой воды в течение одного года (0,1 мЗв/год), рекомендованного ВОЗ. Основной вклад в формирование средней годовой эффективной дозы внутреннего облучения населения (98,9%) от потребления питьевой воды в районе Белоярской АЭС вносят природные радионуклиды. Наибольший вклад в дозу внутреннего облучения за счет потребления питьевой воды от природных радиоизотопов вносит ^{210}Po — 43%, несколько меньший ^{210}Pb — 25%. На третьем месте в дозоформировании от природных радионуклидов находятся: ^{234}U (8%), ^{228}Ra (7%), ^{226}Ra (6%) и ^{230}Th (6%). Роль остальных природных радиоизотопов в формировании дозы внутреннего облучения от потребления питьевой воды не превышает 2–3%. Вклад техногенных радионуклидов в среднюю годовую эффективную дозу от потребления питьевой воды ничтожно мал (около 1%). От техногенной компоненты наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят ^{90}Sr (60%), ^3H (20%) и ^{241}Am (12%).

Ключевые слова: радиационный контроль, подземные воды, водопровод, скважина, колодец, природные и техногенные радионуклиды, удельная активность, радиационно-гигиеническая оценка, уровни вмешательства, доза облучения за счет потребления питьевой воды.

Введение

Питьевая вода — это один из наиболее ценных природных ресурсов, от качества которого напрямую зависит здоровье и нормальная жизнедеятельность человека. Поэтому к обеспечению приемлемого уровня безопасности питьевой

воды предъявляются специальные требования, как во многих развитых странах мира, так и на международном уровне [1]. Одним из важных контролируемых показателей качества питьевой воды является радиоактивность, обусловленная наличием в ней природных и техногенных радионуклидов.

Панов Алексей Валерьевич

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии

Адрес для переписки: 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: riar@mail.ru

Радиационный контроль источников питьевого водоснабжения, наряду с оценкой содержания радиоизотопов в почве, атмосферном воздухе и продуктах питания, включен в систему обеспечения радиационной безопасности населения. Подходы к нормированию допустимой удельной активности радионуклидов в питьевой воде, методология организации радиационного контроля и проведения мониторинга источников питьевого водоснабжения, а также методы идентификации радиоизотопов в последние десятилетия активно развиваются в США, Канаде, Австралии, странах ЕС, Турции, Индии [2] и России [3, 4]. Например, для природных радионуклидов ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb , содержащихся в питьевой воде и характеризующихся высокими индексами радиотоксичности [5], в Нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009¹ установлены наиболее жесткие уровни нормирования уделяется минеральной питьевой воде, которая, с одной стороны, имеет повышенное содержание природных радиоизотопов, и ее потребление влияет на формирование дозы внутреннего облучения человека, с другой – она обладает положительным терапевтическим эффектом и используется в медицине [6].

Особенно значим вклад в дозу внутреннего облучения от поступления в организм человека с питьевой водой природных радионуклидов рядов урана и тория, попадающих в водоносные слои при их выщелачивании из водовмещающих пород. Необходимо отметить, что в подземных водах нарушено равновесие радиоизотопов в уран-ториевых рядах, что определяется физико-химическими процессами в жидкой и твердой фазах, а также на границе вода – горная порода [2].

Питьевая вода на схожей территории может иметь не только разную удельную активность природных радионуклидов, но и отличающийся радиоизотопный состав. Это обусловлено концентрацией радионуклидов в породах, гидравлическим взаимодействием разных водоносных горизонтов, проницаемостью тектонических зон, «окнами» в водоупорных пластах и другими факторами [7]. Например, в относительно небольшой по площади Финляндии содержание природных радионуклидов в питьевой воде разных районов страны отличается на несколько порядков величин. Диапазон

вариации удельной активности ^{238}U в финской питьевой воде составляет 0,0005–150 Бк/кг; ^{226}Ra – 0,01–49 Бк/кг; ^{210}Pb – 0,0002–21 Бк/кг; ^{210}Po – 0,0002–7,6 Бк/кг; ^{228}Ra – 0,018–0,57 Бк/кг [8]. В России содержание природных радионуклидов в питьевых водах также варьирует в широких пределах: ^{238}U – 0,002–3,7 Бк/кг; ^{226}Ra – 0,006–1,28 Бк/кг; ^{210}Pb – 0,002–0,04 Бк/кг; ^{210}Po – 0,002–0,48 Бк/кг; ^{228}Ra – 0,002–0,32 Бк/кг [9]. Большой разброс значений удельной активности природных радиоизотопов в питьевой воде России определяет вариабельность формирующихся при ее употреблении доз внутреннего облучения человека: 0,003–0,5 мЗв/год [9]. Таким образом, на содержание природных радионуклидов в подземных водах и дозоформирование населения от потребления питьевых вод влияет комплекс физико-химических, физико-географических, геологических, гидрологических, биологических и других факторов [10, 11].

Второй важной задачей по обеспечению радиационной безопасности человека при потреблении питьевой воды является радиационный контроль источников водопользования в регионах размещения радиационно-опасных объектов, поскольку содержание техногенных радионуклидов в воде может повышаться вследствие их поступления в окружающую среду в результате радиационных аварий, сбросов и выбросов предприятий атомной энергетики, неправильной эксплуатации ядерных установок^{2,3}.

Особенно актуальна данная проблема для районов расположения атомных электростанций, так как сбросы техногенных радионуклидов АЭС в грунтовые воды, их миграция и накопление в водовмещающих породах могут стать дополнительным фактором, влияющим на увеличение дозы внутреннего облучения населения при потреблении питьевой воды из источников водоснабжения, находящихся в зоне влияния радиационно-опасного объекта. Например, в районе размещения Белоярской АЭС (БАЭС) обнаружена прямая корреляция между содержанием в питьевой воде (хотя и ниже УВ) одного из наиболее радиологически значимых радионуклидов – трития (^3H) и его концентрацией в моче людей, проживающих в регионе расположения атомной электростанции [12].

Район Белоярской АЭС БАЭС представляет интерес для изучения особенностей влияния природной и техно-

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009" (In Russ.)].

² МУ 2.6.1.1981-05 Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов: методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2005. 39 с. [Guidelines 2.6.1.1981-05 Radiation control and hygienic assessment of drinking water supply and drinking water sources according to radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water supply sources with an increased content of radionuclides. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2005:39 (In Russ.)]

³ МУ 2.6.1.2713-10 Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. Изм. 1 к МУ 2.6.1.1981-05: Методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 12 с. [Guidelines 2.6.1.2713-10 Radiation control and hygienic assessment of drinking water supply and drinking water sources according to radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water supply sources with an increased content of radionuclides. Changes to Guidelines 2.6.1.1981-05. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor. 2011:12 (In Russ.)]

генной компонент на дозоформирование населения от потребления питьевой воды. БАЭС расположена на Урале (Свердловская область), в 42 км от г. Екатеринбурга. Водонесущие горизонты Уральского региона характеризуются присутствием горных пород с повышенным содержанием радионуклидов уран-ториевого рядов, а также наличием так называемых «радоновых аномалий» [13]. Белоярская АЭС является одной из старейших в России (начало эксплуатации с 1964 г.) и имеет в своем составе 4 энергоблока: АМБ-100 и АМБ-200 остановлены и находятся на стадии вывода из эксплуатации, БН-600 и БН-800 в настоящее время эксплуатируются. На площадке БАЭС расположен АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ) с действующим исследовательским реактором ИВВ-2М (запущен в 1966 г.). Радионуклидный состав выбросов ИРМ схож с таковыми БАЭС, а сбросные технологические воды от эксплуатирующихся реакторов этих объектов атомной энергетики объединены в единую систему. Поэтому при оценке воздействия на окружающую среду от сбросов и выбросов радионуклидов, БАЭС и ИРМ рассматриваются как один объект.

Радиационный мониторинг подземных вод в зоне влияния Белоярской АЭС проводится более 40 лет и был всегда ориентирован на идентификацию техногенного загрязнения. Так, в 1981–1989 гг. в питьевой воде района расположения БАЭС обнаруживались повышенные концентрации трития (от 11 до 49 Бк/кг). Среднее содержание этого радионуклида в воде колодцев составляло 30 ± 2 Бк/кг, скважин 26 ± 2 Бк/кг, что в 5–6 раз превышало техногенный фон, характерный для Уральского региона [14]. Высокие уровни удельной активности ^3H в питьевой воде района БАЭС в тот период были обусловлены эксплуатацией первых двух реакторов АМБ-100 (1964–1981 гг.) и АМБ-200 (1967–1989 гг.), а именно повышенными сбросами радионуклидов в водные экосистемы и несовершенством систем очистки сбросных технологических вод. В более поздних исследованиях (1996–2005 гг.) отмечалось некоторое снижение удельной активности трития в питьевой воде: до 2–25 Бк/кг в воде колодцев и 1–22 Бк/кг в воде скважин [15], что связано с остановкой реакторов АМБ и существенно меньшими сбросами данного радионуклида от эксплуатации более безопасного и конструктивно совершенного реактора БН-600.

Ранее нами была проведена комплексная радиационно-гигиеническая оценка качества сельскохозяйственных и природных пищевых продуктов в районе расположения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов [16]. Однако потребление питьевой воды так же, как и потребление продуктов питания, является важным путем поступления радионуклидов в организм человека. Представленный обзор исторических аспектов техногенного загрязнения источников водопользования в районе расположения БАЭС и ИРМ ставит задачу современной радиационной оценки показателей качества питьевой воды, а также ее роли в дозоформировании населения, проживающего в зоне потенциального влияния радиационно-опасных объектов.

Цель исследования – оценка радиационной безопасности использования источников питьевого водоснабжения в районе расположения Белоярской АЭС и Института реакторных материалов.

Задачи исследования

1. Сравнительный анализ различных источников водопользования и их размещения в зоне влияния Белоярской АЭС как факторов, определяющих содержание природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде.

2. Оценка динамики удельной активности техногенных радионуклидов в подземных водах региона Белоярской АЭС во времени и влияния начала эксплуатации нового реактора БН-800 на дополнительное поступление радиоизотопов ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^3H в питьевую воду.

3. Радиационно-гигиеническая оценка соответствия содержания природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде района размещения Белоярской АЭС требованиям НРБ-99/2009.

4. Определение дозовой нагрузки на население от потребления питьевой воды в районе расположения Белоярской АЭС, а также рейтинга природных и техногенных радионуклидов по вкладу в дозу внутреннего облучения.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны 10 тестовых населенных пунктов и одна база отдыха (база «Путеец»), входящих в 13-километровую зону наблюдения Белоярской АЭС, расположенных на разном расстоянии и направлениях от атомной электростанции. Отобранные для мониторинга населенные пункты являются наиболее представительными с точки зрения источников водопользования городского и сельского населения. База «Путеец» находится вблизи БАЭС на западном берегу Белоярского водохранилища, где размещены множество других рекреационных зон, использующихся населением региона атомной электростанции для отдыха. Как правило, обязательному радиационному контролю подлежит питьевая вода из источников централизованного водоснабжения (водопроводов), в то время как индивидуальные скважины или колодцы в небольших населенных пунктах проверяются нерегулярно или не входят в состав сети мониторинга. Поэтому для более полного охвата источников водопользования района БАЭС все тестовые населенные пункты были разделены на три группы по типу контролируемых систем водоснабжения: водопровод, скважина, колодец (табл. 1).

Мониторинговые исследования подземных вод района БАЭС, включающие контроль широкого спектра природных (^{234}U , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{228}Th , ^{230}Th , ^{232}Th) и техногенных (^3H , ^{14}C , ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{241}Am) радионуклидов проводились в 2012–2013 гг. до ввода в эксплуатацию реактора БН-800 атомной электростанции. В 2019 г., т.е. через 3 года после начала работы нового энергоблока, мониторинговые работы были продолжены. Оценивалась удельная активность в питьевой воде наиболее радиологически значимых техногенных радионуклидов: ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^3H . Для оптимизации проведения мониторинга в 2019 г. природные радиоизотопы уже не контролировались, поскольку их концентрация в подземных водах подвержена малой вариабельности по годам, согласно работе [17].

Населенные пункты сети радиационного мониторинга питьевой воды в районе Белоярской АЭС

Таблица 1

[Table 1]

Settlements of the drinking water radiation monitoring network in the vicinity of the Beloyarsk NPP

Источник водоснабжения [Source of water supply]					
Водопровод [Tap water]		Скважина [Water borehole]		Колодец [Water well]	
Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]	Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]	Населенный пункт [Settlement]	Направление и расстояние от АЭС, км [Direction and distance from NPP, km]
Заречный [Zarechny]	Ю, 3,5 [S, 3,5]	База отдыха «Путеец» [Recreation "Navyu"]	Ю-З, 5,2 [S-W, 5,2]	Режик [Rezhik]	В, 4,5 [E, 4,5]
Малиновка [Malinovka]	В, 11,5 [E, 11,5]	Боярка [Boyarka]	Ю, 8,5 [S, 8,5]	Каменка [Kamenka]	С-В, 9,0 [N-E, 9,0]
Белоярский [Beloyarsky]	Ю-В, 12,5 [S-E, 12,5]	Гарарка [Gagarka]	Ю-З, 10 [S-W, 10]	Ялунина [Yalunina]	Ю-В, 9,5 [S-E, 9,5]
–	–	Мезенское [Mezenskoe]	Ю, 12 [S, 12]	Курманка [Kurmanka]	Ю, 10,5 [S, 10,5]

Отбор проб питьевой воды на всех этапах исследования проводили в летний период (июль – август), т.к. ранее было установлено отсутствие значимых колебаний содержания радионуклидов в подземных водах [17]. При отборе проб питьевая вода сливалась в течение 5 мин для стабилизации характеристик. Пробы воды отбирали в новые пластиковые флаги и сразу подкисляли небольшим количеством кислоты, предотвращая сорбцию радионуклидов на стенках сосудов. Для получения объективных результатов все пробы воды отбирали в двух параллельных повторностях по 200 л в каждой.

Определение удельной активности радионуклидов в питьевой воде проводилось в аккредитованных лабораториях ФГБУН ИЗЭИЖ УрО РАН (аттестат № САРК RU.0001.441492) и ФГБНУ ВНИИРАЭ (аттестат № RA.RU.21AD81) с межлабораторным сравнительным анализом полученных результатов. В лабораторных условиях пробы воды выпаривали до сухого остатка. Для определения содержания радиоизотопов в питьевой воде использовали высокочувствительные радиометрические и спектрометрические комплексы. Гамма-излучающие радионуклиды определяли на спектрометре ГАММА-1П с двумя измерительными трактами с полупроводниковыми детекторами из особо чистого германия («ЛСРМ», Россия, «EG&G ORTEC», США) и многоканальном гамма-спектрометре CANBERRA («Canberra Industries, Inc.», США). Альфа- и бета-активность препаратов измеряли на жидкосцинтилляционном спектрометре TRI-CARB 4810 TR («Perkin Elmer», США), жидкосцинтилляционном спектрометрическом комплексе СК-07П-Б11 («Green Star», Россия) и альфа-бета-радиометре с кремниевым детектором УМФ-2000 (НПП «Доза», Россия). Относительная погрешность

измерений активности радиоизотопов составляла не более 30% в зависимости от используемого прибора и метода измерения.

В период исследований 2019 г. в пробах подземных вод определяли их физико-химические показатели многопараметрическим прибором оценки качества воды U-52 (Horiga, Япония). Средняя температура питьевой воды в момент отбора варьировала в пределах +12...+15 °С (табл. 2). По всем характеристикам, за исключением окислительно-восстановительного потенциала и растворенного кислорода, водопроводная и колодезная вода были схожи. Питьевая вода с наименьшими показателями мутности наблюдалась в скважинах. Во всех источниках водоснабжения отобранные пробы питьевой воды являлись слабо минерализованными (менее 1 г/л), что предвещало о пониженном содержании в ней природных радионуклидов.

Определение качества и безопасности питьевой воды по радиационным показателям проводили в соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2800-10⁴. Измеренные удельные активности природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде сравнивали с соответствующими уровнями вмешательства по Приложению 2а к НРБ-99/2009⁵. Радиационную безопасность источников питьевого водоснабжения региона БАЭС и ИРМ оценивали на основе комплекса критериев: удельной суммарной альфа- и бета-активности радионуклидов в питьевой воде, соответствия удельной активности радионуклидов уровням вмешательства, а также по дозам внутреннего облучения населения при потреблении питьевой воды. Многолетние мониторинговые исследования позволили

⁴ СанПиН 2.6.1.2800-10 «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2800-10 "Hygienic requirements to limitation of population exposure from natural ionizing irradiation sources" (In Russ.)].

⁵ СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009 [Sanitary Rules and Norms 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standard NRB-99/2009" (In Russ.)].

Физико-химические свойства питьевой воды в районе Белоярской АЭС на момент отбора проб в период 22–25 июля 2019 г.

Таблица 2

[Table 2]

Physical and chemical properties of drinking waters in the vicinity of the Beloyarsk NPP in the period of sampling 22-25 July 2019

Показатель [Indicator]	Источник водоснабжения [Source of water supply]		
	Водопровод [Tap water]	Скважина [Water borehole]	Колодец [Water well]
Температура, °C [Temperature, °C]	13,8±3,4	12,1±1,4	15,1±2,3
Водородный показатель (pH) [Hydrogen indicator (pH)]	6,6±0,3	6,2±0,2	6,7±0,2
Окислительно-восстановительный потенциал, мВ [Redox potential, mV]	182±62	210±23	231±51
Удельная электропроводность, мкС/см [Electrical conductivity, mcC/cm]	0,41±0,15	0,30±0,12	0,45±0,24
Мутность, ЕМФ [Turbidity, EMF]	0,6±0,6	0,3±0,2	0,7±0,6
Растворенный кислород, мг/л [Dissolved oxygen, mg/L]	4,9±0,9	6,0±3,0	7,1±2,4
Общее содержание растворенных твердых веществ, г/л [Total dissolved substance, g/L]	0,26±0,09	0,20±0,08	0,29±0,15

определить не только состояние источников водопользования по радиационным показателям при штатной эксплуатации БАЭС и ИРМ, но и влияние работы нового реактора БН-800 на динамику содержания техногенных радионуклидов в питьевой воде района размещения радиационно-опасных объектов.

Результаты и обсуждение

На первом этапе анализа результатов измерений была проведена оценка радиационной безопасности питьевой воды водопроводов (табл. 3), скважин (табл. 4) и колодцев (табл. 5) тестовых населенных пунктов по интегральным

Удельная активность радионуклидов в питьевой воде водопроводов населенных пунктов района Белоярской АЭС в 2012–2013 гг., Бк/кг

Таблица 3

[Table 3]

Specific activity of radionuclides in drinking water from tap water of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP in 2012–2013, Bq/kg

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Заречный [Zarechny]	Малиновка [Malinovka]	Белоярский [Beloyarsky]	
Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности [Preliminary assessment of water quality in terms of radiation safety indicators]				
$\Sigma\alpha$ -активность [$\Sigma\alpha$ -activity]	0,05±0,01	0,015±0,0004	0,02±0,005	0,2
$\Sigma\beta$ -активность [$\Sigma\beta$ -activity]	0,17±0,01	0,029±0,002	0,09±0,006	1,0
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ высокая [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is high]				
²³⁴ U	–	0,08±0,04	<0,12	2,8
²³⁸ U	–	0,008±0,004	0,008±0,005	3,0
²²⁶ Ra	<0,05	<0,01	<0,01	0,49
²²⁸ Ra	<0,05	<0,0009	<0,0009	0,2
²¹⁰ Po	–	0,02	0,02	0,11
²²² Rn	2,1±0,8	2,9±1,2	<3,0	60
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ возможна в отдельных случаях [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is possible in some cases]				
²¹⁰ Pb	–	0,02	0,02	0,2
²²⁸ Th	–	0,014±0,05	0,017±0,003	1,9

Окончание таблицы 3

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Заречный [Zarechny]	Малиновка [Malinovka]	Белоярский [Beloyarsky]	
²³⁰ Th	–	0,013±0,002	0,008±0,002	0,65
²³² Th	–	<0,014	<0,014	0,6
Радионуклиды, контроль за которыми осуществляется в зонах наблюдения радиационных объектов [The radionuclides, which are monitored in areas of observation of radiation facilities]				
³ H	5,9±1,3 (6,3±4,8*)	11,1±1,1 (7,3±2,5)	5,2±1,2 (7,1±1,3)	7 600
¹⁴ C	–	<0,007	<0,007	240
⁶⁰ Co	<0,0006	<0,0006	<0,0006	40
⁹⁰ Sr	<0,0005 (0,009±0,001)	0,03±0,004 (0,01±0,001)	0,015±0,001 (0,009±0,003)	4,9
¹³⁴ Cs	–	<0,0004	0,0004±0,0003	7,2
¹³⁷ Cs	0,003±0,0005 (0,004±0,002)	0,003±0,001 (<0,0005)	0,004±0,001 (0,003±0,001)	11
²³⁸ Pu	–	0,00001	0,0002	0,6
^{239,240} Pu	–	0,00002	0,00002	0,55
²⁴¹ Am	–	<0,0004	<0,0004	0,69

* – в скобках результаты 2019 г. [in brackets results of 2019].

Таблица 4

**Удельная активность радионуклидов в питьевой воде скважин населенных пунктов района Белоярской АЭС
в 2012–2013 гг., Бк/кг**

[Table 4]

**Specific activity of radionuclides in drinking water from water borehole of settlements in the vicinity
of the Beloyarsk NPP in 2012–2013 Bq/kg**

Радионуклид [Radionuclide]	База отдыха «Путеец» [Recreation "Navy"]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
		Боярка [Boyarka]	Гагарка [Gagarka]	Мезенское [Mezenskoe]	
Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности [Preliminary assessment of water quality in terms of radiation safety indicators]					
Σα-активность [Σα-activity]	–	0,03±0,01	–	0,02±0,005	0,2
Σβ-активность [Σβ-activity]	–	0,18±0,03	–	0,07±0,004	1,0
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ высокая [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is high]					
²³⁴ U	–	–	–	<0,07	2,8
²³⁸ U	–	–	–	0,008±0,004	3,0
²²⁶ Ra	<0,05	–	–	<0,005	0,49
²²⁸ Ra	<0,05	–	–	<0,001	0,2
²¹⁰ Po	–	–	–	0,03	0,11
²²² Rn	–	4,1±1,6	–	<3,0	60
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ возможна в отдельных случаях [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is possible in some cases]					
²¹⁰ Pb	–	–	–	0,03	0,2
²²⁸ Th	–	–	–	0,01±0,001	1,9
²³⁰ Th	–	–	–	0,02±0,0008	0,65
²³² Th	–	–	–	<0,005	0,6

Окончание таблицы 4

Радионуклид [Radionuclide]	База отдыха «Путеец» [Recreation “Navy”]	Населенный пункт [Settlement]			Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
		Боярка [Boyarka]	Гагарка [Gagarka]	Мезенское [Mezenskoe]	
Радионуклиды, контроль за которыми осуществляется в зонах наблюдения радиационных объектов [The radionuclides, which are monitored in areas of observation of radiation facilities]					
³ H	6,1±1,4 (4,7±1,3*)	5,6±1,3 (4,8±2,1)	5,2±0,7 (7,0±0,8)	11,3±1,6 (8,6±2,5)	7 600
¹⁴ C	–	–	–	<0,007	240
⁶⁰ Co	–	–	–	<0,0003	40
⁹⁰ Sr	–	<0,0005	–	0,021±0,003	4,9
¹³⁴ Cs	–	–	–	0,0002±0,0001	7,2
¹³⁷ Cs	0,005±0,001 (0,007±0,002)	0,004±0,002 (0,002±0,0005)	0,004±0,001 (0,005±0,002)	0,002±0,0005	11
²³⁸ Pu	–	–	–	0,000024	0,6
^{239,240} Pu	–	–	–	0,000015	0,55
²⁴¹ Am	–	–	–	<0,00023	0,69

* – в скобках результаты 2019 г. [in brackets results of 2019].

Таблица 5

**Удельная активность радионуклидов в питьевой воде колодцев населенных пунктов района Белоярской АЭС
в 2012–2013 гг., Бк/кг**

[Table 5]

**Specific activity of radionuclides in drinking water from water well of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP,
2012–2013, Bq/kg]**

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]				Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Режик [Rezhik]	Каменка [Kamenka]	Ялунина [Yalunina]	Курманка [Kurmanka]	
Предварительная оценка качества воды по показателям радиационной безопасности [Preliminary assessment of water quality in terms of radiation safety indicators]					
$\Sigma\alpha$ -активность [$\Sigma\alpha$ -activity]	–	–	0,014±0,001	0,041±0,002	0,2
$\Sigma\beta$ -активность [$\Sigma\beta$ -activity]	–	–	0,064±0,006	0,041±0,001	1,0
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ высокая [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is high]					
^{234}U	–	–	<0,28	0,19±0,09	2,8
^{238}U	–	–	0,009±0,004	0,009±0,004	3,0
^{226}Ra	–	–	<0,017	<0,009	0,49
^{228}Ra	–	–	<0,0009	<0,0009	0,2
^{210}Po	–	–	0,026	0,034	0,11
^{222}Rn	3,1±1,2	–	3,9±1,6	3,9±1,6	60
Радионуклиды распространены повсеместно, вероятность превышения значений УВ возможна в отдельных случаях [The radionuclides are ubiquitous, the probability of exceeding the intervention level is possible in some cases]					
^{210}Pb	–	–	0,026	0,034	0,2
^{228}Th	–	–	0,03±0,005	0,014±0,004	1,9
^{230}Th	–	–	0,03±0,003	0,023±0,002	0,65
^{232}Th	–	–	<0,017	<0,009	0,6
Радионуклиды, контроль за которыми осуществляется в зонах наблюдения радиационных объектов [The radionuclides, which are monitored in areas of observation of radiation facilities]					
^3H	5,8±1,3 (7,1±1,7*)	6,4±1,4 (13,0±0,8)	8,7±0,9 (5,6±0,5)	13,2±1,1 (9,5±2,2)	7 600

Радионуклид [Radionuclide]	Населенный пункт [Settlement]				Уровень вмешательства, контрольный уровень (УВ, КУ) [Intervention, control level]
	Режик [Rezhik]	Каменка [Kamenka]	Ялунина [Yalunina]	Курманка [Kurmanka]	
^{14}C	–	–	<0,007	<0,007	240
^{60}Co	–	–	<0,001	<0,0005	40
^{90}Sr	–	–	0,02±0,0001 (0,01±0,008)	0,025±0,001	4,9
^{134}Cs	–	–	0,0009±0,0007	0,001±0,0003	7,2
^{137}Cs	0,004±0,002 (0,002±0,001)	0,005±0,002 (0,003±0,001)	0,006±0,002 (0,005±0,002)	0,002±0,0008	11
^{238}Pu	–	–	0,00001	0,000005	0,6
$^{239,240}\text{Pu}$	–	–	0,00002	0,000013	0,55
^{241}Am	–	–	<0,0009	<0,00048	0,69

* – в скобках результаты 2019 г. [in brackets results of 2019].

показателям: удельной суммарной альфа-активности (A_α), критерий соответствия требованиям радиационной безопасности (контрольный уровень – КУ) равен 0,2 Бк/кг и удельной суммарной бета-активности (A_β), критерий соответствия равен 1,0 Бк/кг. Целью такого скринингового анализа является предварительная оценка качества питьевой воды по радиационным показателям. В практике радиационного контроля источников водопотребления данный подход позволяет избежать большого количества дорогостоящих измерений широкого спектра природных и техногенных радионуклидов в воде при непревышении КУ по A_α и A_β , т.е. метод обычно используется как экономически обоснованный оценочный инструмент.

Из данных, приведенных в таблицах 3–5, видно, что показатели A_α радионуклидов в питьевой воде района БАЭС по источникам водопользования могут отличаться до 3,4 раза и составляют в среднем 0,03 Бк/кг при вариации 0,01–0,05 Бк/кг. Максимальное значение A_α зафиксировано в водопроводной воде г. Заречный, наиболее близко расположенного к БАЭС и ИРМ, однако этот показатель в 4 раза ниже соответствующего КУ. В работах [3, 18] на основе статистического анализа большой совокупности данных по A_α радиоизотопов в питьевой воде 14 субъектов Российской Федерации показано, что данный критерий оценки качества варьирует от 0,01 до 12,6 Бк/кг при среднем 0,5 Бк/кг. Таким образом, результаты измерений удельной суммарной альфа-активности радионуклидов в пробах питьевой воды района размещения БАЭС являются минимальными среди изученных регионов РФ и укладываются в 17% исследованных в них проб.

Среднее значение A_β радиоизотопов в питьевой воде тестовых населенных пунктов района БАЭС находится на уровне 0,09 Бк/кг и варьирует в диапазоне 0,03–0,18 Бк/кг, что в 5–30 раз ниже КУ (см. табл. 3–5). Максимальные показатели A_β зафиксированы в питьевой воде населенных пунктов Боярка и Заречный, расположенных в южном направлении от атомной электростанции. Среднероссийское значение удельной суммарной бета-активности радионуклидов в питьевых водах составляет 0,44 Бк/кг при вариативности 0,02–6,3 Бк/кг [3, 18], т.е.

результаты оценки качества подземных вод для района размещения БАЭС по данному критерию, так же, как и по A_α , находятся в нижней части диапазона, характерного для Российской Федерации.

Стоит отметить, что в ряде стран (например, в Канаде) скрининговые уровни удельной суммарных альфа- и бета-активностей радионуклидов в питьевых водах на практике используются мало, поскольку приведенные в нормативных документах значения референтных (ориентировочных) уровней иногда трактуются как жесткие и их возможное превышение вызывает тревогу в обществе [2].

Важной задачей настоящего исследования является определение типа источника водоснабжения в районе БАЭС, из которого в организм местных жителей поступает наибольшее количество радионуклидов с питьевой водой. На рисунке 1 показан сравнительный анализ A_α и A_β , а также удельной активности ряда природных (^{234}U , ^{210}Po , ^{210}Pb) и техногенных (^{90}Sr , ^{134}Cs , ^3H) радионуклидов в воде водопроводов, скважин и колодцев тестовых населенных пунктов. Видно, что содержание в питьевой воде колодцев некоторых природных радионуклидов на 28–86% выше, чем в водопроводной и скважинной воде. Концентрация основных радиологически значимых техногенных радионуклидов в колодезной воде также больше по сравнению с их концентрацией в воде из водопроводов и скважин на 4–67%. В то же время удельная суммарная бета-активность радиоизотопов в питьевой воде колодцев до 50% ниже, чем в воде водопроводов и скважин. Таким образом, содержание радионуклидов в питьевой воде из различных источников водоснабжения в регионе БАЭС характеризуется широкой вариативностью, а повышенные концентрации радиоизотопов, отмеченные в питьевой воде колодцев, можно объяснить более активной миграцией радионуклидов в грунтовых водах.

Второй немаловажный аспект анализа радиационной безопасности питьевой воды в районе БАЭС и ИРМ – это оценка сбросов техногенных радионуклидов от радиационно-опасных объектов в водные экосистемы (Белоярское водохранилище и Ольховскую болотно-речную систему), их миграция по водоносным горизонтам и накопление

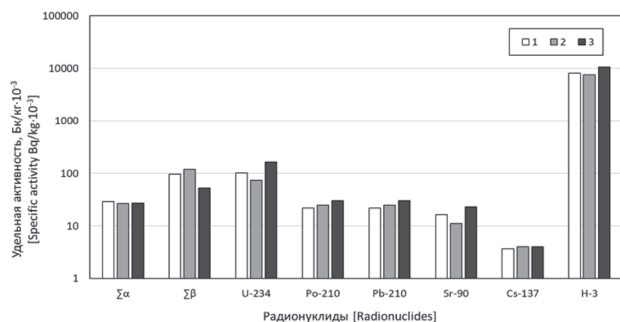


Рис. 1. Удельная активность радионуклидов в питьевой воде: 1 – водопроводов, 2 – скважин, 3 – колодцев населенных пунктов района Белоярской АЭС

[Fig. 1. Specific activity of radionuclides in drinking water: 1 – tap water, 2 – water borehole, 3 – water well of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP]

в водовмещающих породах на различном расстоянии от атомной электростанции. Такой анализ провели для биофильного, радиологически значимого радионуклида – трития, который присутствует в составе выбросов и сбросов АЭС и является одним из ведущих загрязнителей водной среды от предприятий ядерной энергетики. Питьевая вода при этом может стать важным источником поступления данного техногенного радионуклида в организм человека. В работе [19] на примере протечек ^3H из регионального хранилища РАО показано, что, несмотря на хорошую миграционную способность, даже при высоких начальных концентрациях радионуклида (37 000 Бк/кг) его содержание в подземных водах падает до 290 Бк/кг через 2–4 км от источника загрязнения, а в водопроводной воде ближайших населенных пунктов составляет уже 3–5 Бк/кг.

Результаты измерений удельной активности трития в питьевой воде из различных источников водоснабжения в зоне наблюдения БАЭС как в 2013 г., так и в 2019 г. показали отсутствие прямой корреляции между содержанием данного радионуклида в подземных водах и расстоянием от атомной электростанции (рис. 2). Значения удельных активностей ^3H в питьевой воде колебались в пределах 5–13 Бк/кг и с увеличением расстояния от БАЭС в ряде населенных пунктов даже несколько возрастали. Это говорит о том, что даже в случае наличия тритиевого загрязнения на площадке БАЭС и ИРМ в пределах санитарно-защитной зоны дополнительный вклад данного радионуклида в уже существующий техногенный фон будет минимален.

В работе [15] были проведены аналогичные исследования в конце 1990-х – начале 2000-х гг. 20 лет назад содержание трития в питьевой воде скважин населенных пунктов Боярка (8 Бк/кг), Гагарка (14 Бк/кг), Мезенское (12 Бк/кг) было в среднем на 20% выше, чем в последние годы. В воде колодцев ситуация оказалась аналогичной. За последние 20 лет содержание трития в колодезной воде населенных пунктов Режик (9 Бк/кг в начале 2000-х гг.), Ялунина (11 Бк/кг), Курманка (19 Бк/кг) уменьшилось до 35%, что обусловлено как распадом радионуклида ($T = 12,3$ лет), так и значительно меньшими его сбросами и выбросами в окружающую среду от эксплуатации реакторов типа БН по сравнению с первыми энергоблоками АМБ.

Завершая рассмотрение аспектов влияния работы БАЭС на поступление техногенных радионуклидов в ис-

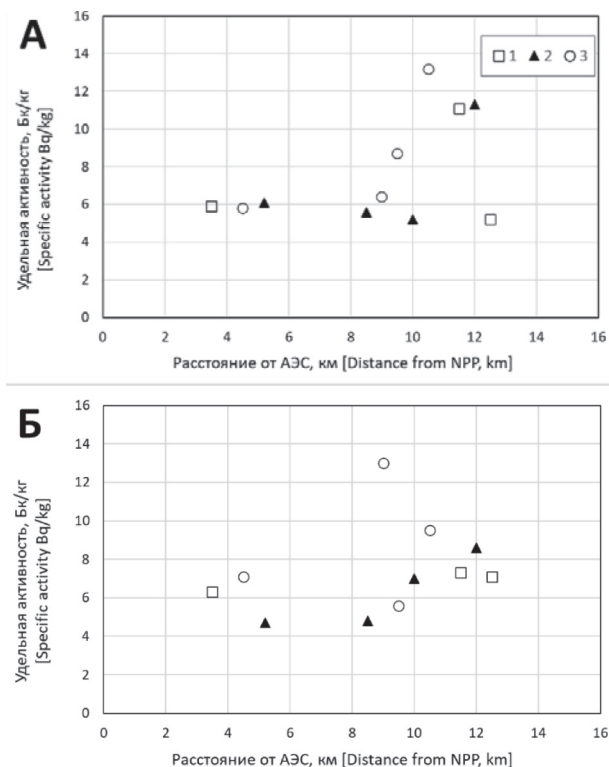


Рис. 2. Удельная активность ^3H (А – 2013 г., Б – 2019 г.)

в питьевой воде: 1 – водопроводов, 2 – скважин, 3 – колодцев населенных пунктов района Белоярской АЭС

[Fig. 2. Specific activity of ^3H (А – 2013, Б – 2019) in drinking water: 1 – tap water, 2 – water borehole, 3 – water well of settlements in the vicinity of the Beloyarsk NPP]

точники водопользования региона атомной станции, остановимся на динамике содержания наиболее радиологически значимых радионуклидов в питьевой воде за последние годы. Так, результаты 2013 г. дают информацию о влиянии на техногенное загрязнение питьевых вод от эксплуатации реактора БН-600, а данные 2019 г. демонстрируют сочетанный вклад в такое загрязнение от работы энергоблоков БН-600 и БН-800 (рис. 3).

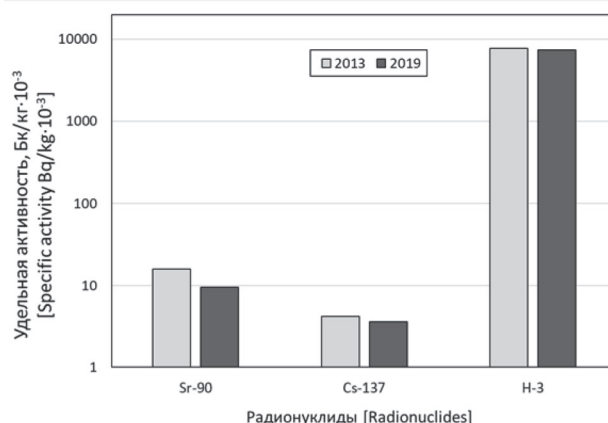


Рис. 3. Удельная активность техногенных радионуклидов в питьевой воде населенных пунктов района Белоярской АЭС в разные годы отбора проб

[Fig. 3. Specific activity of artificial radionuclides in drinking water of settlements in the vicinity of Beloyarsk the NPP in different years of taking samples]

Из данных, приведенных на рисунке 3, видно, что после начала промышленной эксплуатации реактора БН-800 удельная активность техногенных радионуклидов в питьевой воде несколько уменьшилась: ^{90}Sr до 39%, ^{137}Cs на 14%, ^3H около 4% (с учетом ошибок измерений). Эти результаты также показывают отсутствие значимого дополнительного поступления техногенных радиоизотопов в подземные воды после начала эксплуатации в 2016 г. нового реактора БН-800.

Несмотря на важность техногенного вклада в дозу внутреннего облучения населения от потребления питьевой воды, более значимым фактором дозоформирования будет являться содержание в подземных водах природных радионуклидов [9]. При этом необходимо учитывать не только радиационную опасность природных радиоизотопов, но и их роль как радиотоксикантов [5, 11]. Например, показатели удельной активности ^{234}U в пробах питьевой воды района расположения БАЭС варьируют от 0,07 Бк/кг до 0,19 Бк/кг при среднем значении 0,12 Бк/кг, а другого изотопа урана ^{238}U – в пределах 0,0082–0,0088 Бк/кг (среднее – 0,0084 Бк/кг). Соотношение удельных активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в среднем составляет 14,3, т.е. содержание изотопов урана в питьевой воде рассмотренного Уральского региона может отличаться до десяти раз. Аналогичные исследования, проведенные в Ленинградской области, показали, что если удельная активность ^{238}U в питьевой воде была сопоставима с нашими данными (в среднем 0,007 Бк/кг), то содержание изотопов урана ^{234}U в питьевой воде Ленинградской области было в 9 раз ниже (среднее 0,013 Бк/кг) по сравнению с Уралом, а соотношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ составляло 2,1 [11]. По всей видимости, на такие отличия оказывает влияние состав горных пород Уральского региона, с повышенными по сравнению с Ленинградской областью запасами ^{234}U .

Существенный вклад в формирование дозовой нагрузки на человека могут вносить изотопы природного радионуклида – радона. Поскольку на Урале отмечаются территории с высоким содержанием ^{222}Rn («радоновые аномалии»), при радиационном мониторинге подземных вод региона БАЭС необходимо обращать внимание на содержание в питьевой воде данного радионуклида. В измеренных пробах воды района БАЭС удельная активность ^{222}Rn находилась на уровне 2–4 Бк/кг вне зависимости от источника водоснабжения, что более чем в 15 раз ниже УВ для данного радионуклида. Радон является короткоживущим радионуклидом ($T_{1/2} = 3,82$ сут.), и при его распаде образуется долгоживущий изотоп ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ лет). Рассчитано, что при полном распаде радона, содержащегося в пробах питьевой воды региона БАЭС, в них накопится дополнительно 0,001–0,002 Бк/кг ^{210}Pb ,

что составит не более $6,1 \cdot 10^{-3}\%$ к уже присутствующему в воде радионуклиду и значительно не повлияет на риск превышения допустимого уровня вмешательства (0,2 Бк/кг) для данного радионуклида.

В 2012 г. параллельно с нашими исследованиями изучалось содержание радона в источниках питьевой воды г. Екатеринбурга [13]. В водопроводной воде столицы Свердловской области удельная активность ^{222}Rn находится на уровне 6,0 Бк/кг, что сопоставимо с полученными нами данными в регионе БАЭС, в воде скважин существенно выше – 21,4 Бк/кг. Максимальные уровни данного радионуклида отмечены в родниках вокруг Екатеринбурга (15–89 Бк/кг). Высокая удельная активность радона в родниковой воде ставит задачу в будущем провести радиационное обследование родников в районе БАЭС и по его результатам принять решение о необходимости включения данного типа источников питьевого водоснабжения населения в перечень контролируемых объектов водопользования данного региона.

При радиационном нормировании качества питьевой воды числовые значения уровней вмешательства (УВ) рассчитаны для каждого радионуклида так, чтобы при их непревышении среднегодовая эффективная доза облучения человека (СГЭД) от питьевой воды с учетом ее стандартного потребления (2 л/сут.) была ниже или равнялась порогу, равному 0,1 мЗв. Данный предел СГЭД рекомендован ВОЗ [1]. Для учета всего набора природных и техногенных радионуклидов, присутствующих в питьевой воде, сумма отношений удельной активности радиоизотопов к их уровням вмешательства не должна превышать 1, согласно формуле:

$$\sum_i^N A_i / \text{УВ}_i \leq 1$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида в питьевой воде, Бк/кг;

УВ_i – соответствующие уровни вмешательства, Бк/кг;

N – число радионуклидов, одновременно присутствующих в питьевой воде.

Удельная активность достаточно распространенного природного радионуклида ^{40}K во всех отобранных пробах питьевой воды региона БАЭС была ниже минимально детектируемых значений (1,5 Бк/кг). Сравнительный анализ содержания радионуклидов в питьевой воде района размещения БАЭС и ИРМ с соответствующими уровнями вмешательства показал, что ни по одному из них не было превышений УВ с большими коэффициентами запаса (табл. 6).

Так, максимальные зафиксированные значения удельной активности природных радионуклидов были ниже УВ:

Таблица 6

Диапазон величин суммы отношений удельных активностей радионуклидов в питьевой воде района Белоярской АЭС к соответствующим уровням вмешательства

[Table 6]

The range of radionuclides specific activities ratios in drinking water of the Beloyarsk NPP area to the corresponding of intervention levels]

Радионуклид [Radionuclide]	Источник водоснабжения [Source of water supply]		
	Водопровод [Tap water]	Скважина [Water borehole]	Колодец [Water well]
Природные радионуклиды [Natural radionuclides]			
^{234}U	0,03–0,04	0,03	0,05–0,07

Радионуклид [Radionuclide]	Источник водоснабжения [Source of water supply]		
	Водопровод [Tap water]	Скважина [Water borehole]	Колодец [Water well]
^{238}U	0,0027–0,0028	0,0028	0,0027–0,0029
^{226}Ra	0,02–0,05	0,01–0,05	0,02–0,04
^{228}Ra	0,005–0,13	0,005–0,13	0,005
^{210}Po	0,18–0,22	0,23	0,23–0,31
^{222}Rn	0,04–0,05	0,05–0,07	0,05–0,07
^{210}Pb	0,10–0,12	0,13	0,13–0,17
^{228}Th	0,007–0,009	0,005	0,007–0,016
^{230}Th	0,012–0,02	0,034	0,035–0,049
^{232}Th	0,023–0,024	0,009	0,015–0,028
$\Sigma(A_i/UB_i)$	0,42–0,66	0,49–0,67	0,55–0,74
Техногенные радионуклиды [Technogenic radionuclides]			
^3H	0,0008–0,002	0,0007–0,0015	0,0009–0,0017
^{14}C	0,00003	0,00003	0,00003
^{60}Co	0,00001–0,0002	0,000008	0,00001–0,00003
^{90}Sr	0,002–0,005	0,0001–0,004	0,004–0,005
^{134}Cs	0,00005	0,00003	0,00013–0,00014
^{137}Cs	0,0003–0,0004	0,0002–0,0006	0,0002–0,0006
^{238}Pu	0,00002–0,00004	0,00004	0,00001–0,00002
$^{239,240}\text{Pu}$	0,00003–0,00004	0,00003	0,00002–0,00003
^{241}Am	0,0006–0,0008	0,0003	0,0007–0,0013
$\Sigma(A_i/UB_i)$	0,004–0,008	0,002–0,007	0,006–0,009

^{234}U в 15 раз, ^{238}U в 340, ^{226}Ra в 20, ^{228}Ra в 8, ^{210}Po в 3, ^{222}Rn в 15, ^{210}Pb в 6, ^{228}Th в 60, ^{230}Th в 20 и ^{232}Th в 35 раз. Наиболее высокие уровни содержания в питьевой воде техногенных радионуклидов оказались меньше соответствующих УВ: ^3H в 575 раз, ^{14}C в 32,9 тыс., ^{60}Co в 33,3 тыс., ^{90}Sr в 190, ^{134}Cs в 7,2 тыс., ^{137}Cs в 1,7 тыс., ^{238}Pu в 25 тыс., $^{239,240}\text{Pu}$ в 27,5 тыс. и ^{241}Am в 790 раз. Стоит отметить, что по всем трем рассмотренным источникам водоснабжения сумма отношений удельных активностей природных и техногенных радионуклидов к соответствующим уровням вмешательства была ниже 1. Это говорит о радиационной безопас-

ности питьевой воды в районе расположения БАЭС и ИРМ из всех рассмотренных источников водопотребления.

Результаты мониторинга дали возможность оценить СГЭД внутреннего облучения населения, проживающего в регионе БАЭС, от потребления питьевой воды из обследованных водоисточников (табл. 7). Расчеты выполнены в соответствии с МУ 2.6.1.1981-05 и МУ 2.6.1.2713-10 с учетом ошибки измерений и допущением о потреблении жителями только местной питьевой воды. Из данных таблицы 7 видно, что даже в случае гипотетического (маловероятного) сценария потребления населением питьевой

Таблица 7

СГЭД внутреннего облучения населения за счет потребления питьевой воды из различных источников в районе Белоярской АЭС, мЗв/год

[Table 7]

Average annual effective dose of internal exposure of the population due to the consumption of drinking water from various sources in the vicinity of the Beloyarsk NPP, mSv/a]

Источник водоснабжения [Source of water supply]	Среднее значение СГЭД [Mean of average annual effective dose of internal exposure]	Диапазон СГЭД [Range of average annual effective dose of internal exposure]
Природные радионуклиды [Natural radionuclides]		
Водопровод [Tap water]	0,047	0,038–0,061
Скважина [Water borehole]	0,052	0,044–0,060
Колодец [Water well]	0,058	0,049–0,067

Источник водоснабжения [Source of water supply]	Среднее значение СГЭД [Mean of average annual effective dose of internal exposure]	Диапазон СГЭД [Range of average annual effective dose of internal exposure]
Техногенные радионуклиды [Technogenic radionuclides]		
Водопровод [Tap water]	0,00057	0,00037–0,00081
Скважина [Water borehole]	0,00040	0,00015–0,00068
Колодец [Water well]	0,00077	0,00064–0,00090

воды с максимальной удельной активностью радионуклидов СГЭД их внутреннего облучения от питьевой воды не превысит рекомендованный ВОЗ референтный дозовый уровень 0,1 мЗв/год. В реальных условиях формируемая дозовая нагрузка от потребления питьевой воды ниже референтного уровня в 1,5–2 раза, при этом максимальные дозы формируются при потреблении воды из колодцев, чуть меньше от воды из скважин и минимальная СГЭД будет при употреблении питьевой воды из водопроводов.

По данным работы [18], СГЭД от потребления питьевой воды населением Северо-Западного региона России (включая 5 субъектов РФ) составляет 0,19 мЗв/год при диапазоне 0,01–3,0 мЗв/год. В работе [9] даны оценки СГЭД населения 9 субъектов РФ, где рассчитана формируемая доза внутреннего облучения населения в диапазоне 0,012–0,1 мЗв/год. СГЭД населения в Челябинской области, наиболее близко расположенной к исследуемому в настоящей работе региону Урала, оценивается на уровне 0,044 мЗв/год при разбросе данных в пределах 0,012–0,086 мЗв/год, что очень близко к полученным нами значениям (0,039–0,068 мЗв/год).

Расчеты показали, что роль природных радионуклидов в формировании СГЭД внутреннего облучения населения при потреблении питьевой воды в регионе Белоярской АЭС является доминирующей – около 99%. Основной вклад в дозу вносит ^{210}Po – 43%, несколько меньший ^{210}Pb – 25% (рис. 4А). На третьем месте в дозоформировании находится ^{234}U – 8%. Роль радиоизотопов радия в формировании дозы внутреннего облучения примерно одинакова: от 6% (^{226}Ra) до 7% (^{228}Ra). Тот же вклад в СГЭД вносит и ^{230}Th – 6%. Роль остальных природных радионуклидов в формировании дозы внутреннего облучения от потребления питьевой воды незначительна (не выше 2–3%).

Техногенные радионуклиды, содержащиеся в питьевой воде района размещения Белоярской АЭС, дают пренебрежимо малый вклад в СГЭД внутреннего облучения местного населения – не более 0,9 мкЗв/год, или 1,2%. Среди искусственных радионуклидов максимальный вклад в дозу внутреннего облучения (около 60% от техногенной компоненты) вносит ^{90}Sr (рис. 4Б). На втором месте в формировании дозы внутреннего облучения от техногенных радионуклидов в питьевой воде находится ^3H – 20%, на третьей позиции ^{241}Am – 12% и далее ^{137}Cs – 6%. Роль остальных техногенных радионуклидов (^{14}C , ^{60}Co , ^{134}Cs , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$) в формировании дозы внутреннего облучения пренебрежимо мала и не превышает в отдельных случаях 5% от всей техногенной компоненты. В других регионах России вклад искусственных радионуклидов в СГЭД также минимален и составляет 0,2–2,2 мкЗв/год [9].

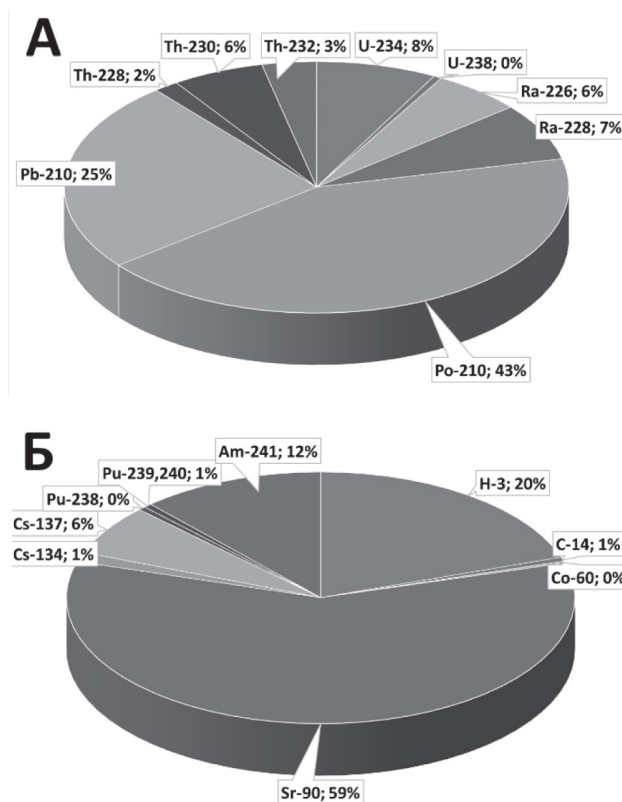


Рис. 4. Вклад природных (А) и техногенных (Б) радионуклидов в формирование СГЭД внутреннего облучения населения района Белоярской АЭС за счет потребления питьевой воды [Fig. 4. Contribution of natural (А) and technogenic (Б) radionuclides to the formation of the average annual effective dose of internal exposure of the population in the vicinity of the Beloyarsk NPP due to consumption of drinking water]

В исследовании [20] на примере питьевой водопроводной воды Словении показано, что основным дозообразующим радионуклидом в этом регионе является ^{210}Po (вклад в СГЭД 41%), несколько менее значимы ^{210}Pb и ^{228}Ra (вклад в СГЭД по 23%), на четвертом месте по значимости находится ^{226}Ra (9%). Схожие результаты по оценке вклада природных радионуклидов в СГЭД от потребления питьевой воды были получены в работе [21] для Финляндии, где отмечается, что до 90% СГЭД формируется за счет трех радионуклидов: ^{222}Rn (75%), ^{210}Po (12%) и ^{210}Pb (5%).

В регионах добычи минеральных питьевых вод основной вклад (более 97%) в дозу облучения пациентов

за счет потребления такой лечебной воды вносят 3 природных радионуклида: ^{226}Ra , ^{228}Ra и ^{222}Rn [11, 18]. Также в работе [9] отмечен высокий вклад данных радионуклидов в областях с повышенными уровнями СГЭД: Тверской (до 0,5 мЗв/год) и Курской (до 0,25 мЗв/год). В Республике Хакасия, где наблюдаются повышенные уровни удельной суммарной альфа-активности в питьевой воде (на уровне 0,3–3,5 Бк/кг при максимуме 5,6 Бк/кг), значительная роль в формировании СГЭД обусловлена радиоизотопами ^{234}U и ^{238}U [22]. Таким образом, каждая территория характеризуется определенным набором 3–4 специфичных природных радионуклидов, определяющих до 80–90% дозы внутреннего облучения при потреблении населением местной питьевой воды.

Результаты настоящего исследования, включающего мониторинг полного спектра контролируемых природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде зоны влияния Белоярской АЭС, могут являться основой для дальнейшей радиационной оценки качества источников питьевого водоснабжения в районе расположения атомной электростанции, анализа изменения радиологических показателей подземных вод по удельной суммарной альфа- и бета-активности с целью оптимизации ресурсов без проведения дорогостоящих радиохимических исследований состава и удельной активности радиоизотопов в питьевой воде.

Выводы

1. Скрининговые исследования питьевой воды водопроводов, скважин и колодцев тестовых населенных пунктов в зоне влияния Белоярской АЭС и Института реакторных материалов в 2012–2013 гг. показали, что максимальные значения удельной суммарной альфа-активности радионуклидов ниже контрольного уровня по данному показателю (0,2 Бк/кг) в 3,9 раза, максимальное значение удельной суммарной бета-активности радиоизотопов в 5,7 раза ниже контрольного уровня (1 Бк/кг), что говорит о радиационной безопасности источников питьевого водоснабжения обследованной территории.

2. Нив одной из проб питьевых вод региона Белоярской АЭС, отобранных с 2012 по 2019 гг., не превышены как уровни вмешательства по отдельным природным и техногенным радионуклидам, так и значения для условия соответствия воды требованиям радиационной безопасности по сумме отношений удельных активностей к уровням вмешательства (1), что подтверждает радиационную безопасность источников водопотребления.

3. По степени уменьшения удельной активности природных и техногенных радионуклидов в питьевой воде района размещения Белоярской АЭС источники водопользования можно расположить в ряд: колодцы > скважины > водопроводы.

4. Показано снижение за последние 20 лет содержания трития в питьевой воде региона БАЭС на 20–35% в зависимости от источника водоснабжения. Отмечено, что начало эксплуатации нового реактора БН-800 не привело к увеличению содержания техногенных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H) в подземных водах.

5. На основе результатов мониторинговых исследований рассчитана СГЭД внутреннего облучения населения от потребления питьевой воды в районе расположения Белоярской АЭС, которая составляет 0,05 мЗв. По

наиболее консервативным оценкам, значение данного показателя составляет 0,07 мЗв/год. Эта доза не превышает порог 0,1 мЗв/год, являющийся приемлемым, согласно российским нормативам (НРБ-99/2009) и рекомендации ВОЗ, что говорит о радиационной безопасности источников водоснабжения в зоне влияния атомной электростанции.

6. Показано, что основную роль в формировании СГЭД внутреннего облучения населения (98,9%) от потребления питьевой воды в районе размещения Белоярской АЭС играют природные радионуклиды. По величине вклада в формируемую дозу внутреннего облучения радиоизотопы природного происхождения можно расположить в ряд: $^{210}\text{Po} > ^{210}\text{Pb} > ^{234}\text{U} \geq ^{228}\text{Ra} \geq ^{226}\text{Ra} \geq ^{230}\text{Th} > ^{232}\text{Th} > ^{228}\text{Th} > ^{238}\text{U}$.

7. Вклад техногенных радионуклидов в дозоформирование от потребления питьевой воды в зоне влияния Белоярской АЭС ничтожно мал (около 1%). По степени вклада в СГЭД внутреннего облучения от потребления питьевой воды все техногенные радионуклиды можно расположить в ряд $^{90}\text{Sr} > ^3\text{H} > ^{241}\text{Am} > ^{137}\text{Cs} > ^{134}\text{Cs} > ^{14}\text{C} \geq ^{238}\text{Pu} \geq ^{239,240}\text{Pu} \geq ^{60}\text{Co}$.

8. Результаты многолетних мониторинговых наблюдений свидетельствуют об отсутствии за последние 10 лет значимого влияния сбросов и выбросов Белоярской АЭС и Института реакторных материалов на радиоактивное загрязнение источников питьевого водоснабжения в зоне влияния этих радиационно-опасных объектов.

9. Для уточнения перечня потенциальных путей поступления природных и техногенных радионуклидов в организм местного населения с питьевой водой необходимо провести радиационное обследование родников в районе расположения БАЭС для принятия решения о целесообразности включения данного типа водопользования в сеть мониторинга источников питьевого водоснабжения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00016).

Литература

1. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality – 4th ed. ISBN 978 92 4 154815 1. Geneva; 2011. 541 p.
2. Овсянникова Т.М. Радиационный контроль питьевых вод: нормирование и методы определения суммарных активностей (мировой опыт и тенденции) // АНРИ. 2011. №2(65). С. 2-15.
3. Романович И.К., Кадука М.В., Гончарова Ю.Н., и др. К обоснованию числового значения критерия предварительной оценки качества питьевой воды по удельной суммарной альфа-активности // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3. С. 11-14.
4. Стамат И.П., Романович И.К., Горский Г.А. Обоснование к введению нормирования содержания радионуклидов в питьевой воде по взрослому населению // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3. С. 20-25.
5. Вредные химические вещества: справочник / под ред. В.А. Филова. СПб: Химия, 1994. 686 с.
6. Стамат И.П., Ступина В.В. О нормировании показателей радиационной безопасности минеральных природных вод // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 2. С. 30-36.
7. Салдан И.П., Баландович Б.А., Поцелуев Н.Ю. Гигиеническая оценка удельной активности природных радионуклидов в воде источников питьевого водоснабжения // Здоровье населения и среда обитания. 2015. №10 (271). С. 29-34.

8. United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York, 2000. P. 84-156.
9. Гончарова Ю.Н., Басалаева Л.Н., Кадука М.В., и др. Оценка доз внутреннего облучения населения различных регионов Российской Федерации природными и техногенными радионуклидами за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 2. С. 39-44.
10. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с.
11. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А., и др. Содержание изотопов урана в подземных источниках водоснабжения населения Ленинградской области и Санкт-Петербурга // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 3. С. 74-82. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-74-82
12. Чеботина М.Я., Николин О.А., Бондарева Л.Г., Ракитский В.Н. Тритий в моче людей в зоне влияния Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 87-92. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92>
13. Семенищев В.С., Воронина А.В., Никифоров А.Ф. Определение Радона-222 в природных источниках питьевой воды в окрестностях города Екатеринбурга // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. №4. С. 95-101.
14. Чеботина М.Я., Николин О.А. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 91 с.
15. Чеботина М.Я. Поступление трития из водоема-охладителя в источники питьевого водоснабжения путем фильтрации через глубинные слои подстилающих пород // Доклады академии наук. 2011. Т. 438, №5. С. 675-677.
16. Панов А.В., Трапезников А.В., Исамов Н.Н., и др. Оценка влияния эксплуатации реактора БН-800 на содержание радионуклидов в местных продуктах питания района Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 38-50. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50
17. Гончарова Ю.Н., Швыдко Н.С., Кадука А.Н. Исследование сезонной и долгосрочной вариабельности удельной активности природных радионуклидов подземных вод // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 1. С. 17-23.
18. Кадука М.В., Швыдко Н.С., Шутов В.Н., и др. Оценка доз облучения населения северо-западного региона России за счет потребления питьевой воды // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 23-27.
19. Момот О.А., Силин И.И., Сынзыныс Б.И., Козьмин Г.В. Оценка радиационного риска для здоровья населения при наличии трития в питьевой воде. Идентификация опасности // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2007. № 2. С. 84-91.
20. Benedik L., Jeran Z. Radiological of natural and mineral drinking waters in Slovenia // Radiation Protection Dosimetry. 2012. Vol. 151, No 2. P. 306-313.
21. Vesterbacka P. ²³⁸U-series radionuclides in Finnish ground-water-based drinking water and effective doses. Academic Dissertation. Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. University of Helsinki, Faculty of Science. Department of Chemistry, Laboratory of Radiochemistry, 2005. 94 p.
22. Пивоварова Е.А., Пивоваров А.А. Радиационно-гигиеническая оценка источников хозяйственно-питьевого водоснабжения населения на территории Республики Хакасия // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 3. С. 61-68. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-3-61-68>

Поступила: 05.10.2020 г.

Панов Алексей Валерьевич – доктор биологических наук, профессор Российской академии наук, заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии. **Адрес для переписки:** 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км; E-mail: riar@mail.ru

Трапезников Александр Викторович – доктор биологических наук, заведующий отделом континентальной радиологии Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук. Екатеринбург, Россия

Коржавин Александр Васильевич – кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Гешель Ирина Викторовна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Коровин Сергей Владимирович – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Эдомская Мария Александровна – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

Для цитирования: Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., Гешель И.В., Коровин С.В., Эдомская М.А. Радиационный мониторинг питьевой воды в районе Белоярской АЭС // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 86-101. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101

Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP

Alexey V. Panov ¹, Aleksandr V. Trapeznikov ², Aleksandr V. Korzhavin ², Irina V. Geshel ¹, Sergey V. Korovin ¹, Maria A. Edomskaia ¹

¹Russian Institute of radiology and agroecology, Obninsk, Russia

²Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

The article provides a radiation-hygienic assessment of the current state of drinking water supply sources for the population in the observation area of the the Beloyarsk NPP and the Institute of Nuclear Materials. We determined the content of natural (²³⁴U, ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Po, ²²²Rn, ²¹⁰Pb, ²²⁸Th, ²³⁰Th, ²³²Th) and technogenic (³H, ¹⁴C, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ^{239,240}Pu, ²⁴¹Am) radionuclides in drinking water of tap water, water boreholes and water wells in test settlements located at different distances and directions from radiation hazardous facilities. Results of monitoring of water sources in 2012–2013 and 2019 showed the radiation safety of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP according to several criteria. Thus, the maximum levels of the gross specific alpha-activity of radionuclides in water samples were 3.9 times lower than the control level (0.2 Bq/kg), the gross specific beta-activity was 5.7 times lower than the control level (1 Bq/kg). Over the entire observation period, none of the drinking water samples exceeded the control levels both for individual radionuclides and for the sum of the ratios of specific activities to control levels. The content of natural and artificial radionuclides in drinking water near the Beloyarsk NPP decreases in the following order: water wells > water boreholes > tap water. For the past 20 years, there was a decrease in tritium specific activity in drinking water of the Beloyarsk NPP region by 20–35%, depending on the source of water supply. It was noted that the launch of the BN-800 reactor also did not lead to an increase in the content of other artificial radionuclides (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs) in groundwater. The average annual effective dose of internal exposure of the population due to drinking water consumption in the vicinity of the Beloyarsk NPP is 0.05 mSv, according to conservative estimates – 0.07 mSv, which is below the radiation safety threshold (0.1 mSv/a) recommended by the WHO. Natural radionuclides play the primary role in the formation of the annual average effective dose for internal irradiation (98.9%) due to drinking water consumption on the considered territories. ²¹⁰Po makes the largest contribution to the dose from natural radioisotopes – 43%, somewhat less is made by ²¹⁰Pb – 25%. The third place in the dose formation from natural radionuclides belongs to ²³⁴U (8%), ²²⁸Ra (7%), ²²⁶Ra (6%) and ²³⁰Th (6%). The contribution of other natural radioisotopes in the formation of the internal radiation dose from drinking water consumption does not exceed 2–3%. The contribution of technogenic radionuclides to the annual average effective dose from the consumption of drinking water is negligible (about 1%). Of the technogenic components, ⁹⁰Sr (60%), ³H (20%), and ²⁴¹Am (12%) play the most significant role in the formation of the internal exposure dose.

Key words: radiation control, underground water, tap water, water well, water hole, natural and technogenic radionuclides, specific activity, radiation-hygienic assessment, intervention level, exposure doses from drinking water consumption.

References

1. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality – 4th ed. ISBN 978 92 4 154815 1. Geneva; 2011. 541 p.
2. Ovsyannikova TM. The radioactive monitoring of drinking water: guidelines and methods of measuring of gross alpha and beta activities (worldwide practice and trends). *ANRI = ANRI*. 2011;2(65): 2-15 (In Russian)
3. Romanovich IK, Kaduka MV, Goncharova YuN, Shvydko NS, Shutov VN. On the substantiation of initial screening gross alpha activity concentration level for drinking water safety assessment establishment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 11-14 (In Russian)
4. Stamat IP, Romanovich IK, Gorsky GA. Justification to the introduction of regulation for radionuclide content in the drinking water according to adult population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 20-25 (In Russian)
5. Harmful chemicals: a handbook. Ed. by Filov VA. Saint-Petersburg: Chemistry; 1994. 686 p. (In Russian)
6. Stamat IP, Stupina VV. On standardization of radiation protection indexes of natural mineral waters. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(2): 30-36 (In Russian)
7. Saldan IP, Balandovich BA, Potseluev NYu. Hygienic evaluation of the specific activity of natural radionuclides in water of potable water supply. *Zdorovye naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment*. 2015;10(271): 29-34 (In Russian)
8. United Nations, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York; 2000. P. 84-156.

Alexey V. Panov

All Russian Institute of Radiology and Agroecology

Address for correspondence: Kiev highway, 109 km, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia; E-mail: riar@mail.ru

9. Goncharova YuN, Basalaeva LN, Kaduka MV, Shvydko NS, Kaduka AN. Estimation of the population exposure doses from natural and artificial radionuclides due to drinking-water consumption for the inhabitants of different areas of Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(2): 39-44 (In Russian)
10. Sapozhnikov YuA, Aliev RA, Kalmykov SN. Environmental radioactivity. Moscow, BINOM. Laboratory of knowledge; 2006. 286 p. (In Russian)
11. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV, et al. Content of uranium isotopes in the groundwater supplies used for population of Leningrad region and St-Petersburg. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(3): 74-82. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-3-74-82.
12. Chebotina MY, Nikolin OA, Bondareva LG, Rakitsky VN. Tritium in urine of people living in the area of influence of the Beloyarskaya NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 87-92. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92>.
13. Semenischev VS, Voronina AV, Nikiforov AF. Determination of Radon-222 in natural drinking water sources in outskirts of Ekaterinburg. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2014;4: 95-101 (In Russian)
14. Chebotina MY, Nikolin OA. Radioecological studies of tritium in the Ural region. Ekaterinburg: UB RAS; 2005. 91 p.
15. Chebotina MYa. Tritium inflow from the cooling pond to the sources of drinking water supply by filtration through the deep layers of the underlying rocks. *Doklady akademii nauk = Academy of Sciences Reports*. 2011;438(5): 675-677 (In Russian)
16. Panov AV, Trapeznikov AV, Isamov NN, Korzhavin AV, Kuznetsov VK, Geshel IV. Assessment of the impact of the BN-800 reactor operation on the radionuclides content in local foodstuffs in the vicinity of Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(3): 38-50. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-38-50.
17. Goncharova YuN, Shvydko NS, Kaduka AN. Investigation of season and long-term variations of natural radionuclides specific activity in underground water. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(1): 17-23. (In Russian)
18. Kaduka MV, Shvydko NS, Shutov VN, Basalaeva LN, Goncharova YuN, Salazkina NV, et al. Estimation of the population exposure doses from drinking-water consumption for the inhabitants of north-eastern area of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 23-27 (In Russian)
19. Momot OA, Silin II, Synzynys BI, Kozmin GV. Assessment of radiation risk for public health in the presence of tritium in drinking water. Hazard identification. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika = Nuclear Energy and Technology*. 2007;2: 84-91 (In Russian)
20. Benedik L, Jeran Z. Radiological of natural and mineral drinking waters in Slovenia. *Radiation Protection Dosimetry*. 2012;151(2): 306-313.
21. Vesterbacka P. ²³⁸U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses. Academic Dissertation. Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK. University of Helsinki, Faculty of Science. Department of Chemistry, Laboratory of Radiochemistry; 2005. 94 p.
22. Pivovarov EA, Pivovarov AA. The Radiological Hygienic Assessment of the Sources of Utility and Drinking Water Supply for the Population of Khakasia Republic. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(3): 61-68. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-3-61-68>.

Received: October 05, 2020

For correspondence: Alexey V. Panov – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director, All Russian Institute of Radiology and Agroecology (Kiev highway, 109 km, Obninsk, Kaluga Region, 249032, Russia; E-mail: riar@mail.ru)

Aleksandr V. Trapeznikov – Doctor of Biological Sciences, Head of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

Aleksandr V. Korzhavin – PhD. Veterinary Sciences, Chief Science Officer of the Continental radioecology Department of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural branch, Ekaterinburg, Russia

Irina V. Geshel – Researcher of All Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Sergey V. Korovin – Researcher of All Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

Maria A. Edomskaya – Researcher of All Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

For citation: Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Geshel I.V., Korovin S.V., Edomskaya M.A. Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 86-101. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101

Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г.

В.В. Востротин, А.Ю. Янов, Л.В. Финашов

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Цели. Определить уровни объёмной активности соединений трития и долю органических соединений трития в моче у работников химического производства «Производственное объединение «Маяк»» в современных условиях, выявить связь уровней объёмной активности с профессиональной деятельностью (отделением и специальностью). Материалы и методы. В период с 2017 по 2019 г. было собрано 245 анализов мочи 171 работника тритиевого производства Производственного объединения «Маяк». Измерения объёмной активности соединений трития в моче проводилось жидкостно-сцинтилляционным методом с использованием спектрометра Quantulus-1220. В качестве пробоподготовки использовалась дистилляция или сушка пробы с последующим использованием системы пробоподготовки Sample Oxidizer A307. Для статистического анализа при обработке результатов измерений и профессиональных факторов использовалось программное обеспечение «R». Для установления степени корреляционной связи использовалась шкала Чеддока. Уровень значимости был принят равным 5%. Результаты. Значение суммарной объёмной активности трития в моче и объёмной активности трития в водной фазе мочи варьировало в пределах 4 порядков величины (от ~30 Бк/дм³ до ~250 кБк/дм³). Значение объёмной активности органических соединений трития в моче варьировало в пределах 2 порядков величины (от ~6 Бк/дм³ до ~3000 кБк/дм³). Значение доли органических соединений трития в моче профессиональных работников находилось в диапазоне от 0,07% до 74%, при этом статистически значимо не отличалось от логнормального распределения с параметрами: среднее геометрическое = 2,7% и среднее геометрическое отклонение = 3,7. Выявлена весьма высокая ранговая корреляционная связь между суммарной объёмной активностью соединений трития в моче и объёмной активностью трития в водной фазе мочи. Выявлены заметные ранговые корреляционные связи между суммарной объёмной активностью соединений трития в моче и объёмной активностью органических соединений трития мочи, а также между объёмной активностью трития в водной фазе мочи и объёмной активностью органических соединений трития в моче. У работников 1-го цеха и аналитической лаборатории тритиевого производства Производственного объединения «Маяк» суммарный уровень объёмной активности трития в моче и уровень объёмной активности трития в водной фазе мочи по медиане были статистически значимо выше, чем у работников 2-го цеха. Статистически значимые различия между медианами суммарной объёмной активности трития в моче и объёмной активностью трития в водной фазе мочи в зависимости от специальности наблюдались только у работников 1-го цеха. Выводы. Оценивание объёмной активности трития в водной фазе мочи без пробоподготовки по уровню суммарной объёмной активности трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих один порядок величины относительно модельного значения. Оценивание объёмной активности органических соединений трития в моче без пробоподготовки по уровню суммарной объёмной активности трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих два порядка величины относительно модельного значения. Обнаружено влияние профессиональных факторов на уровни объёмной активности соединений трития в моче работников химического производства Производственного объединения «Маяк».

Ключевые слова: тритий, проба мочи, объёмная активность, органически связанный тритий, профессиональные факторы, Производственное объединение «Маяк».

Введение

В XX в. промышленное производство трития было освоено всеми странами «ядерной пятёрки» (США, СССР, Великобритания, Франция, Китай). С целью обеспечения индивидуального дозиметрического контроля

внутреннего облучения тритием профессиональных работников на данных производствах были созданы специализированные лаборатории и/или службы, обеспечивающие измерение объёмной активности в пробах мочи персонала, а также интерпретирующие серии этих

Востротин Вадим Владимирович

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

результатов измерений в виде доз. Анализ уровней объёмной активности (ОА) трития в моче профессиональных работников тритиевого производства SRS, США, в 99,9% не превышающий 740 кБк/дм^3 , проведённый для оценки вариативности периода полувыведения радионуклида из организма, представлен в работе Butler et al. [1]. Реконструированные оценки доз внутреннего облучения тритием для когорты работников SRS методом JEM (Job Exposure Matrix) представлены в исследовании Namra et al. [2]. Систематический обзор с оценками доз внутреннего облучения профессиональных работников Великобритании и Франции представлен в работе Little et al. [3].

Промышленное производство трития в СССР существовало с момента запуска реактора «АИ» в 1951 г. [4, 5]. Для извлечения трития из литиевых блоков, облученных в атомном реакторе, был создан отдельный химический цех [6]. По данным Гусковой А.К., особенно неблагоприятным с точки зрения радиационных эффектов в данном цехе оказался период становления технологии с 1951 по 1953 г.¹

По данным Третьякова Ф.Д., первые исследования содержания трития в организме персонала были выполнены в 1964–1966 гг. на базе биофизической лаборатории Филиала №1 Института биофизики под руководством Хохрякова В.Ф. Было установлено, что у 20% из 400 обследованных работников ОА трития в моче превышала допустимую $OA=1,1 \text{ МБк/дм}^3$ в 2–20 раз. Среднегодовые эквивалентные дозы внутреннего облучения тритием аппаратчиков перчаточных камер были в 1965–1966 гг. в диапазоне 41–177 сЗв при $ОБЭ=2,5$ (что соответствовало эффективной дозе 160–710 мЗв при $КК=1$). У работников других профессиональных групп эквивалентная доза внутреннего облучения от трития в 1965–1966 гг. в среднем не превышала 5 бэр (или 5 сЗв) в год. В результате проведения защитных радиационно-гигиенических мероприятий уровень годовых эквивалентных доз внутреннего облучения у аппаратчиков перчаточных камер в период с 1971 по 1999 г. уменьшился в ~200 раз и был в среднем от 0,4 сЗв до 0,9 сЗв. У работников других профессиональных групп средняя годовая эквивалентная доза в период с 1971 по 1999 г. уменьшилась в ~10 раз и была в среднем от 0,2 сЗв до 0,4 сЗв.²

В настоящее время производство трития осуществляется на базе химического производства ФГУП «Производственное объединение «Маяк»» (ПО «Маяк») [7], которое для простоты изложения в дальнейшем будет называться тритиевым производством.

В течение последних двух десятилетий среди исследователей наблюдался интерес к определению доли органических соединений трития (ОСТ) в моче профессиональных работников [8,9], моделям поведения трития в организме человека [10–14], а также к оценке вклада органических соединений трития в дозу внутреннего облучения [15–18].

Таким образом, наблюдение за когортой профессиональных работников тритиевого производства ПО «Маяк» в современных условиях является актуальным, направленным как на определение уровней ОА различных соединений трития, в том числе – ОСТ, так и на сопоставление этих уровней с профессиональными факторами.

Цель исследования – определить уровни ОА соединений трития и долю ОСТ у работников химического производства ПО «Маяк» в современных условиях, выявить связь уровней ОА с профессиональной деятельностью (отделением и специальностью).

Задачи исследования

1. Определить уровни и корреляционные соотношения ОА соединений трития в моче работников тритиевого производства.
2. Построить модели взаимных зависимостей ОА различных соединений трития, определить надёжность оценок полученных моделей.
3. Определить влияние профессиональных факторов на уровни ОА соединений трития в моче.

Материалы и методы

В период с 2017 по 2019 г. было собрано 245 анализов мочи 171 работника тритиевого производства ПО «Маяк» (2017 г. – 17 проб, 2018 г. – 116 проб, 2019 г. – 112 проб). На каждого работника было получено информированное согласие и собраны анкетные данные.

Измерения ОА соединений трития в моче проводили жидкостно-сцинтилляционным методом с использованием спектрометра Quantulus-1220.

С целью измерения суммарной ОА трития в моче пробоподготовку не проводили. В вials автоматическим распределителем Dispenser вносили сцинтиллятор OptiPhase HiSafe 3 объемом 12 см^3 и аликвоту пробы объемом 8 см^3 , отобранную дозатором. Вials плотно закрывали крышкой, встряхивали для равномерного распределения жидкостей и помещали для охлаждения и высвечивания при положении регулятора температуры 18°C в измерительное отделение Quantulus-1220, где выдерживали не ме-

¹ Отчёт «Особенности клинической картины лучевого заболевания, вызванного попаданием трития в организм», Филиал № 1 Института биофизики АМН СССР, 1954; А.К. Гускова, «Неврологические синдромы хронической лучевой болезни», диссертация на соискание доктора медицинских наук, Филиал № 1 Института биофизики АМН СССР, 1956 [Report “Characteristic features of clinical presentation of a radiation disease caused by tritium intake”, Affiliation №1 of the Biophysics Institute of the USSR Academy of Medical Sciences; A.K. Guskova, “Neurological syndromes of the chronic radiation disease”, medical doctorate thesis, Affiliation №1 of the Biophysics Institute of the USSR Academy of Medical Sciences, 1956 (In Russ.)].

² Ф.Д. Третьяков, Е.П. Кондратенко, и А.С. Колесников, «Основные итоги в изучении условий труда в производстве трития», Гигиенические, дозиметрические и медико-биологические аспекты отдаленных эффектов хронического облучения. Труды и материалы. Юбилейная научная конференция «50 лет ЮУрИБФ», 2003 [F.D. Tretyakov, E.P. Kondratenko and A.S. Kolesnikov, “Main outcomes of the study of labour conditions in tritium production”, Hygienic, dosimetry and medical-biological aspects of late effects of chronic exposure. Works and material. Anniversary scientific conference “SUBI – 50 years”, 2003. (In Russ.)].

нее 12 ч. При определении суммарной ОА трития в моче учитывали гашение, вносимое пробой, приводящее к снижению эффективности регистрации.

Измерения ОА трития в водной фазе мочи (НТО) проводили с помощью аттестованной методики измерения (МИ)³. В начале проводили дистилляцию пробы мочи объемом 30–50 см³. Затем из полученного дистиллята изготавливали счетный образец. Изготовление счетного образца и подготовку его к измерению проводили по аналогии с изготовлением и подготовкой к измерению образца недистиллированной мочи.

Измерения ОА ОСТ в моче проводили с помощью аттестованной методики измерения (Ми).⁴ Пробу мочи объемом 8 см³ последовательно по 1 см³ по мере испарения жидкой фракции наносили на фильтр типа «синяя лента», который находился в вытяжном шкафу. Полученную на фильтре пробу мочи досушивали в сушильном шкафу в течение 4 ч при температуре 75–90°C. Счетный образец получали путем сжигания фильтра с пробой мочи с использованием системы пробоподготовки Sample Oxidizer A307. В ходе процесса сжигания фильтра с пробой мочи тритий, входивший в состав органических соединений, растворялся в сцинтилляторе MonophaseS объемом

15 см³ и поступал в стеклянную вialу. Вialу плотно закрывали крышкой, встряхивали для равномерного распределения жидкостей и помещали для охлаждения и высвечивания в измерительное отделение Quantulus-1220, где выдерживали не менее 12 ч при положении регулятора температуры 18 °C.

Измерения проводили с использованием программного обеспечения WinQ, предназначенного для управления спектрометром Quantulus-1220, в соответствии с руководством по эксплуатации.

Для статистического анализа при обработке результатов измерений и профессиональных факторов использовалось программное обеспечение «R» версии 3.3.3 («Another Canoe»). Для установления статистически значимых различий медиан в группах при влиянии нескольких факторов использовали присоединенный пакет «dunn.test» версии 1.3.5. Для установления степени корреляционной связи использовалась шкала Чеддока. Уровень значимости был принят равным 5%.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены статистические характеристики уровней ОА различных соединений трития

Таблица 1

Статистические характеристики числа и результатов измерения ОА соединений трития и доли ОСТ в пробах мочи профессиональных работников ПО «Маяк» в период 2017–2019 гг.

[Table 1]

Statistical characteristics of the measurement results of VA of tritium compounds and the OBT fraction in urine samples of the Mayak PA workers in the period of 2017–2019]

Статистическая характеристика [Statistical characteristics]	Тип измерения ОА трития [Type of tritium VA measurement]			Доля ОСТ в моче, % [Fraction of OBT in the urine, %]
	Суммарная ОА, Бк/дм ³ [Total VA, Bq/dm ³]	ОА в водной фазе (НТО), Бк/дм ³ [VA in the water phase (HTO), Bq/dm ³]	ОА ОСТ, Бк/дм ³ [OBT VA, Bq/dm ³]	
	n=237	n=232	n=113	n=107
Минимум [Minimum]	31	27	6	0,07
Максимум [Maximum]	243 000	247 000	3110	74
Среднее [Average]	8460	7530	300	6,1
Среднеквадратическое отклонение [Standard deviation]	22 900	23 100	570	9,7
Медиана [Median]	850	730	101	2,5
Среднее геометрическое (GM) [Geometric mean (GM)]	1 360	1 080	104	2,7
Стандартное геометрическое отклонение (GSD) [Geometric standard deviation (GSD)]	6,4	6,7	4,4	3,7

³ Методика выполнения измерений объемной активности трития в пробах воды и мочи с использованием жидко-сцинтилляционного спектрометра Quantulus-1220. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». – Озерск, 2016), свидетельство об аттестации МИ № 222.0032/RA.RU.311866/2019 [Methods for measuring the volume activity of tritium in water and urine samples using a Quantulus-1220 liquid scintillation spectrometer; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2016.), certificate of certification No. 222.0032 / RA.RU.311866 / 2019 (In Russ.)].

⁴ Методика измерения объемной активности органических соединений трития в моче. ФГУП «Южно-Уральский институт биофизики». Озерск, 2020), свидетельство об аттестации МИ № 222.0121/RA.RU.311866/2020 [Methods of measuring the volume activity of organic tritium compounds in the urine; Federal State Unitary Enterprise South Ural Institute of Biophysics. Ozersk, 2020.), certificate of certification No. 222.0121/RA.RU.311866/2020 (In Russ.)].

и доли ОСТ в моче профессиональных работников. Из таблицы 1 следует, что как суммарная ОА трития, так и ОА НТО варьировали пределах 4 порядков величины. Максимальное значение ОА трития в водной фазе 250 кБк/дм³ соответствовало мощности эффективной дозы на уровне ~ 4 мЗв/год. Разброс значений ОА ОСТ трития в моче был меньше и составлял 3 порядка величины. Доля ОСТ определялась как отношение ОА ОСТ трития в моче к сумме ОА ОСТ и ОА НТО. Медианное значение доли ОСТ в моче профессиональных работников составляло 2,5%, что было на порядок величины больше величины данного показателя, найденного в исследовании работников тяжеловодных реакторов в Канаде, находившихся в условиях хронического поступления трития [16]. Данное различие можно объяснить отличием в пробоподготовке двух методов измерений: в используемом в настоящем исследовании методе измерения ОСТ в моче могут присутствовать как обменные, так и необменные соединения трития, в то время как в исследовании, проведенном в Канаде, обменные соединения трития удалялись из пробы.

Тест Шапиро – Уилка выявил статистически значимое отличие всех 3 показателей ОА трития в моче: как от нормального, так и от логнормального законов распределений. Распределение доли ОСТ в моче статистически значимо не отличалось от логнормального закона распределения ($W=0,98$, $p=0,46$). В дальнейшем анализе, где это было необходимо, использовались непараметрические тесты.

Изучение взаимосвязей ОА соединений трития в моче работников тритиевого производства

С целью изучения возможности оценки объемной активности ОСТ и НТО в моче профессиональных работников тритиевого производства ПО «Маяк» по результатам измерения суммарной ОА трития в моче, не требующей пробоподготовки, был проведен корреляционный анализ по Спирмену. В результате анализа была выявлена весьма высокая ранговая взаимосвязь между показателями суммарной ОА трития в моче и ОА водной фракции мочи (ОА НТО) $r = 0,95$. Между показателями ОА ОСТ мочи и суммарной ОА трития в моче наблюдался заметный уровень ранговой взаимосвязи, который составил $r = 0,61$. Между показателями ОА ОСТ мочи и ОА НТО в моче также наблюдался заметный уровень ранговой взаимосвязи, который составил $r = 0,60$.

При моделировании зависимостей, вследствие значительного разброса исходных данных использовался логарифмический масштаб их представления и степенная функция вида $Y=a \cdot X^b$. Во всех случаях параметр a статистически значимо не отличался от единицы, поэтому функции имели окончательный вид $Y=X^b$.

На рисунке 1 в логарифмической шкале представлены исходные данные о суммарной ОА трития мочи и ОА НТО с полученной степенной зависимостью $Y=X^{0,973}$ и 95% доверительной областью как линии регрессии, так и значений. Относительная ошибка оценки ОА НТО в моче по суммарной ОА трития в моче в виде стандартного геометрического отклонения составляла 1,86 при стандартном геометрическом отклонении исходных данных ОА НТО, равном 6,7. Т.е. модель могла объяснить исходной дисперсии ОА НТО в моче в логарифмической шкале ($R^2=0,89$). Таким образом, оценивание ОА НТО в моче без пробоподготовки по

уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих один порядок величины ($1,86^4$) относительно модельного значения.

На рисунке 2 в логарифмической шкале представлены исходные данные о суммарной ОА трития мочи и ОА ОСТ с полученной степенной зависимостью $Y=X^{0,553}$ и 95% доверительным интервалом как самой функции, так и индивидуальных значений. Относительная ошибка оценки ОА ОСТ в моче по суммарной ОА трития в моче в виде стандартного геометрического отклонения составляла 3,36 при стандартном геометрическом отклонении исходных данных ОА ОСТ, равном 4,4. Т.е. модель могла объяснить исходной дисперсии ОА ОСТ в моче в логарифмической шкале ($R^2=0,33$). Таким образом, оценивание ОА ОСТ в моче без пробоподготовки по уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих два порядка величины ($3,36^4$) относительно модельного значения.

В результате анализа была получена аналогичная степенная зависимость $Y=X^{0,568}$ между ОА ОСТ в моче и ОА НТО. Относительная ошибка оценки ОА ОСТ в моче по ОА НТО в виде стандартного геометрического отклонения составляла 3,33 при стандартном геометрическом отклонении исходных данных ОА ОСТ, равном 4,4. Т.е. модель могла объяснить исходной дисперсии ОА ОСТ в моче в логарифмической шкале ($R^2=0,34$). Таким образом, две последние модели обладали приблизительно одинаковым качеством оценки ОА ОСТ.

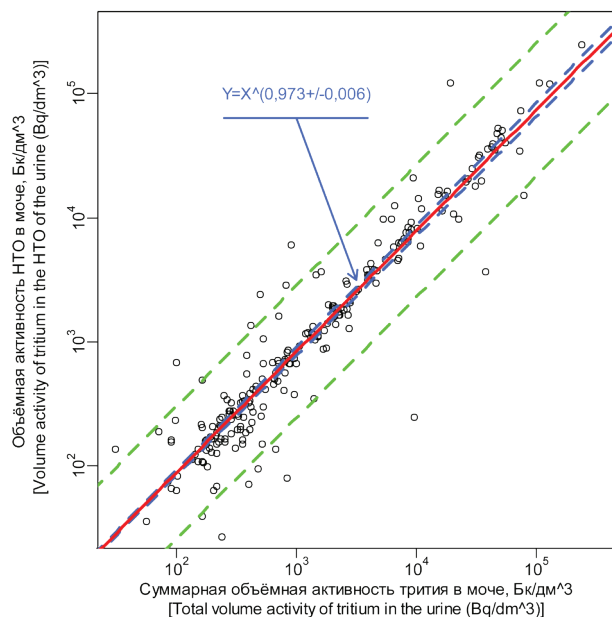


Рис. 1. Степенная зависимость ОА НТО мочи от суммарной ОА трития с 95% доверительной областью линии регрессии (голубая штриховая линия) и 95% доверительной областью значений (зелёная штриховая линия). По оси абсцисс – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³), по оси ординат – объёмная активность трития в водной фракции мочи (Бк/дм³)

[Fig. 1.] Power dependence of VA(HTO) of the urine from the total tritium VA with 95% confidence region of the regression line (blue dashed line) and 95% confidence region of the values (green dashed line). X-axis – Total volume activity of tritium (activity concentration) in the urine (Bq/dm³), Y-axis – Volume activity of tritium in the HTO of the urine (Bq/dm³)

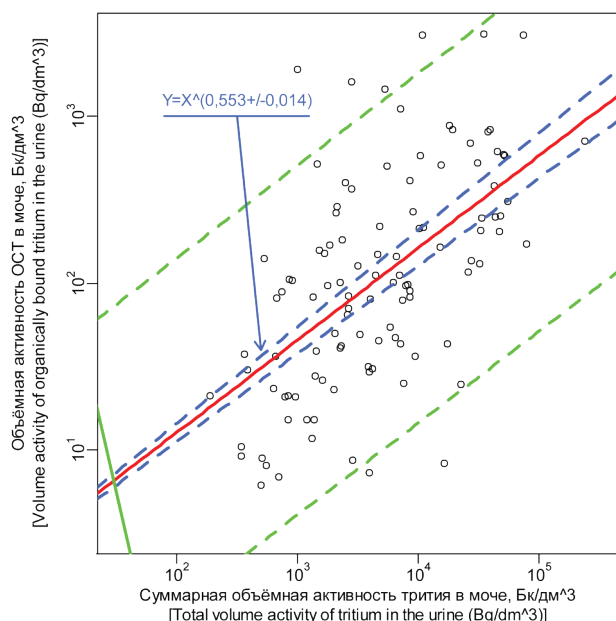


Рис. 2. Степенная зависимость ОА ОСТ в моче от суммарной ОА трития с 95% доверительной областью линии регрессии (голубая штриховая линия) и 95% доверительной областью значений (зелёная штриховая линия). По оси абсцисс – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³³), по оси ординат – объёмная активность органических соединений трития в моче (Бк/дм³³)

[Fig. 2. Power dependence of VA(OBT) from the total tritium VA with 95% confidence region of the regression line (blue dashed line) and 95% confidence region of the values (green dashed line). X-axis – Total volume activity of tritium in the urine (Bq/dm³³), Y-axis – Volume activity of organically bound tritium in the urine (Bq/dm³³)]

Изучение влияния факторов профессиональной деятельности на ОА соединений трития в моче работников тритиевого производства

Перед проведением анализа выборок с результатами измерений ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» они были проверены на однородность по медиане в зависимости от года (табл. 2). Тест Краскела – Уоллиса выявил статистически значимое различие между медианами суммарных ОА трития в моче в зависимости от года (KWCh-sq=6,82, df=2, p=0,03). По тесту Данна статистически значимое различие наблюдалось между медианами суммарной ОА трития в моче в 2017 и 2019 гг. (p=0,01). Статистически значимого различия между медианами ОА трития в водной фазе (KWCh-sq=3,57, df=2, p=0,17) и ОА ОСТ мочи (KWCh-sq=1,81,

df=2, p=0,40) в зависимости от года не наблюдалось. Таким образом, при анализе влияния профессиональных факторов на уровни ОА соединений трития в моче результаты измерений 2017 г. были отброшены.

С целью изучения влияния на ОА трития в моче работников тритиевого производства ПО «Маяк» профессиональных факторов было выделено 3 группы работников отделений предприятия: 1-я группа – работники 1-го цеха, 2-я группа – работники второго цеха, 3-я группа – работники аналитической лаборатории. Также были выделены основные специальности работников в группах – данные, по которым позволяли корректно проводить статистическую обработку результатов измерений. В группу таких специальностей вошли: слесарь-ремонтник, инженер-технолог, электромонтер, аппаратчик. В таблице 3 представлена таблица распределения измерений ОА соединений трития по отделениям и специальностям.

Так как полученные данные об уровнях ОА соединений трития в моче профессиональных работников статистически значимо отличались от нормального распределения, то обработку результатов измерений проводили с использованием непараметрического критерия Краскела – Уоллиса и теста Данна, позволяющего проводить парные сравнения медиан при многофакторном дисперсионном анализе.

По суммарной ОА трития в моче статистически значимые различия в медианах наблюдались у работников исследуемых отделений (KWCh-sq= 14,6, df=2, p=6,6e-4). По тесту Данна были выявлены статистически значимые различия (p=4,4e-4) между медианами суммарной ОА трития у работников 1-го (2100 Бк/дм³³) и 2-го цехов (500 Бк/дм³³), работниками 2-го цеха (500 Бк/дм³³) и аналитической лаборатории (7500 Бк/дм³³) при p=0,015. Между работниками 1-го цеха и аналитической лаборатории статистически значимого различия (p=0,17) по медиане суммарной ОА трития в моче не наблюдалось (рис. 3).

При сравнении ОА НТО в моче также наблюдалось статистически значимое различие медиан (KWCh-sq = 17,7, df = 2, p-value = 1,5e-4). По тесту Данна были выявлены статистически значимые (p=1,0e-4) различия между медианами ОА НТО в моче у работников 1-го (1750 Бк/дм³³) и 2-го цехов (350 Бк/дм³³), работников 2-го цеха (350 Бк/дм³³) и аналитической лаборатории (6100 Бк/дм³³) при p=6,8e-3. Между работниками 1-го цеха и аналитической лаборатории статистически значимого различия (p=0,13) по медиане ОА НТО в моче не наблюдалось.

В дальнейшем были проведены исследования различий медиан ОА соединений трития в моче работников

Таблица 2

Медианы уровней ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» по годам

[Table 2]

Medians of VA levels of tritium compounds in the urine of the Mayak PA workers by years]

Годы [Years]	Суммарная ОА, Бк/дм³³ [Total VA, Bq/dm³³]	ОА в водной фазе (НТО), Бк/дм³³ [VA in the water phase (HTO), Bq/dm³³]	ОА ОСТ, Бк/дм³³ [OBT VA, Bq/dm³³]
2017	5 200 (n=10)*	3 300 (n=17)	100 (n=11)
2018	920 (n=116)*	720 (n=108)	110 (n=49)
2019	740 (n=111)*	670 (n=107)	80 (n=53)

* Статистически значимое различие медиан в группах по тесту Краскела – Уоллиса (p=0,03)

[* Statistically significant difference in group medians by Kruskal-Wallis test (p=0.03)].

Распределения числа измерений ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» по отделениям и специальностям

Таблица 3

[Table 3]

Distributions of measurements of VA of tritium compounds in the urine of the Mayak PA workers by departments and professions]

Специальность [Profession]	Отделение [Department]			Итого [Total]
	1-й цех [1 st department]	2-й цех [2 nd department]	Аналитическая лаборатория [Analytical laboratory]	
Слесарь-ремонтник [Mechanical repairman]	8	31	1	40
Инженер-технолог [Engineering technologist]	10	9	4	23
Электромонтер [Electrician]	5	6	—	11
Аппаратчик [Equipment operator]	33	96	—	129
Итого [Total]	56	142	5	203

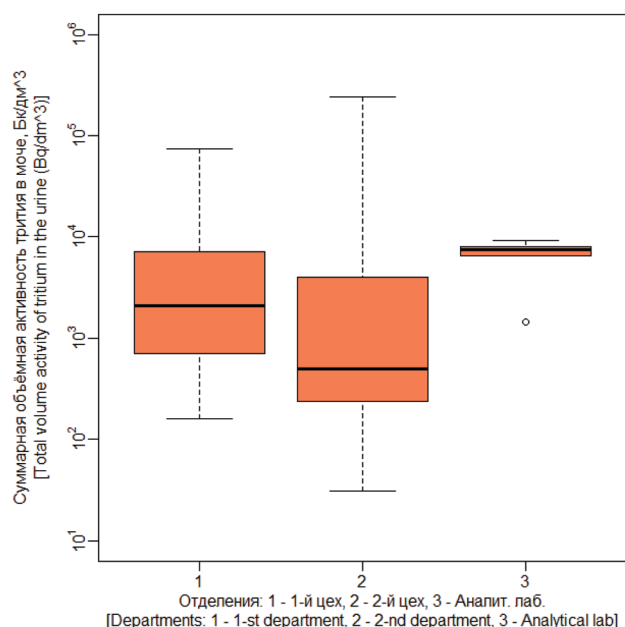


Рис. 3. Сравнение уровней суммарной ОА трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период 2018–2019 гг. в зависимости от отделения (Boxplot). По оси абсцисс – отделения, по оси ординат – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³). Точками обозначены статистические выбросы за 99% доверительный интервал

[Fig. 3. Comparison of the total tritium VA in the urine of Mayak PA workers in 2018–2019 in relation to department (Boxplot). X-axis – Departments: 1- 1st department, 2- 2nd department, 3- Analytical laboratory, Y-axis – Total volume activity of tritium in the urine (Bq/dm³). Points are 99% confidence interval outliers]

в каждом из отделений в зависимости от основной специальности. Статистически значимые различия были обнаружены только у работников 1-го цеха. По показателю суммарной ОА трития в моче (KWch-sq=11,5, df= 3, p=0,01) у инженеров-технологов наблюдались более низкие значения медиан в сравнении с аппаратчиками (Dunn test, p=1,4e-3) и слесарями-ремонтниками (Dunn test, p=6,7e-3) (рис. 4).

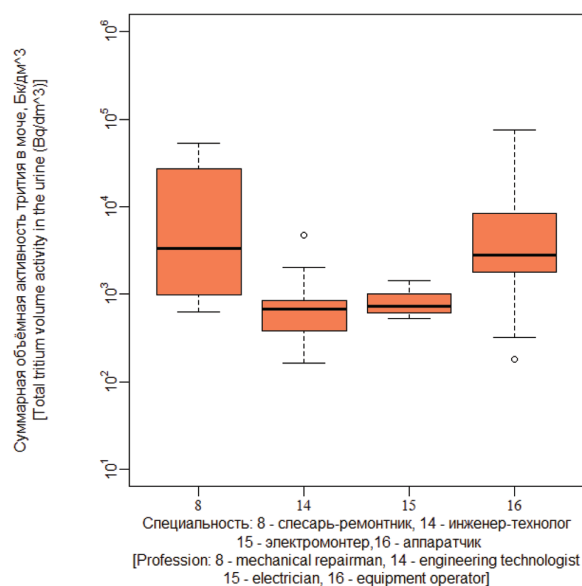


Рис. 4. Сравнение уровней суммарной ОА трития в моче профессиональных работников 1-го цеха ПО «Маяк» в период 2018–2019 гг. в зависимости от специальности (Boxplot). По оси абсцисс – рабочая специальность, по оси ординат – суммарная объёмная активность трития в моче (Бк/дм³). Точками обозначены статистические выбросы за 99% доверительный интервал

[Fig. 4. Comparison of the total tritium VA in the urine of the workers of the 1st department of Mayak PA tritium production in 2018–2019 in relation to profession (Boxplot), X-axis – Profession: 8- mechanical repairman, 14- engineering technologist, 15- electrician, 16- equipment operator, Y-axis – Total tritium VA in the urine (Bq/dm³). Points are 99% confidence interval outliers]

По показателю ОА НТО в моче (KWch-sq=11,1, df= 3, p=0,01) также более низкие медианы наблюдались у инженеров-технологов по сравнению с аппаратчиками (Dunn test, p=8,0e-4) и слесарями-ремонтниками (Dunn test, p=6,6e-3). По показателю ОА ОСТ статистически значимых различий в медианах в зависимости от специальности не наблюдалось.

В других двух отделениях статистически значимых различий между медианами ОА соединений трития в зависимости от основной специальности не наблюдалось.

Заключение

Все показатели ОА соединений трития в моче имели высокую вариабельность по выборке (суммарная ОА – GSD=6,4, ОА НТО – GSD=6,7, ОА ОСТ – GSD=4,4). Распределение показателей ОА соединений трития в моче в большинстве случаев статистически значимо отличалось от законов нормального и логнормального распределений.

Значение доли ОСТ в моче профессиональных работников находилось в диапазоне от 0,07% до 74% и при этом статистически значимо не отличалось от логнормального распределения с параметрами GM=2,7% и GSD=3,7.

Выявлена весьма высокая ранговая корреляционная связь между суммарной ОА соединений трития в моче и ОА НТО в моче профессиональных работников ПО «Маяк». Коэффициент детерминации степенной модели зависимости ОА НТО в моче от суммарной ОА трития составлял $R^2=0,89$ в логарифмическом масштабе. Оценивание ОА НТО в моче без пробоподготовки по уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих один порядок величины ($1,86^4$) относительно модельного значения.

Выявлены заметные ранговые корреляционные связи между суммарной ОА соединений трития в моче и ОА ОСТ, а также между ОА НТО и ОА ОСТ в моче профессиональных работников ПО «Маяк». Коэффициенты детерминации степенных моделей зависимости ОА ОСТ в моче от суммарной ОА трития и от ОА НТО составляли $R^2=0,33$ и $R^2=0,34$ в логарифмическом масштабе соответственно. Оценивание ОА ОСТ в моче без пробоподготовки по уровню суммарной ОА трития возможно с надёжностью 95% в пределах границ, составляющих два порядка величины ($3,36^4$) относительно модельного значения.

Обнаружено влияние профессиональных факторов на уровни ОА соединений трития в моче профессиональных работников ПО «Маяк». У работников 1-го цеха и аналитической лаборатории тритиевого производства ПО «Маяк» суммарный уровень ОА трития в моче и ОА НТО в моче по медиане были статистически значимо выше, чем у работников 2-го цеха тритиевого производства.

Статистически значимые различия между медианами суммарной ОА трития в моче и медианами ОА НТО в зависимости от специальности наблюдались только у работников 1-го цеха.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного Контракта № 202038810003200000000000/11.311.20.10 от 19 мая 2020 г. «Оценка радиационного риска и разработка мероприятий медико-дозиметрического обеспечения при работе с соединениями трития», шифр «Элемент-20», финансируемого ФМБА России.

Благодарность

Авторы благодарят сотрудников лаборатории № 8 (руководитель Рабинович Е.И.) и клинического отдела (руководитель Азизова Т.В.) ФГУП ЮУРИБФ за помощь в организации и сборе биологических образцов.

Литература

- Butler H.L., Leroy J.H. Observation of biological half-life of tritium // Health Physics. 1965. Vol. 11. P. 283-285.
- Hamra G., Nylander-French L.A., Richardson D. Dose reconstruction for an occupational cohort at the Savannah River nuclear facility: evaluation of a hybrid method. Dose reconstruction for an occupational cohort at the Savannah River nuclear facility // Radiation Protection Dosimetry. 2008. Vol. 131, No. 2. P. 188-197.
- Little M.P., Wakeford R. Systematic review of epidemiological studies of exposure to tritium // Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection. 2008. Vol. 28, No. 1. P. 9-32.
- Новоселов В.Н. Нарращивание мощностей производства плутония и трития на ПО «Маяк» в условиях холодной войны (1948-1950-е гг.) // Социум и Власть. 2012. № 3 (35). С. 121-123.
- Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. CRC Press, 2002.
- Киселев Г., Ткач К. Литий, дейтерий и тритий для водородной бомбы // Бюллетень по атомной энергии. 2004. № 11. С. 70-76.
- Новоселов В.Н., Носач Ю.Ф., Ентяков Б.Н. Атомное сердце России. Челябинск: Автограф, 2014. 528 с.
- Trivedi A., Duong T., Leon J.W., Linauskas S.H. Measurement of organically bound tritium in urine and feces. AECL-10925. Atomic Energy of Canada Limited, 1993. 29 p.
- Gonen R., Marco R., German U., et al. An improved method for Organic Bound Tritium (OBT) determination in urine samples // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 125, No. 1-4. P. 460-464.
- Galeriu D., Takeda H., Melintescu A., Trivedi A. Energy Metabolism and Human Dosimetry of Tritium // Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 48, No 1. P. 795-798.
- Galeriu D., Melintescu A., Beresford N.A., Takeda H., Crout N.M.J. The dynamic transfer of ^3H and ^{14}C in mammals: a proposed generic model // Radiation and Environmental Biophysics. The dynamic transfer of ^3H and ^{14}C in mammals. 2009. Vol. 48, No. 1. P. 29-45.
- Galeriu D., Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers. Retention of tritium in reference persons // Journal of Radiological Protection. 2010. Vol. 30, No. 3. P. 445-468.
- Richardson R.B., Dunford D.W. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium-Part 1: Physiological criteria // Health Physics. 2003. Vol. 85, No. 5. P. 523-538.
- Richardson R.B., Dunford D.W. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium-Part 2: Dosimetric evaluation // Health Physics. 2003. Vol. 85, No. 5. P. 539-552.
- Trivedi A., Galeriu D., Richardson R.B. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after acute tritiated water intakes in humans // Health Physics. 1997. Vol. 73, No. 4. P. 579-586.
- Trivedi A., Galeriu D., Lamothe E.S. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after chronic tritiated water intakes in humans // Health Physics. 2000. Vol. 78, No. 1. P. 2-7.
- Балонов М.И., Чипига Л.А. Оценка дозы от поступления окиси трития в организм человека: роль включения трития в органическое вещество тканей // Радиационная Гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 16-25.
- United Nations, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly, with scientific annexes. Sources, effects and risks of ionizing radiation. 2017.

Поступила: 09.10.2020 г.

Востротин Вадим Владимирович – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456780, Россия, Челябинская область, г. Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: vostrotin@subi.su

Янов Александр Юрьевич – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Финашов Леонид Викторович – научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озёрск, Россия

Для цитирования: Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Тритий в моче профессиональных работников ПО «Маяк» в период с 2017 по 2019 г. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 102-110. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110

Tritium in the urine of the Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019

Vadim V. Vostrotin, Aleksandr Yu. Yanov, Leonid V. Finashov

Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Objectives. To define the levels of volume activity of tritium compounds and fraction of organically bound tritium in urine of chemical production workers of "Mayak Production Association" in present-day conditions; to identify the relationship between volume activity levels and professional occupation (department and profession). Material and methods. 245 urine samples from 171 workers of Mayak Production Association tritium production facility were collected in the period from 2017 to 2019. Volume activity of tritium compounds was measured by liquid scintillation method using spectrometer Quantulus-1220. The samples were distilled or dried and then combusted using an automatic preparation and oxidization system Sample Oxidizer A307. The "R" software was used for statistical analysis and for processing the measurement results and occupational factors. Chaddok's scale was applied to determine the degree of correlation. The significance level was taken equal to 5%. Results. The value of total tritium volume activity in the urine and tritium volume activity in the water phase varied within 4 orders of magnitude (from ~30 Bq/dm³ to ~250 kBq/dm³). The value of volume activity of organically bound tritium in the urine varied within 2 orders of magnitude (from ~6 Bq/dm³ to ~3000 kBq/dm³). The fraction of organically bound tritium in the urine of the workers was within the range from 0,07% to 74%, and did not differ statistically significantly from lognormal distribution with parameters GM=2,7% and GSD=3,7. Very high rank correlation was detected between total volume activity of tritium compounds and tritium volume activity in the water phase in the urine. Noticeable rank correlations were detected between the total volume activity of tritium compounds in the urine and volume activity of organically bound tritium, as well as between tritium volume activity in the water phase and volume activity of organically bound tritium in the urine. The total tritium volume activity and tritium volume activity in the water phase in the urine of the workers of the 1st department and of the analytical laboratory of Mayak Production Association tritium production facility were statistically significantly higher than in the workers of the 2nd department according to median values. Statistically significant differences between medians of the total tritium volume activity in the urine and tritium volume activity in the water phase related to profession were observed only in the workers in the 1st department. Conclusion. Estimation of tritium volume activity in the water phase by the level of total tritium volume activity in the urine without sample preparation is possible with 95% reliability within limits of one order of magnitude towards the model value. Estimation of volume activity of organically bound tritium in the urine without sample preparation by the level of total tritium volume activity in the urine without sample preparation is possible with 95% reliability within limits of two orders of magnitude towards the model value. The effect of occupational factors to the levels of volume activity of tritium compounds in the urine of Mayak Production Association professional workers was detected.

Key words: tritium, urine sample, volume activity, organically bound tritium, occupational factors, Mayak Production Facility.

Vadim V. Vostrotin

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su

References

- Butler HL, Leroy JH. Observation of biological half-life of tritium. *Health Physics*. 1965 Apr;11: 283–5.
- Hamra G, Nylander-French LA, Richardson D. Dose reconstruction for an occupational cohort at the Savannah River nuclear facility: evaluation of a hybrid method. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;131(2): 188–97.
- Little MP, Wakeford R. Systematic review of epidemiological studies of exposure to tritium. *Journal of Radiological Protection*. 2008 Mar; 28(1): 9–32.
- Novoselov VN. Extending plutonium and tritium production capacities at Mayak PA in the cold war (1948-1950-ies). *Sotsium i Vlast = Society and Authority*. 2012;3(35): 121-123. (In Russian).
- Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. CRC Press; 2002.
- Kiselev G, Tkach K. Lithium, deuterium and tritium for the hydrogen bomb. *Byulleten po atomnoy energii = Atomic energy report*. 2004;(11): 70–6. (In Russian).
- Novoselov VN, Nosach YuF, Entyakov BN. Atomic heart of Russia. Chelyabinsk: Authograph; 2014. 528 p. (In Russian).
- Trivedi A, Duong T, Leon JW, Linauskas SH. Measurement of organically bound tritium in urine and feces. Atomic Energy of Canada Limited; 1993. 29 p.
- Gonen R, Marco R, German U, Katorza E, Alfassi ZB, Haquin G, et al. An improved method for Organic Bound Tritium (OBT) determination in urine samples. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007 Jul 1;125(1–4): 460–4.
- Galeriu D, Takeda H, Melintescu A, Trivedi A. Energy Metabolism and Human Dosimetry of Tritium. *Fusion Science and Technology*. 2005; 48(1):795–8.
- Galeriu D, Melintescu A, Beresford NA, Takeda H, Crout NMJ. The dynamic transfer of ^3H and ^{14}C in mammals: a proposed generic model. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2009 Feb;48(1): 29–45.
- Galeriu D, Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers. *Journal of Radiological Protection*. 2010 Sep;30(3): 445–68.
- Richardson RB, Dunford DW. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium--Part 1: Physiological criteria. *Health Physics*. 2003 Nov;85(5): 523–38.
- Richardson RB, Dunford DW. A biochemical-based model for the dosimetry of dietary organically bound tritium--Part 2: Dosimetric evaluation. *Health Physics*. 2003 Nov;85(5): 539–52.
- Trivedi A, Galeriu D, Richardson RB. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after acute tritiated water intakes in humans. *Health Physics*. 1997 Oct;73(4): 579–86.
- Trivedi A, Galeriu D, Lamothe ES. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after chronic tritiated water intakes in humans. *Health Physics*. 2000 Jan;78(1): 2–7.
- Balonov MI, Chipiga LA. Estimation of the dose from tritium oxide intake in human body: the role of inclusion of tritium into organic compound of the tissues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene* 2016;9(4): 16–25. (In Russian).
- United Nations, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2016 report to the General Assembly, with scientific annexes. Sources, effects and risks of ionizing radiation. 2017.

Received: October 09, 2020

For correspondence: Vadim V. Vostrotin – PhD, head of the laboratory of the radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk region, Russia; E-mail: vostrotin@subi.su)

Aleksandr Yu. Yanov – кандидат биологических наук; Scientist, laboratory of radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Leonid V. Finashov – Junior scientist, laboratory of the radiation protection of Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

For citation: Vostrotin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V. Tritium in the urine of the Mayak PA workers in the period from 2017 to 2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 102-110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-102-110

Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области

Е.В. Храмцов, В.С. Репин, А.М. Библин, К.В. Варфоломеева, С.А. Иванов

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

В статье приводится характеристика санитарного и радиационно-гигиенического состояния территорий охранных зон мирных ядерных взрывов «Глобус-2», «Агат» и «Рубин-1», проведенных в Архангельской области с целью глубинного сейсмического зондирования земной коры, по результатам выполненных в 2020 г. исследований. Проанализированы результаты исследования радиационно-гигиенического состояния охранных зон мирных ядерных взрывов по значениям мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, идентификации гамма-излучающих радионуклидов in situ методом полевой гамма-спектрометрии, удельной активности техногенных радионуклидов в почве и трития в воде водоемов и источников питьевого водоснабжения. Установлено, что значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на всех обследованных территориях охранных зон мирных ядерных взрывов находятся на уровне колебаний естественного регионального радиационного фона в пределах 0,08–0,13 мкЗв/ч. На территории охранной зоны мирного ядерного взрыва «Глобус-2» выявлены повторно (предыдущее исследование было выполнено в 2011 г.) участки незначительного локального загрязнения почвы ^{137}Cs . На данных участках зафиксированы повышенные значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (0,20–0,22 мкЗв/ч) и удельной активности ^{137}Cs в двух пробах почвы (154 и 160 Бк/кг соответственно). Содержание трития в пробах воды из водных объектов на территориях охранных зон не превышает 5 Бк/кг, что характерно для глобальных уровней содержания данного радионуклида в водных объектах. На территориях охранных зон мирных ядерных взрывов обнаружены остатки технологического оборудования (особенно в охранной зоне взрыва «Агат»), а также ржавые металлические трубы и бочки, остатки деревянных строений и т.д. Информационные знаки, установленные на полуразрушенных бетонных основаниях на устьях боевых скважин всех обследованных мирных ядерных взрывов имеют едва различимые надписи. Наличие лесных зарослей в местах проведения исследованных мирных ядерных взрывов и их возгорание при лесных пожарах является потенциальной угрозой для выхода техногенных радионуклидов при разгерметизации устьев боевых скважин.

Ключевые слова: мирный ядерный взрыв, охранная зона, радионуклиды, радиоактивное загрязнение, радиационная безопасность, санитарное состояние.

Введение

В ходе реализации программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства» (Программа № 7) на территории Российской Федерации с 1965 по 1988 г. был проведен 81 мирный ядерный взрыв (МЯВ) [1–3]. В ряде мест проведения МЯВ территория загрязнена техногенными радионуклидами, имеются площадки для хранилища радиоактивного грунта и оборудования [4]. Вопрос обеспечения радиационной безопасности населения, проживающего на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ, остается актуальным.

Необходимость решения вопроса обеспечения долгосрочной радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения МЯВ, связана с нали-

чием техногенных радионуклидов на земной поверхности в результате возникших аварийных ситуаций при проведении взрывов или при осуществлении впоследствии на территориях, прилегающих к взрывам, исследовательских экспериментов, а также возможными разрушениями забетонированных затрубных пространств боевых и исследовательских скважин. Это создает потенциальную угрозу выхода техногенных радионуклидов из центральных зон взрывов как на поверхность, так и в подземные и поверхностные водные объекты, расположенные в районах взрывов.

В соответствии с п. 3.1. Санитарных правил и нормативов «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–

Храмцов Евгений Витальевич

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

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: zhenia.khramtsov2013@yandex.ru

1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» (СанПиН 2.6.1.2819-10)¹ на территории, прилегающей к месту проведения МЯВ, устанавливается охранная зона (ОЗ).

Для реализации требований, отраженных в СанПиН 2.6.1.2819-10, возникла необходимость включения в перечень задач, решаемых в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года», разработки и научного обоснования требований по обеспечению долговременной безопасности населения, проживающего в районах проведения МЯВ на стадии их консервации [5].

В соответствии с планом экспедиционных исследований в августе 2020 г. сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева было проведено изучение радиационной обстановки и особенностей ландшафта ОЗ МЯВ (территорий в радиусе 500 м от боевых скважин), проведенных в Архангельской области.

В статье приводятся результаты исследований радиационно-гигиенического и санитарного состояния территорий ОЗ МЯВ «Глобус-2», «Агат» и «Рубин-1».

Цель исследования – дать оценку текущего санитарного состояния и радиационно-гигиеническую характеристику ОЗ МЯВ, проведенных в Архангельской области.

Краткая характеристика мирных ядерных взрывов в Архангельской области

Подробное описание произведенных в Советском Союзе МЯВ, включая взрывы, произведенные в Архангельской области, дано в многочисленных источниках [1–3, 6, 7].

Объект «Агат»

Взрыв «Агат» был осуществлен 19 июля 1985 г. в Мезенском районе Архангельской области в 150 км западнее г. Мезень и 10 км западнее пос. Ручьи с населением 225 чел. (на 2012 г.), в 2 км от побережья Белого моря. Глубина заложения заряда – 772 м, мощность ядерного заряда – 8,5 кТ. МЯВ «Агат» был осуществлен с целью геосейсмозондирования и проведен в штатном режиме, то есть без динамического выброса радиоактивных продуктов в атмосферу [1].

Объекты «Глобус-2» и «Рубин-1»

Взрыв «Глобус-2» был осуществлен 4 октября 1971 г. в 28 км на восток от железнодорожной станции Кивер в Архангельской области и в 5 км на восток от пос. Паломыш. Глубина заложения заряда – 595 м, мощность ядерного заряда – 2,3 кТ.

Взрыв «Рубин-1» был осуществлен 6 сентября 1988 г. восточнее объекта «Глобус-2» на расстоянии около 1300 м от него. Глубина заложения заряда – 820 м, мощность ядерного заряда – 2,3 кТ.

Взрывы были проведены с целью геосейсмозондирования в штатном режиме [1].

Места проведения взрывов «Глобус-2» и «Рубин-1» находятся на территории Вилегодского биологического заказника

ка в Вилегодском районе [8], расположенном на юго-востоке Архангельской области в 27 км к северу от районного центра с. Ильинско-Подомского (население около 3 тыс. чел.). Все другие сельские поселения расположены на расстоянии от 23 км (с. Сорово) и далее от мест проведения взрывов. Следует отметить, что все население Вилегодского района составляет 11,5 тыс. человек (на 2020 г.). Города областного подчинения Коржма (население более 42 тыс. чел.) и Котлас (население около 60 тыс. чел.) находятся западнее мест проведения взрывов в 40 км и 70 км соответственно.

Для выявления воздействия радиоактивности на окружающую среду в зонах эпицентров взрывов «Агат», «Глобус-2», «Рубин-1» специалистами Института экологических проблем Севера РАН в 2014 г. отбирались пробы почв, донных отложений озер, ручья, реки, растительности. Определялась активность ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th . Исследователями сделан вывод, что повышенная активность ^{137}Cs (137 Бк/кг) в торфяном горизонте обусловлена свойством торфяников аккумулировать мигрирующий ^{137}Cs , выпавший ранее с атмосферными осадками, и не связана с последствиями ядерного взрыва [6].

В монографии [1] приводятся данные обследований, проведенных на объектах «Глобус-2» и «Рубин-1», в которых показано, что в отобранных на объекте «Глобус-2» пробах почвы удельная активность ^{137}Cs находилась в пределах от 1,9 до 44,2 Бк/кг. Средняя по всем пробам почвы удельная активность ^{137}Cs – 12,9 Бк/кг. Практически аналогичные величины удельной активности каждого из этих радионуклидов определялись и в пробах почвы, отобранных на объекте «Рубин-1». Средняя поверхностная плотность загрязнения почвы ^{137}Cs на объекте «Глобус-2» составляет 1,4 кБк/м², а на объекте «Рубин-1» – 1,6 кБк/м². Все приведенные выше величины удельной активности проб почвы, а также поверхностной плотности загрязнения почвы на территориях обоих объектов соответствовали средним значениям аналогичных показателей для этих широт территории России. В ходе проведенных исследований было установлено, что каких-либо аномалий в содержании радионуклидов в почве на территориях объектов «Глобус-2» и «Рубин-1» не наблюдается.

Однако следует отметить, что при проведении в 2011 г. сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева комплексных радиационно-гигиенических исследований на территориях, прилегающих к местам проведения МЯВ «Глобус-2» и «Рубин-1», на территории ОЗ МЯВ «Глобус-2» были обнаружены два локальных участка радиоактивного загрязнения ^{137}Cs , расположенных в пределах прудов-отстойников, образовавшихся, возможно, в результате экспериментов, проведенных после взрыва [7].

Материалы и методы

Радиационно-гигиеническое обследование территории, прилегающей к месту проведения МЯВ, проводилось по стандартной схеме [9, 10], которая включала в себя определение географических координат специфических элементов ландшафта, точек измерений и отбора проб с использованием спутниковых навигаторов; измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (ДК-АТ1121, «АТОМТЕХ», Беларусь); идентификацию

¹ СанПиН 2.6.1.2819-10 «Обеспечение радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения (1965–1988 гг.) ядерных взрывов в мирных целях» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2819-10 "Ensuring the radiation safety of the population living in the regions of nuclear explosions for peaceful purposes (1965-1988)" (In Russ.)]

гамма-излучающих радионуклидов *in situ* методом полевой гамма-спектрометрии (МКСП-01 (фирма «РАДЭК», Россия)) с кристаллом NaI [11]; отбор проб верхнего (на глубину до 20 см) слоя почвы, а также проб воды на содержание трития; фото- и видеосъемку. Положение точек измерений и отбора проб для наглядности выполнено с использованием картографических средств.

По результатам экспедиционных исследований на территориях ОЗ МЯВ было проведено 533 измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, 15 гамма-спектрометрических измерений, отобрано 15 проб почвы и 34 пробы воды для исследования содержания трития.

Лабораторные измерения удельной активности радионуклидов в почве проводились на гамма-спектрометрической установке МКС-01А «МУЛЬТИРАД-гамма» (фирма НТЦ «Амплитуда» (Россия)) с кристаллом NaI. Геометрия – колодец, объём проб 200 мл, время измерения 10 минут. Определение трития в воде открытых водоемов осуществлялось на альфа-бета-радиометре «Quantulus 1220» фирмы «PerkinElmer» (США). Все измерения выполнены в соответствии с аттестованными методиками, с учётом рекомендаций МАГАТЭ [12].

Результаты и обсуждение

Санитарная и радиационно-гигиеническая характеристика охранной зоны взрыва «Агат»

В месте проведения взрыва «Агат» над устьем боевой скважины (БС) высятся остатки многометровых металлоконструкций (рис. 1).

Остатки металлоконструкций, показанные на рисунке 1, свидетельствуют о неблагоприятном санитарном состоянии ОЗ, затруднениях в отборе проб и измерении показателей радиационной обстановки в непосредственной близости от БС. На территории ОЗ обнаружено большое количество ржавых металлокон-



Рис. 1. Металлоконструкции над устьем боевой скважины на МЯВ «Агат»
[Fig. 1. Metal structures above the mouth of the battle well on the PNE «Agat»]

струкций, много бочек. Устье БС разрушено, информационный указатель над устьем заржавел и имеет едва различимую надпись.

Значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (более 200 измерений), зафиксированные на территории 500-метрового радиуса от БС, находились в диапазоне от 70 до 142 нЗв/ч, с наименьшими значениями на окружающих объект болотах (70–80 нЗв/ч).

Результаты полевой гамма-спектрометрии в отдельных точках территории ОЗ МЯВ «Агат» приведены в таблице 1, а данные лабораторных измерений удельной активности радионуклидов в пробах почвы, отобранных на территории ОЗ, – в таблице 2.

Результаты измерений интенсивности пиков полного поглощения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi и ^{208}Tl в спектрах полевой гамма-спектрометрии в ОЗ МЯВ «Агат»

Таблица 1

Results of measurements of the intensity of peaks of full absorption of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi and ^{208}Tl in the spectra of field gamma spectrometry in the protected zone of peaceful nuclear explosion (PNE) «Agat»

[Table 1

Код спектра [Spectrum code]	Координаты, град [Coordinates, degrees]	Интенсивность счета под пиком, имп/с [Intensity of the accounts under peak, IMP]			
		^{137}Cs	^{214}Bi	^{208}Tl	^{40}K
Спектр-1 Агат [Spectrum-1 Agat]	N 65.99566 E 41.03212	0,26	0,21	0,30	2,87
Спектр-2 Агат [Spectrum-2 Agat]	N 65.99544 E 41.03203	< 0,06	0,26	0,57	4,22
Спектр-3 Агат [Spectrum-1 Agat]	N 65.99553 E 41.03199	< 0,06	0,13	0,24	1,77
Спектр-4 Агат [Spectrum-1 Agat]	N 65.99542 E 41.03267	0,33	0,15	0,31	3,33
Спектр-5 Агат [Spectrum-1 Agat]	N 65.99550 E 41.03223	<0,06	0,19	0,66	4,46

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в пробах почвы в ОЗ МЯВ «Агат»

[Table 2]

Specific activity of radionuclides in soil samples collected in the protected zone of PNE «Agat»

Код пробы [Sample code]	Место отбора [Sampling location]	Мощность дозы, нЗв/ч [Dose rate, nSv/h]	Координаты, град [Coordinates, degrees]	Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg]			
				¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
1	Площадка около двигателя бетоноподатчика (спектр-1 Агат) [The area near the concrete-carrier's engine (spectrum-1 Agat)]	107	N 65.99566 E 41.03212	<3	17±4	12±4	492±110
2	Внутри бетоноподатчика (спектр-5 Агат) [Inside the concrete sensor (spectrum-5 Agat)]	129	N 65.99550 E 41.03223	<3	12±4	24±5	554±117
3	Остатки деревянного строения [Remains of a wooden structure]	100	N 65.99555 E 41.03263	<3	14±5	11±5	504±116
4	Лагерь (спектр-4 Агат) [Camp (spectrum-4 Agat)]	101	N 65.99542 E 41.03267	<3	14±5	12±4	486±112
5	Место высадки [Landing site]	98	N 65.99533 E 41.03312	<3	<10	14±5	446±106

Таблица 3

Удельная активность трития в пробах воды в ОЗ МЯВ «Агат»

[Table 3]

Specific activity of tritium in water samples collected in the protected zone of PNE «Agat»

Код пробы [Sample code]	Координаты, град [Coordinates, degrees]		Удельная активность ³ H*, Бк/кг [Specific activity ³ H*, Bq/kg]	Примечание [Note]
	Северная широта [N]	Восточная долгота [E]		
TP 136	65.99553	41.03199	1,64±0,59	Боевая скважина, труба [Well, pipe]
TP 89	65.99561	41.03197	1,49±0,58	Внутри бетоноподатчика [Inside the concrete sensor]
TP 105	65.99555	41.03231	1,64±0,59	Металлоконструкции [Metal structures]
TP 106	65.99670	41.03434	2,86±0,61	Труба с водой (территория МЯВ) [Pipe with water]
TP 145	65.99498	41.03115	1,43±0,58	Озеро [Lake]
TP 93	65.99364	41.03159	1,65±0,59	Болото [Swamp]
TP 180	65.99094	41.03248	2,35±0,60	Болото [Swamp]
TP 179	65.99855	41.02437	1,09±0,58	–
TP 95	65.99393	41.04314	3,74±0,62	–
TP 58	65.99371	41.04301	2,13±0,59	–
TP 153	66.00727	41.13495	1,49±0,59	–
Уровень вмешательства** [Intervention level**]			7600	

* – Погрешность измерений указана с доверительной вероятностью 95%

[* – Measurement uncertainty is given at 95% confidence probability]

** – В соответствии с Приложением 2а НРБ 99/2009

[** – In accordance with Appendix 2a of NRB 99/2009].

Данные таблиц 1 и 2 свидетельствуют о том, что интенсивность пиков ^{137}Cs в полевых спектрах и удельная активность ^{137}Cs в пробах почвы варьируют в пределах, характерных для уровней глобальных выпадений данного радионуклида (0,3–0,4 имп/с для полевых спектров и около 5 Бк/кг² для удельной активности ^{137}Cs в почве). Это значение подтверждается данными, приведенными в работе [13] для почв г. Москвы в 2019 г., – 4,2 Бк/кг. Удельная активность природных радионуклидов в почве в данном случае намного превышает удельную активность ^{137}Cs .

В таблице 3 представлены результаты измерений удельной активности трития в пробах воды.

Результаты измерений трития (см. табл. 3) показывают отсутствие выноса данного радионуклида на поверхность из зоны взрыва, поскольку зарегистрированные значения характерны для глобальных уровней содержания данного радионуклида в воде поверхностных водоемов и в атмосферных осадках [13].

Санитарная и радиационно-гигиеническая характеристика охранной зоны взрыва «Глобус-2»

В месте проведения взрыва «Глобус-2» устье БС оборудовано разрушающимся бетонным основанием с установленным на нем репером. Репер представляет собой металлическую трубу с круглым металлическим знаком с плохо различимым текстом, запрещающим производство строительных и буровых работ в радиусе 450 м (рис. 2, слева внизу).

Территория ОЗ МЯВ «Глобус-2» расположена в лесном массиве недалеко от дороги, обеспечивающей подъезд к данному объекту.

Территория ОЗ частично захламлена: обнаружено большое количество конструкций (труб и остатков деревянных строений – в основном в радиусе 100 м от БС) (рис. 2).

Значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (до 170 измерений), зафиксированные на территории 500-метрового радиуса от БС, находились в диапазоне от 70 до 215 нЗв/ч, с наименьшими значениями

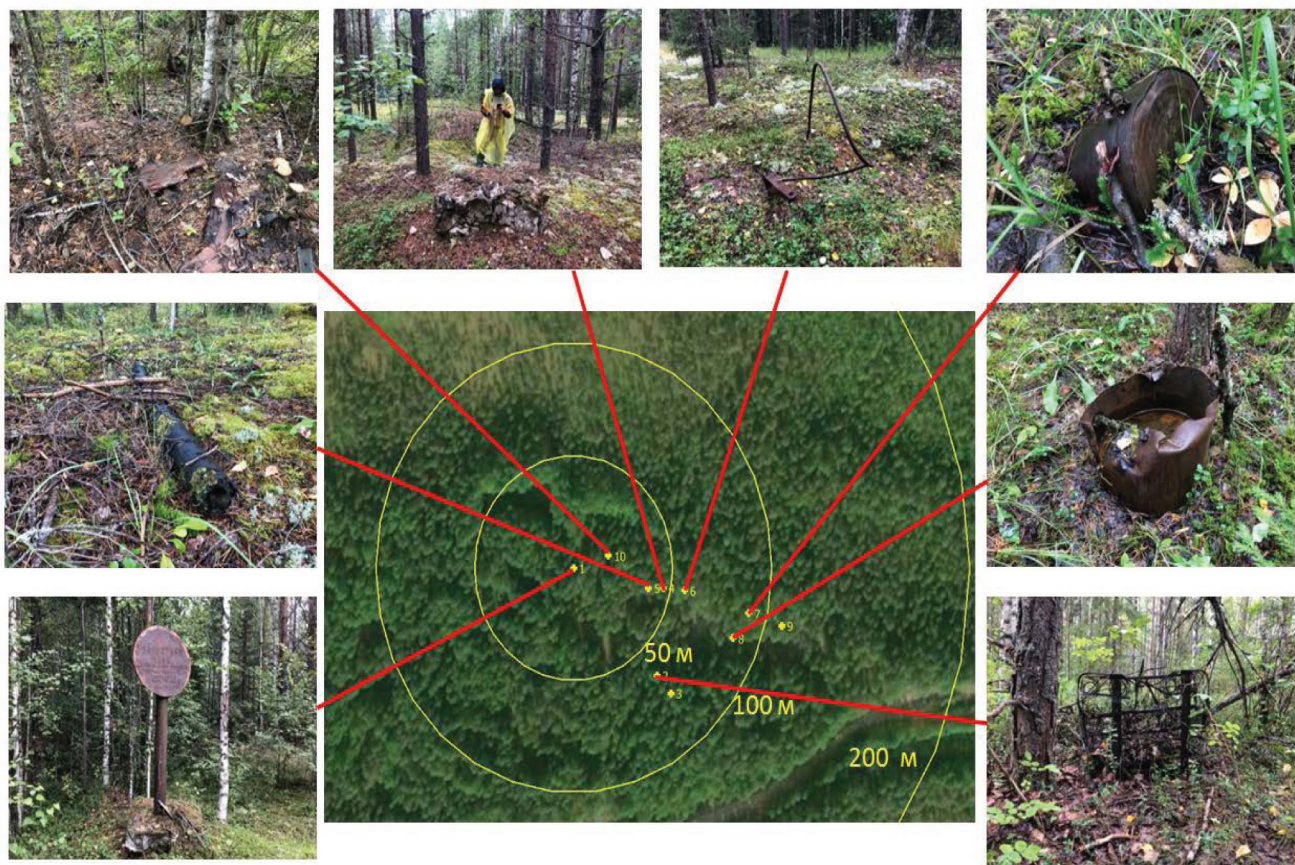


Рис. 2. Санитарное состояние ОЗ МЯВ «Глобус-2»
[Fig. 2. The sanitary condition in the protected zone of PNE «Globus-2»]

² Данная оценка получена исходя из условия, что уровень глобального загрязнения почвы на глубину 20 см составляет в настоящее время примерно 1000 Бк/м². При массе слоя почвы площадью 1 м² 260–320 кг средняя удельная активность почвы на глубину 20 см будет находиться в диапазоне от 3,1 до 3,8 Бк/кг. Консервативная величина принята равной 5 Бк/кг.

ями на расположенных на территории ОЗ обширных болотах (70–80 нЗв/ч).

Места проведения гамма-спектрометрических исследований и результаты измерений в ОЗ МЯВ «Глобус-2» представлены на рисунке 3.

Результаты полевых гамма-спектрометрических исследований в ОЗ МЯВ «Глобус-2» (см. рис. 3) показывают, что, наряду с интенсивностями пиков ^{137}Cs , характерными для территорий с глобальными уровнями радиоактивного загрязнения (0,3–0,4 имп/с), имеют место повышенные уров-

ни значения интенсивности (12–50 имп/с) [13]. В таблице 4 приведены данные лабораторных измерений удельной активности радионуклидов в пробах почвы, отобранных в точках измерений полевых спектров в ОЗ МЯВ «Глобус-2».

Наличие локального загрязнения почвы ^{137}Cs , выявленное при проведении полевой гамма-спектрометрии, подтверждается результатами лабораторных измерений удельной активности ^{137}Cs в пробах почвы, представленных в таблице 4. В двух пробах почвы значения удельной активности ^{137}Cs составили 154 и 160 Бк/кг.

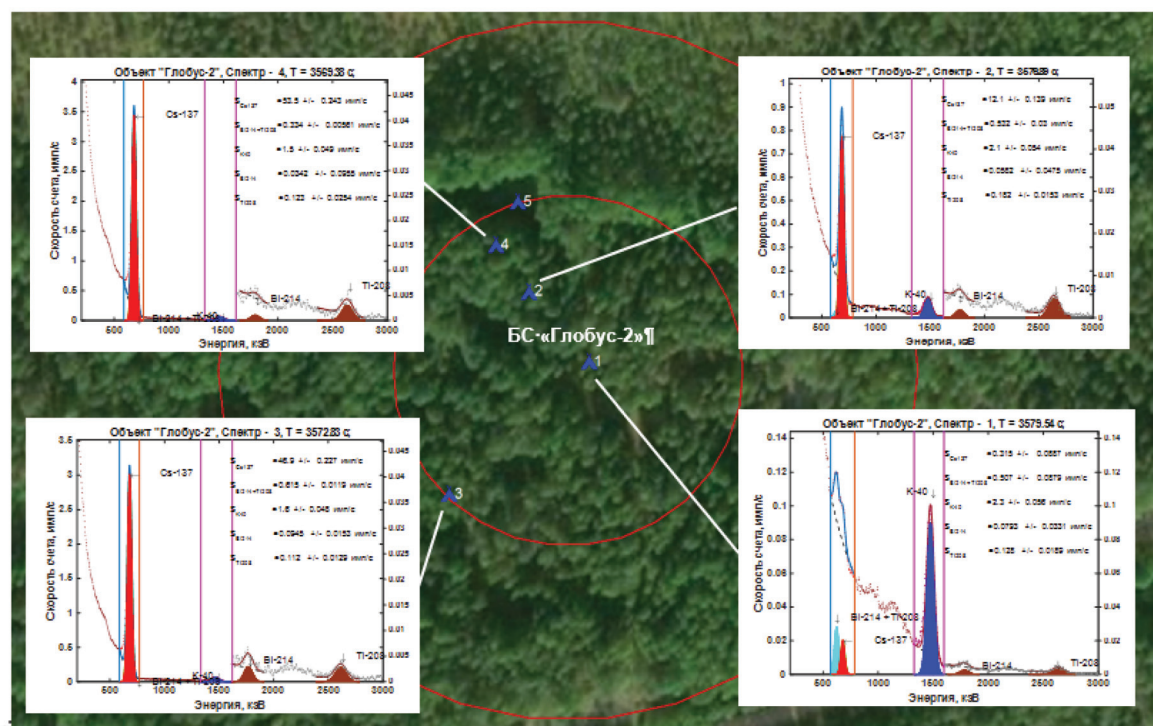


Рис. 3. Места проведения гамма-спектрометрических исследований и спектры, зарегистрированные в ОЗ МЯВ «Глобус-2»
[Fig. 3. Sites of gamma spectrometric measurements and the spectra recorded in the protected zone of PNE «Globus-2»]

Удельная активность в пробах почвы в ОЗ МЯВ «Глобус-2»

Таблица 4

[Table 4]

Specific activity of radionuclides in soil samples collected in the protected zone of PNE «Globus-2»

Код пробы [Sample code]	Место отбора [Sampling location]	Мощность дозы, нЗв/ч [Dose rate, nSv/h]	Координаты, град [Coordinates, degrees]	Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg]			
				Cs ¹³⁷	Ra ²²⁶	Th ²³²	K ⁴⁰
6	Спектр-1 Глобус-2, (точка 1) [Spectrum-1 Globus-2, (point 1)]	94	N 61.36202 E 48.06890	6±2	<10	<12	219±57
7	Спектр-3 Глобус-2, (точка 3) [Spectrum-3 Globus-2, (point 3)]	199	N 61.36232 E 48.06840	154±20	<10	<12	263±68
8	Спектр-4 Глобус-2, (точка 4) [Spectrum-4 Globus-2, (point 4)]	215	N 61.36168 E 48.06815	160±21	<10	<12	233±65

В процессе данного исследования установлены два локальных участка с превышением глобальных уровней радиоактивного загрязнения. Эти же места локального загрязнения были обнаружены ранее, при проведении исследований, выполненных в 2011 г. [8]. В местах локального загрязнения зафиксированы повышенные значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (199–215 нЗв/ч). На остальной территории ОЗ уровни гамма-фона находились в интервале

80–130 нЗв/ч, то есть в пределах колебаний естественного фона, характерного для данного региона (0,08–0,13 мкЗв/ч) [13].

В таблице 5 приведены данные лабораторных измерений удельной активности трития в пробах воды, отобранных в ОЗ МЯВ «Глобус-2».

Содержание трития в водоемах находится на уровне естественных колебаний данного показателя в других регионах (менее 5 Бк/кг) [13].

Таблица 5

Удельная активность трития в пробах воды в ОЗ МЯВ «Глобус-2»

[Table 5]

Specific activity of tritium in water samples in the protected zone of PNE «Globus-2»

Код пробы [Sample code]	Координаты, град [Coordinates, degrees]		Удельная активность $^3\text{H}^*$, Бк/кг [Specific activity $^3\text{H}^*$, Bq/kg]	Примечание [Note]
	Северная широта [N]	Восточная долгота [E]		
TP 148	61.36216	48.07080	3,21±0,61	Лес [Forest]
TP 22	61.36156	48.07199	2,61±0,60	Болото [Swamp]
TP 5	61.36250	48.07148	1,97±0,59	Болото [Swamp]
TP 29	61.36002	48.07169	2,25±0,60	Лес [forest]
TP 57	61.36173	48.07085	1,78±0,59	Лес [Forest]
TP 26	61.36188	48.07034	2,52±0,59	Лес [Forest]
TP 15	61.36250	48.06852	2,48±0,60	Болото [Swamp]
TP 101	61.36240	48.06830	3,1±0,61	Болото [Swamp]
TP 32	61.36271	48.06853	2,57±0,60	Болото [Swamp]
TP 14	61.36300	48.06807	3,46±0,62	Болото [Swamp]
TP 69	61.36301	48.07056	2,52±0,59	Болото [Swamp]
TP 119	61.36254	48.06884	1,69±0,59	Болото [Swamp]
Уровень вмешательства** [Intervention level**]			7600	

* Погрешность измерений указана с доверительной вероятностью 95%

[* Measurement uncertainty is given at 95% confidence probability]

** В соответствии с Приложением 2а НРБ 99/2009

[** In accordance with Appendix 2a of NRB 99/2009].

Санитарная и радиационно-гигиеническая характеристика охранной зоны взрыва «Рубин-1»

В месте проведения взрыва «Рубин-1» на устье БС имеется бетонное основание с установленным на нем репером. Репер представляет собой металлическую трубу с наваренным на нем круглым металлическим знаком с плохо различимым текстом, запрещающим производство строительных и буровых работ в радиусе 550 м (рис. 4, вверху).

О санитарном состоянии ОЗ взрыва «Рубин-1» дает представление рисунок 4.

Территория ОЗ МЯВ «Рубин-1» расположена в лесном массиве недалеко от дороги, обеспечивающей подъезд к данному объекту. На территории ОЗ находятся металлоконструкции, бытовой мусор. Устье БС полуразрушено.

Значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (до 200 измерений), зафиксированные на территории 500-метрового радиуса от БС, находились



Рис. 4. Санитарное состояние ОЗ МЯВ «Рубин-1»
[Fig. 4. The sanitary condition in the protected zone of PNE «Rubin-1»]

в диапазоне от 75 до 136 нЗв/ч, с наименьшими значениями на расположенных на территории ОЗ обширных болотах – 75–82 нЗв/ч. Эти уровни характерны для естественного природного фона.

На рисунке 5 даны примеры полевых спектров, полученных в ОЗ МЯВ «Рубин-1».

Результаты гамма-спектрометрических исследований в ОЗ МЯВ «Рубин-1» представлены в таблице 6.

Из рисунка 5 и таблицы 6 видно, что, наряду с фоновыми значениями интенсивности счета под пиком ^{137}Cs , на территории ОЗ имеются участки, на которых интенсивность счета под пиком ^{137}Cs превышает фоновые уровни примерно в 2 раза.

В таблице 7 приведены данные лабораторных измерений удельной активности радионуклидов в пробах почвы, отобранных в ОЗ МЯВ «Рубин-1».

Результаты измерений удельной активности проб почвы (см. табл. 7) указывают на слабые уровни загрязнения почвы ^{137}Cs , хотя результаты полевой гамма-спектрометрии выявили незначительное повышение интенсивности счета над фоновыми уровнями.

В таблице 8 приведены данные лабораторных измерений удельной активности трития в пробах воды, отобранных в ОЗ МЯВ «Рубин-1».

Результаты измерений удельной активности трития в пробах воды из поверхностных водоемов, находящихся в ОЗ МЯВ Рубин-1 (табл. 8), не выявили превышений фоновых уровней [13].

Таким образом, радиационная обстановка в ОЗ МЯВ «Рубин-1» характеризуется показателями, на основании

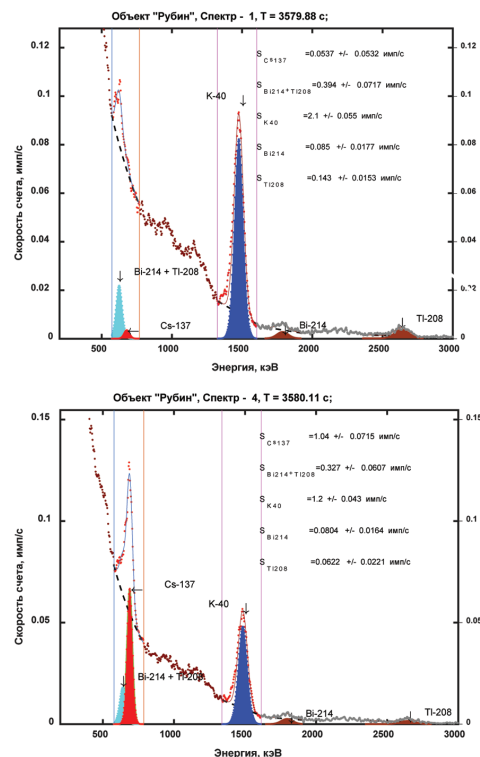


Рис. 5. Примеры спектров с фоновым и повышенным уровнем загрязнения почвы ^{137}Cs , измеренных в ОЗ МЯВ «Рубин-1»
[Fig. 5. Examples of spectra with background and increased level of ^{137}Cs measured in the protected zone of the PNE «Rubin-1»]

Таблица 6

Результаты измерений интенсивности пиков полного поглощения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi и ^{208}Tl в спектрах полевой гамма-спектрометрии в ОЗ МЯВ «Рубин-1»

[Table 6]

Results of measurements of the intensity of peaks of full absorption of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{214}Bi and ^{208}Tl in the spectrums of field gamma spectrometry in the protected zone of PNE «Rubin-1»

Код спектра [Code spectrum]	Координаты, град [Coordinates, degrees]	Интенсивность счета под пиком, имп/с [Intensity of the accounts under peak, IMP]			
		^{137}Cs	^{214}Bi	^{208}Tl	^{40}K
Спектр-1 Рубин-1 [Spectrum-1 Rubin-1]	N 61.35974 E 48.09226	0,075	0,0747	0,142	2,13
Спектр-2 Рубин-1 [Spectrum-2 Rubin1]	N 61.35916 E 48.09319	0,54	0,0522	0,163	2,15
Спектр-3 Рубин-1 [spectrum-3 Rubin1]	N 61.35975 E 48.09230	<0,06	0,0673	0,105	2,29
Спектр-4 Рубин-1 [Spectrum-4 Rubin1]	N 61.35855 E 48.09183	0,86	0,1	0,0654	1,25
Спектр-5 Рубин-1 [Spectrum-5 Rubin-1]	N 61.35900 E 48.09286	0,81	0,093	0,131	2,06

Таблица 7

Удельная активность в пробах почвы в ОЗ МЯВ «Рубин-1»

[Table 7]

Specific activity of radionuclides in soil samples collected in the protected zone of the PNE «Rubin-1»

Код пробы [Sample code]	Место отбора [Sampling location]	Мощность дозы, нЗв/ч [Dose rate, nSv/h]	Координаты, град [Coordinates, degrees]	Удельная активность, Бк/кг [Specific activity, Bq/kg]			
				^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
10	На восток от БС (спектр-3 Рубин-3) [To the east of the well (spectrum-3 Rubin-3)]	91	N 61.35975 E 48.09230	<3	<10	<12	237±65
11	У проволоки [At the wire]	93	N 61.35909 E 48.09313	<3	<10	<12	195±61
12	Боевая скважина (спектр-1 Рубин-1) [Well (spectrum-1 Rubin-1)]	95	N 61.35974 E 48.09226	<3	<10	<12	228±69
13	За дорогой (спектр-4 Рубин-1) [Behind the road (spectrum-4 Rubin-1)]	86	N 61.35855 E 48.09183	4±3	<10	<12	142±60
14	Дорога между Рубин-1 и Глобус-2 [The road between Rubin-1 and Globus-2]	96	N 61.36013 E 48.08586	<3	10±4	<12	232±70
15	10 метров за мостом через Большой Томбач (правый берег) [10 meters behind the bridge over the Great Tombaj (right bank)]	97	N 61.35882 E 48.09674	<3	10±5	<12	241±75
16	Луг [Meadow]	96	N 61.35900 E 48.09366	<3	<10	<12	261±74

Таблица 8

Удельная активность трития в пробах воды в ОЗ МЯВ «Рубин-1»

[Table 8]

Specific activity of tritium in water samples collected in the protected zone of the PNE «Rubin-1»

Код пробы [Sample code]	Координаты, град [Coordinates, degrees]		Удельная активность $^3\text{H}^*$, Бк/кг [Specific activity $^3\text{H}^*$, Bq/kg]	Примечание [Note]
	Северная широта [N]	Восточная долгота [E]		
ТР 27	61.35690	48.09619	< 1,0	Болото [Swamp]

Код пробы [Sample code]	Координаты, град [Coordinates, degrees]		Удельная активность $^3\text{H}^*$, Бк/кг [Specific activity $^3\text{H}^*$, Bq/kg]	Примечание [Note]
	Северная широта [N]	Восточная долгота [E]		
TP 97	61.35788	48.09226	2,01±0,59	Болото [Swamp]
TP 40	61.35918	48.09632	2,03±0,59	Река Томбаш [River Tombash]
TP 23	61.36081	48.10085	2,16±0,60	Лес [forest]
TP 70	61.36131	48.09737	2,4±0,60	Лес [forest]
TP 135	61.36029	48.09293	1,97±0,59	Пруд [Swamp]
TP 108	61.36256	48.09290	1,24±0,58	–
TP 11	61.36179	48.09321	2,65±0,60	Река М. Томбаш [River M. Tombash]
TP 37	61.36383	48.09252	2.99±0,61	Река М. Томбаш [River M. Tombash]
TP 10	61.22115	47.58810	1.69±0,59	Ручей [Stream]
TP 79	66.00727	41.13495	2,57±0,60	Лес [Forest]
Уровень вмешательства ** [Intervention level **]			7600	

* Погрешность измерений указана с доверительной вероятностью 95%

[* Measurement error is 95% confidence probability]

** Значения приведены в соответствии с Приложением 2а НРБ 99/2009

[** According Annex 2a NRB 99/2009]

которых можно утверждать, что локальные загрязнения территории ^{137}Cs и водных объектов тритием отсутствуют.

Заключение

В 2020 г. были проведены исследования санитарного и радиационно-гигиенического состояния территорий охранных зон мирных ядерных взрывов «Глобус-2», «Агат» и «Рубин-1», осуществленных в Архангельской области для глубинного сейсмического зондирования земной коры.

В результате исследований установлено:

1. Значения мощности дозы на всех обследованных территориях ОЗ МЯВ находятся на уровне колебаний естественного регионального радиационного фона. В отдельных точках на территории ОЗ МЯВ «Глобус-2» зафиксированы небольшие повышенные значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения.

2. Результаты исследований 2020 г. подтвердили результаты исследований, выполненных в 2011 г., о наличии на территории ОЗ МЯВ «Глобус-2» участков незначительного локального загрязнения почвы ^{137}Cs .

3. Значения удельной активности трития в воде водных объектов, расположенных на территориях ОЗ МЯВ, находятся в пределах показателей, характерных для водных объектов территории Российской Федерации.

4. При оценке санитарного состояния территорий ОЗ МЯВ обнаружены заржавевшее технологическое оборудование, бочки, мусор. Устья БС МЯВ «Глобус-2» и «Рубин-1» подвержены пожарной опасности, поскольку окружены зарослями леса

5. Информационные знаки, установленные на полуразрушенных бетонных основаниях, расположенных на устьях БС обследованных МЯВ, имеют едва различимые надписи.

Благодарности

Статья подготовлена в ходе выполнения работ по государственному контракту 81.011.20.2 от 20 мая 2020 г. «Разработка и научное обоснование радиационно-гигиенических требований к охраняемым зонам мирных ядерных взрывов при переводе их в стадию консервации» (шифр: «Мирные РАО – 20»).

Авторы выражают свою благодарность Бузинову Роману Вячеславовичу – руководителю Управления Роспотребнадзора по Архангельской области, Уварову Александру Викторовичу – руководителю агентства государственной противопожарной службы и гражданской защиты Архангельской области, Мальцевой Ларисе Юрьевне – главе администрации Ручьевского сельского

поселения за оказание содействия и помощь в организации экспедиции.

Литература

1. Современная радиоэкологическая обстановка в местах проведения мирных ядерных взрывов на территории Российской Федерации / Колл. авторов; под рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2005. 256 с.
2. Ядерные испытания СССР. Том 4. Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований / Колл. авторов под рук. В.Н. Михайлова. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2000. 200 с.
3. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / Колл. авторов под. рук. проф. В.А. Логачева. М.: Изд.АТ, 2001. 519 с.
4. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Камнев Е.Н., и др. Георадиоэкологические проблемы объектов мирных ядерных взрывов – пунктов размещения особых радиоактивных отходов // Атомная энергия. 2012. Т. 113, № 5. С. 289-293.
5. Репин В.С., Рамзаев В.П., Храмцов Е.В. Роль охранных зон в обеспечении радиационной безопасности населения, проживающего в районах проведения мирных ядерных взрывов // Сборник тезисов международной науч.-практ. конф. Актуальные вопросы радиационной гигиены, Санкт-Петербург, 1-3 октября 2012. СПб, 2012. С. 109-112.
6. Киселёв Г.П. Баженов А.В., Киселева И.М., Дружинин С.В. Радиоактивность эпицентральных зон промышленных ядерных взрывов // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: естественные науки. 2014. № 4. С. 21-31.
7. Зеленцова С.А., Архангельская Г.В., Зыкова И.А., и др. Мирные ядерные взрывы в Архангельской области и отношение населения к их последствиям // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 2. С. 14-19.
8. Вилегодский государственный природный биологический заказник регионального значения. Сборник докладов. Архангельск: Ком. по экологии Арханг. области. 2007. 62 с.
9. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 27-33.
10. Рамзаев В.П., Медведев А.Ю., Репин В.С., и др. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 1. С. 33-39.
11. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 53, Volume 27, Issue 2, 1 December 1994.
12. Руководства по мониторингу при ядерных или радиационных авариях. МАГАТЭ, Вена. IAEA-TECDOC-1092/R. IAEA, 2002.
13. Радиационная обстановка на территории РФ и сопредельных государств в 2019 году. Ежегодник. Обнинск, 2020. 340 с.

Поступила: 23.11.2020 г.

Храмцов Евгений Витальевич – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: zhenia.khramtzov2013@yandex.ru

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

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

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

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

Для цитирования: Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М., Варфоломеева К.В., Иванов С.А. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 111-123. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123

Radiation-hygienic characteristic of the protected zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region

Evgeniy V. Khramtsov, Viktor S. Repin, Artem M. Biblin, Kseniya V. Varfolomeeva, Sergey A. Ivanov

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

The article presents data on the radiation situation on the territories of the protected zones of peaceful nuclear explosions «Globus-2», «Agat» and «Rubin-1» based on the results of field studies in 2020. Peaceful nuclear explosions were conducted in the Arkhangelsk region for seismic exploration. The results of the radiation-hygienic state of protected zones and radiation safety in the territories adjacent to peaceful nuclear explosions are analyzed by the main indicators: the values of the ambient dose equivalent of gamma radiation, the identification of gamma-emitting radionuclides in situ by field gamma spectrometry, the specific activity of technogenic radionuclides in the soil and tritium in the water of reservoirs and drinking water sources. An assessment of the sanitary condition of the studied territories of protected zones of peaceful nuclear explosions is given. It was found that the levels of the ambient dose equivalent rate of the gamma radiation at all sites are at the level of fluctuations in the natural regional radiation background in the range of 0.08–0.20 microSv/h. On the territory of the protected zone of the peaceful nuclear explosion «Globus-2» were repeatedly identified areas of minor local soil contamination with ^{137}Cs (the previous study was performed in 2011). Increased values of the ambient equivalent dose rate of gamma radiation (0.20–0.22 $\mu\text{Sv/h}$) and specific activity of ^{137}Cs in two soil samples (154 and 160 Bq/kg, respectively) were found in these areas. The tritium content in the water of water supply sources does not exceed 5 Bq/kg. These values are typical for global levels of this radionuclide in water bodies. Remains of technological equipment were found on the territories of the protected zones of the peaceful nuclear explosions (especially in the protected zone of the explosion «Agat»), as well as rusty metal pipes and barrels, the remains of wooden structures, etc. Information signs installed on dilapidated concrete foundations at the mouths of combat wells of all surveyed peaceful nuclear explosions have subtle inscriptions. The presence of forest thickets in the places where the investigated peaceful nuclear explosions are conducted and their ignition during forest fires is a potential threat to the release of technogenic radionuclides during depressurization of the mouths of combat wells.

Key words: peaceful nuclear explosion, protective zone, radionuclides, radioactive contamination, radiation safety, sanitary waste.

References

1. Modern radioecological situation in the field of peaceful nuclear explosions on the territory of the Russian Federation / PCs. authors; under hands. Prof. V.A. Logacheva. Moscow; 2005. 256 p. (in Russian).
2. Soviet nuclear tests. Volume 4. Using nuclear explosions to solve economic tasks and research / PCs. the authors hand. V.N. Mikhailov. Sarov: VNIIEF; 2000. 200 p. (in Russian).
3. Peaceful nuclear explosions: General and radiation safety when they hold/ PCs. authors; under hands. Prof. V.A. Logachev. Moscow; 2001. 519 p. (in Russian).
4. Kasatkin VV, Ilichev VA, Kamnev EN, Kasatkin AV, Samorodova TS. Geological and radioecological problems of the objects formed by peaceful nuclear explosions – special rad-waste repositories. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2012;113(5): 289–293. (In Russian).
5. Repin VS, Ramzaev VP, Khramtsov EV. The role of protected zones in ensuring the radiation safety of the population living in the areas of peaceful nuclear explosions. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «Actual Issues of Radiation Hygiene» 1–3 October 2012, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg: NIIRG; 2012. P. 109–112. (In Russian).
6. Kiselev GP, Bazhenov AV, Kiseleva IM, Druzhinin SV. Radioactivity of epicentral zones of industrial nuclear explosions in Arkhangelsk region. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federalnogo universiteta. Seriya: estestvennye nauki = Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series «Nature Sciences»*. 2014;4: 21–31 (In Russian).
7. Zelentsova SA, Arkhangelskaya GV, Zykova IA, Khramtsov EV, Zelentsov IG. Public attitude to consequences of peaceful nuclear explosions in Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2012;5(2): 14–19. (In Russian).
8. Vilegodsky state natural biological reserve of regional significance: Proceedings / Com. on the ecology of Arhang. Region; ed: E.V. Shavrina. Arkhangelsk; 2007. 62 p. (In Russian).
9. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
10. Ramzaev VP, Medvedev AYU, Repin VS, Timofeeva MA, Khramtsov EV. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to the critical groups of population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 33–39. (In Russian).

Evgeniy V. Khramtsov

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

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: zhenia.khramtzov2013@yandex.ru

11. Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements, Report 53, Volume 27, Issue 2, 1 December 1994.
12. International Commission on Radiation Units and Measurements: Report 53. Gamma-ray spectrometry in the environment / ICRU, 1994. Guidelines for monitoring nuclear or radiation accidents. IAEA, Vienna. IAEA-TECDOC-1092/R. ISSN 1011-4289. IAEA, 2002.
13. Radiation situation in the territory of Russia and neighboring states in 2019. Annual. Obninsk; 2020. 340 p. (In Russian).

Received: November 23, 2020

For correspondence: Evgeniy V. Khramtsov – Researcher, Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Well-Being (Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: zhenia.khramtsov2013@yandex.ru)

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

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

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

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

For citation: Khramtsov E.V., Repin V.S., Biblin A.M., Varfolomeeva K.V., Ivanov S.A. Radiation-Hygienic characteristic of the protective zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No. 1. P. 111-123. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123

Изучение уровней содержания радона в зданиях дошкольных и школьных учреждений г. Душанбе Республики Таджикистан

С.В. Муминов¹, Б.Б. Баротов¹, М.М. Махмудова², Ф.А. Хамидов¹, М.З. Ахмедов¹, У.М. Мирсаидов¹

¹Агентство по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

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

Проведено исследование уровней содержания радона в помещениях зданий дошкольных и школьных учреждений г. Душанбе Республики Таджикистан. Измерения объемной активности радона проводились интегральным методом с помощью трековых экспозиметров Radtrak². Экспозиметры устанавливались для проведения измерений на 3 месяца в отопительный и теплый периоды года в одних и тех же помещениях. Обследованы 200 помещений в 14 детских садах и 36 школах города Душанбе. Представлены результаты расчета эквивалентной равновесной объемной активности радона в помещениях на разных этажах в отопительный и теплый периоды года. Среднегодовые значения эквивалентной равновесной объемной активности радона в помещениях детских садов и школ находятся в интервале 42–331 Бк/м³. Среднее среднегодовое значение эквивалентной равновесной объемной активности радона на первых этажах составляет 98 Бк/м³, на вторых — 56 Бк/м³. Показано, что как для отдельных периодов, так и в среднем по году средние значения эквивалентной равновесной объемной активности радона в помещениях на вторых этажах по отношению к первым этажам зданий всегда ниже. Определено, что вклад радона и дочерних продуктов его распада в среднегодовую эффективную эквивалентную дозу облучения детей при нахождении в помещениях школ и детских садов города Душанбе составляет 0,64–1,64 мЗв/год. Из 14 обследованных детских дошкольных учреждений только в 1 детском саду было выявлено незначительное превышение содержания радона на первом этаже в отопительный период. Из 36 обследованных школ только в 3 обнаружено повышенное содержание радона на первых этажах в теплый период, а в отопительный период их количество увеличивается до 8. При сопоставлении результатов измерений эквивалентной равновесной объемной активности радона с данными о геологической структуре подстилающих пород в местах расположения этих школ какой-либо закономерности не выявлено. Проведение дополнительных обследований зданий школ, включая подвальные помещения, позволит установить источник поступления радона в воздух помещений и разработать рекомендации по осуществлению радонозащитных мероприятий отдельно для каждого здания. Полученные результаты обследований также были использованы для составления радоновой карты города Душанбе.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радон, эквивалентная равновесная объемная активность, школа, детский сад, радоновый мониторинг, трековые детекторы, доза, Душанбе.

Введение

Вклад радона в суммарную дозу облучения населения составляет более 50%. В настоящее время убедительно продемонстрирована связь между раком легкого и облучением радоном в жилищах, при этом отмечено, что радон является вторым по значимости (после курения) фактором риска возникновения рака легкого. Учитывая данные обстоятельства, ограничение облучения населения радоном и его дочерними продуктами распада является важной научно-практической задачей, решение которой в настоящее время выходит за рамки исключительно радиологических аспектов и приобретает широкое звучание в контексте общественного здравоохранения [1].

Проблемы и закономерности формирования радонового поля, радоновая безопасность жилых и общественных зданий различного назначения подробно рассмотрены в публикациях [2–4]. В работах [5, 6] описан радоновый мониторинг, проведенный ранее вокруг радиоактивных хвостохранилищ на территории Северного Таджикистана.

Критической группой населения относительно облучения радоном, по мнению авторов, являются дети. Поэтому во многих странах облучение детей и подростков радоном изучается отдельно [7].

В настоящей работе представлены основные результаты проведенных исследований уровней содержания радона в помещениях дошкольных и школьных учреждений г. Душанбе.

Баротов Бахтиёр Бурхонович

Агентство по ядерной и радиационной безопасности

Адрес для переписки: 734025, Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33; E-mail: b.barotov@nrta.tj

Радиационный фон помещений (РФП) – излучение земного и космического происхождения, постоянно действующее на человека при его нахождении в пространстве внутри здания. РФП формируется как естественный и техногенно измененный радиационный фон; обычно причиной возникновения радиационного фона в зданиях является активность 3 основных естественных долгоживущих радионуклидов: ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K , а также техногенного ^{137}Cs в строительных материалах, и активность в воздухе изотопов радона и их дочерних продуктов распада. Основные составляющие радиационного фона помещений в значительной степени зависят от деятельности человека. Это связано, прежде всего, с местонахождением площадки для строительства, радиационными характеристиками строительных материалов, проектными и конструктивными решениями при строительстве зданий.

Измерения не всегда подтверждают сложившийся стереотип о том, что в подвальных помещениях и на нижних этажах зданий радон скапливается в больших концентрациях, чем на верхних.

Цель исследования – исследование радиационного фона, обусловленного радоном, в помещениях дошкольных и школьных учреждений города Душанбе, установление зависимости содержания радона в этих учреждениях от различных факторов и расчет средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения, обусловленной радоном и дочерними продуктами его распада.

Задачи исследования

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- 1) выбор объектов, установка и сбор экспозиметров;
- 2) обработка результатов, определение условий и доз облучения.

Материалы и методы

Для определения содержания радона в помещениях дошкольных учреждений и школах города Душанбе был использован интегральный метод измерения объемной активности (ОА) радона с применением трековых детекторов.

Для измерения содержания радона в классах школ и помещениях детских садов были установлены пассивные пробоотборные камеры (экспозиметры) с трековыми детекторами типа Radtrak² производства Швеции. Данные детекторы на основе пластика CR-39 можно использовать для проведения измерений в течение 2–6 месяцев и регистрировать уровни ОА радона от 15 до 25 000 Бк/м³. Трековые детекторы были предоставлены Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) в рамках регионального проекта технического сотрудничества¹. В части обследуемых помещений, помимо интегральных измерений ОА радона, проводилось

и измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения. Измерение проводилось в течение 3 месяцев, как в отопительный период, так и в теплый период. Далее детекторы были отправлены в компанию Radonova Laboratories AB (Уппсала, Швеция) для обработки и считывания показаний согласно стандарту ISO 11665-4².

При проведении измерений фиксировались следующие характеристики объектов и условия измерений: срок эксплуатации здания; этаж установки детекторов; время года; продолжительность измерений; условия вентиляции или частота проветривания помещений; среднее время нахождения людей в помещениях и мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в помещениях. Экспозиметры в обследуемых помещениях размещали в местах, удаленных от окон и отопительных приборов на высоте 1–2 м над уровнем пола.

Для перехода от измеренных значений ОА радона к эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона использовалось значение коэффициента равновесия, равное 0,4 [8, 9].

Продолжительность теплого и отопительного периодов определялась, исходя из решений административных органов управления территорией о начале и завершении отопительного периода.

Значение средней индивидуальной годовой эффективной дозы внутреннего облучения за счет короткоживущих дочерних продуктов радона в воздухе рассчитывалось на основе полученных значений ЭРОА радона в воздухе помещений с использованием дозового коэффициента из отчетов НКДАР ООН за 2000 и 2006 гг., равного $9,0 \cdot 10^{-6}$ мЗв/(Бк·ч/м³) [8, 9]. При оценке доз облучения воспитанников детских учреждений за счет ингаляции радона учитывалась доля времени, которую дети проводят в помещениях детских садов (0,33, т.е. 8 ч в день, 2000 ч в год) и школ (0,25, т.е. 6 ч в день, 1200 ч в год).

Обследования были проведены в 36 школах и 14 детских садах города Душанбе, расположенных в районах Фирдавси, Шохмансур, И. Сомони и Сино. В каждом здании были обследованы 4 помещения: 2 на первом и 2 на втором этажах. Всего было обследовано 200 помещений. Согласно данным [10], геологическая структура территории города Душанбе разнообразна и состоит, в основном, из неравномерно распределенного гравийно-галечного отложения, лессовых и лессовидных суглинков (рис. 1). Эти данные могут помочь определить источники поступления радона в воздух помещений.

Практически все школы и детские сады города Душанбе были построены по типовым проектам, фундаменты и несущие конструкции которых выполнены из железобетона, а стены из кирпича. Около 80% обследованных зданий были построены в период с 1950 по 2000 г., а в некоторых из них видны изменения в конструкции.

¹ Региональный проект технического сотрудничества МАГАТЭ RER9153 «Усиление регионального потенциала по контролю над долгосрочными рисками для населения за счет радона в жилищах и на рабочих местах» [IAEA Technical Cooperation Project RER9153 "Enhancing the Regional Capacity to Control Long Term Risks to the Public due to Radon in Dwellings and Workplaces" (In Russ.)]

² ISO 11665-4:2012 (revised by ISO 11665-4:2020). Measurement of radioactivity in the environment – Air: radon-222 – Part 4: Integrated measurement method for determining average activity concentration using passive sampling and delayed analysis.

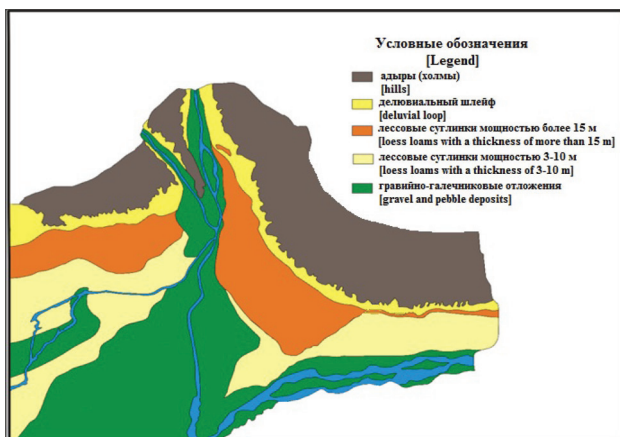


Рис. 1. Схема инженерно-геологического районирования территории города Душанбе

[Fig. 1. Scheme of engineering and geological zoning of the territory of Dushanbe]

Согласно НРБ-06³ Республики Таджикистан, в зданиях жилищного и общественного назначения среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность радона и торона в воздухе помещений не должна превышать 100 Бк/м³ для вновь возводимых зданий и 200 Бк/м³ для эксплуатируемых зданий.

Для проведения измерений (размещения экспозиметров радона) выбирали преимущественно помещения с наиболее длительным пребыванием детей. В детских садах это спальни и игровые комнаты, комнаты для занятий и т.д., в школах – учебные классы. Обследование помещений в режиме их штатной эксплуатации проходило в отопительный период (декабрь 2018 г. – февраль 2019 г.) и теплый период (апрель – июнь 2019 г.).

Обследованные здания находятся в разных частях города. Карта города Душанбе с нанесенными на нее обозначениями зданий, в которых были проведены измерения, представлена на рисунке 2.

Измерения были проведены как на первом, так и на втором этажах зданий, в помещениях, расположенных одно над другим. На каждом этаже было установлено по 2 экспозиметра, всего 4 экспозиметра на здание. Потери при сборе экспозиметров составили 1,5%.

Результаты и обсуждение

Значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в обследованных помещениях, полученные с помощью дозиметров гамма-излучения при установке экспозиметров, находились в интервале от 0,10 до 0,18 мкЗв/ч, среднее значение составило 0,14 мкЗв/ч. Значимых различий в результатах измерений в зависимости от типа здания и этажа не выявлено.

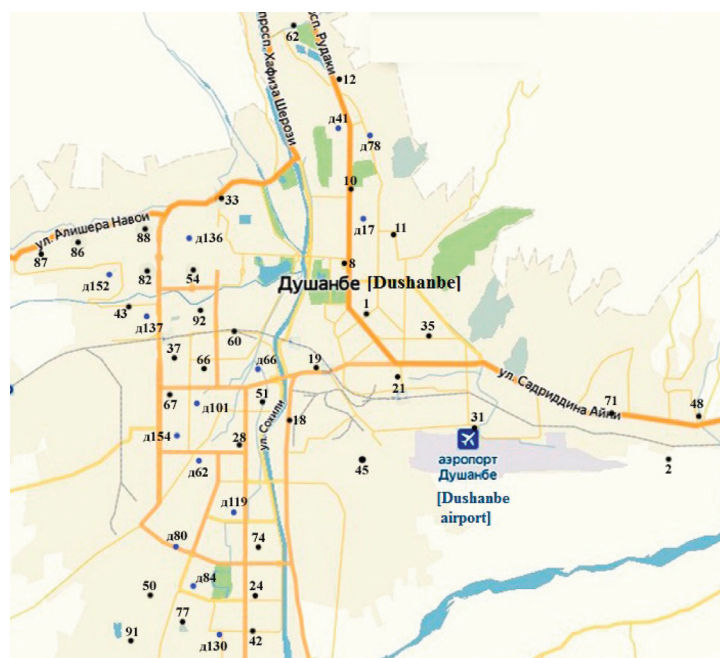


Рис. 2. Карта города Душанбе с обозначением расположения и номеров школ и детских садов, где были проведены измерения радона

[Fig. 2. Map of Dushanbe with location and numbers of schools and kindergartens, where radon measurements were performed]

³ Нормы радиационной безопасности (НРБ-06): Санитарные нормы и правила СанПин 2.6.1.001-06. Утверждены приказом Директора Агентства по ядерной и радиационной безопасности Академии наук Республики Таджикистан от 25.12.2006 г. №12. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Республики Таджикистан 16 января 2007 г., регистрационный №237 [Radiation safety norms (NRB-06): Sanitary standards and rules SanPin 2.6.1.001-06. Approved by the order of the Director of the Nuclear and Radiation Safety Agency of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan dated December 25, 2006 No. 12. Registered in the Ministry of Justice of the Republic of Tajikistan on January 16, 2007, registration No. 237 (In Russ.)]

ЭРОА радона на первом и втором этажах в отопительный и теплый периоды года в классах школ города Душанбе приведены на рисунках 3 и 4, а в помещениях дошкольных учреждений города Душанбе – на рисунках 5 и 6.

Как видно из диаграмм на рисунках 3–6, значения ЭРОА радона в одних и тех же зданиях различаются в зависимости от периода года и этажа, на котором проводилось измерение. ЭРОА радона в теплый период гораздо ниже, чем в отопительный период, что, вероятно, обусловлено частотой проветривания помещений. Также ЭРОА радона в помещениях на втором этаже ниже, чем в помещениях на первом этаже, независимо от периода года.

Из 36 обследованных школ только в 3 обнаружено повышенное содержание радона на первых этажах в теплый

период, а в отопительный период их количество увеличивается до 8. При сопоставлении результатов измерений ЭРОА радона с данными о геологической структуре подстилающих пород в местах расположения этих школ какой-либо закономерности не выявлено.

Для проверки характера распределения значений ЭРОА радона на отдельных этажах и в отдельные периоды года были построены гистограммы частотного распределения на основе объединенных массивов результатов измерений во всех обследованных помещениях на первом и втором этажах зданий (рис. 7), из которых видно, что указанные распределения носят явно выраженный ненормальный характер, поэтому в качестве средних значений для дальнейших расчетов были использованы средние геометрические значения (медианы).

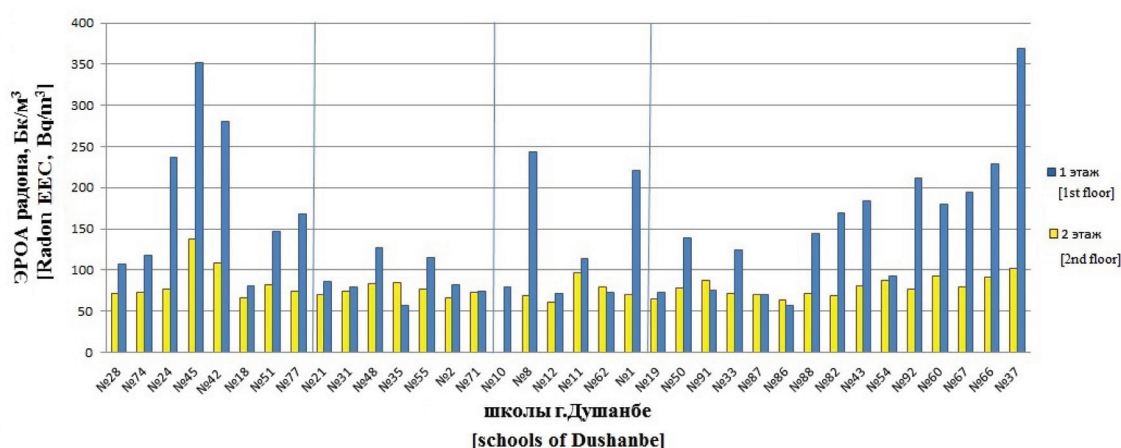


Рис. 3. ЭРОА радона в классах школ города Душанбе в отопительный период
[Fig. 3. Radon EEC in the classrooms of schools in Dushanbe during the heating period]

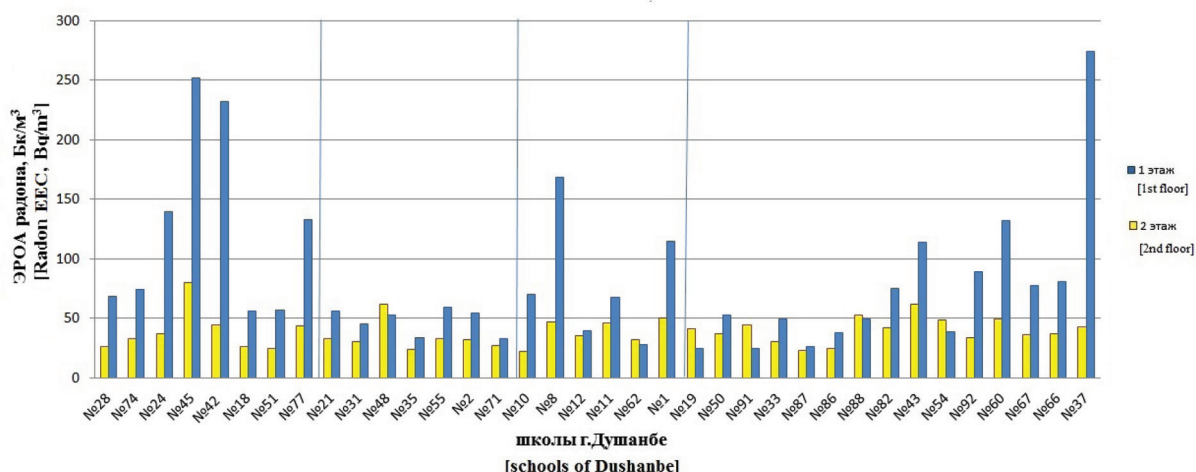


Рис. 4. ЭРОА радона в классах школ города Душанбе в теплый период
[Fig. 4. Radon EEC in the classrooms of schools in Dushanbe during the warm period]

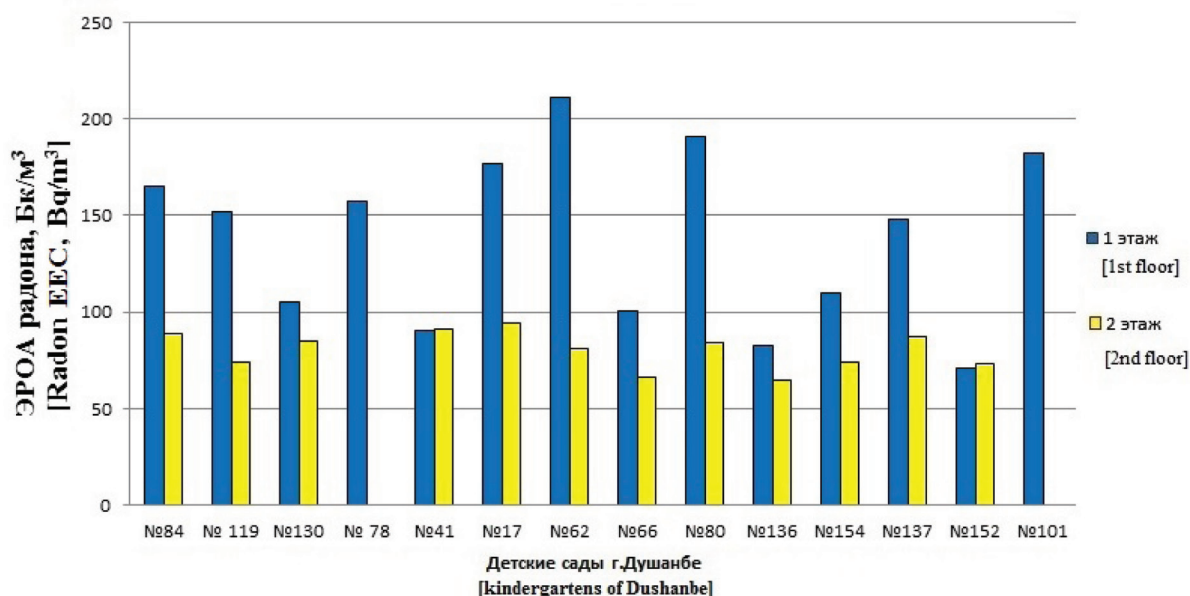


Рис. 5. ЭРОА радона в помещениях дошкольных учреждений города Душанбе в отопительный период
[Fig. 5. Radon EEC in the kindergartens of Dushanbe during the heating period]

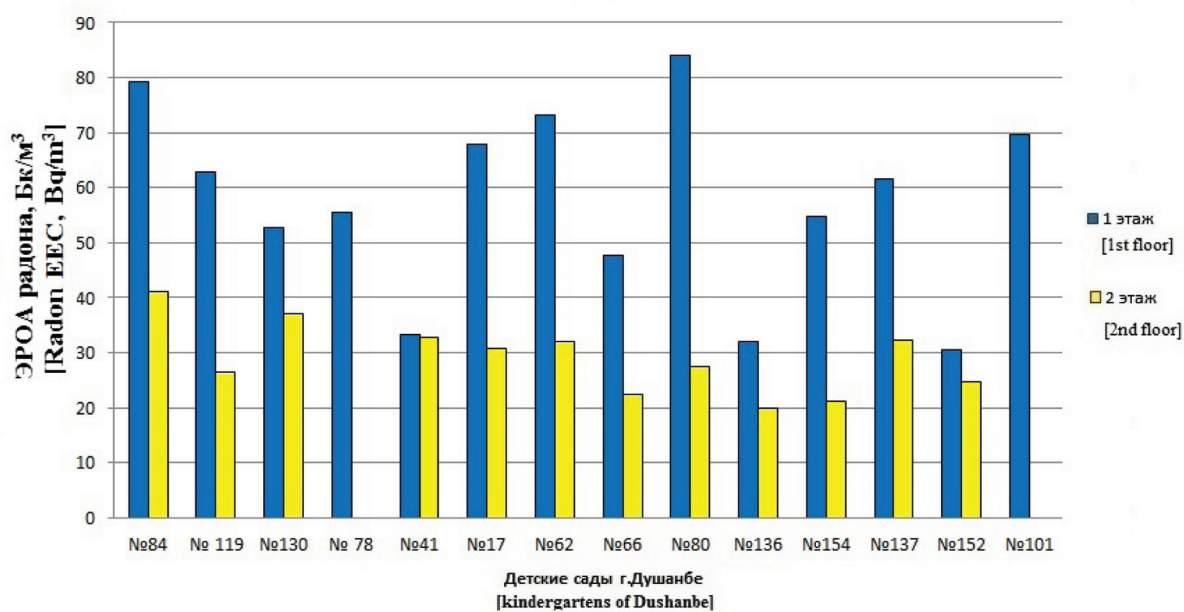


Рис. 6. ЭРОА радона в помещениях дошкольных учреждений города Душанбе в теплый период
[Fig. 6. Radon EEC in the kindergartens of Dushanbe during the warm period]

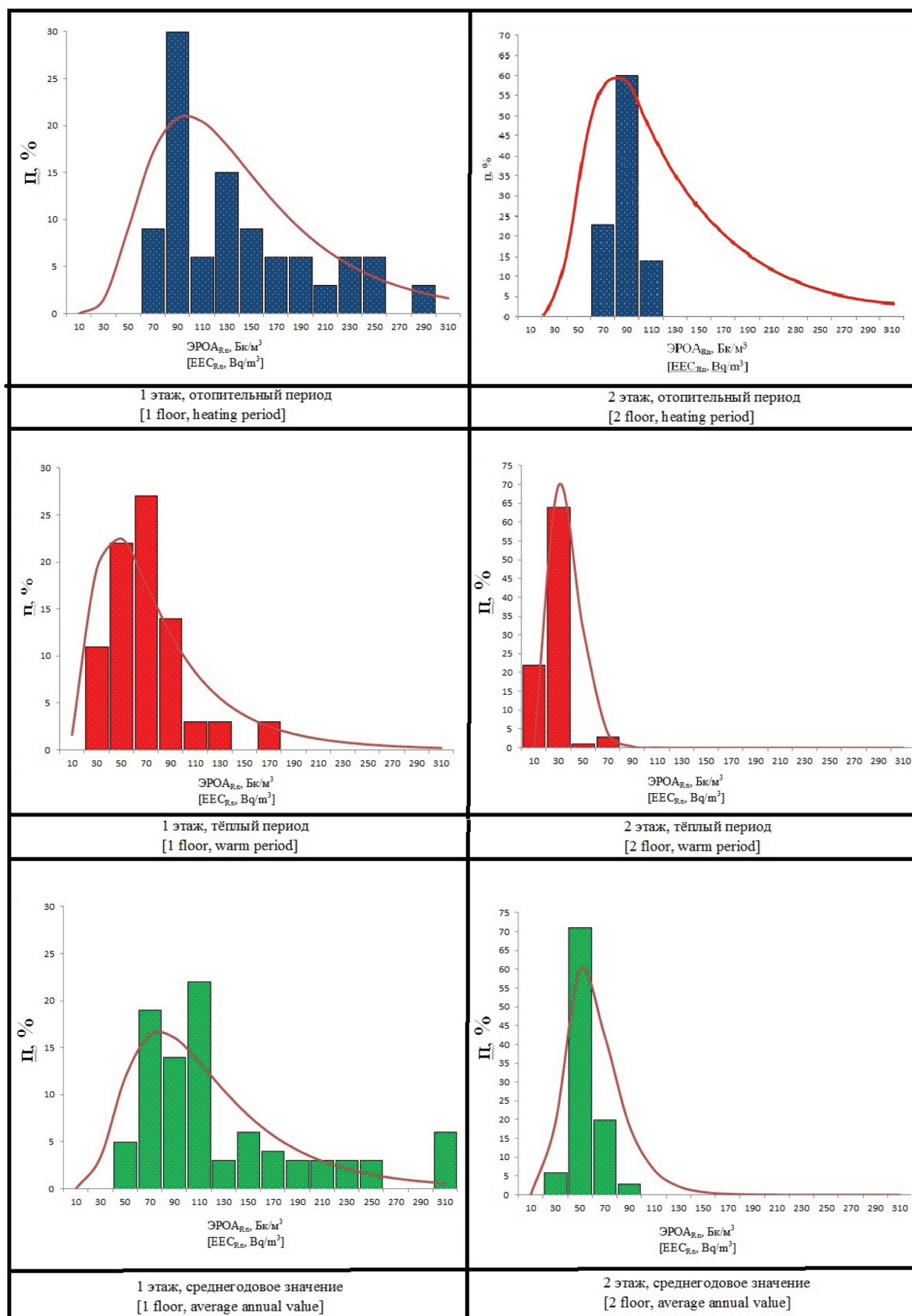


Рис. 7. Распределение значений ЭРОА радона в массивах результатов измерений во всех обследованных помещениях на первом и втором этажах зданий. Огибающие кривые – подобранные логнормальные распределения
[Fig. 7. Distribution of radon EEC values for combined datasets, which contain results of measurements in all surveyed rooms on the 1st and 2nd floors of buildings. Curves show fitted lognormal distributions]

На основе полученных медианных значений ЭРОА радона были рассчитаны значения индивидуальной годовой эффективной дозы облучения в помещениях школ и детских садов города Душанбе (табл.). Полученные значения характеризуют эффективную дозу внутреннего облучения детей за счет ингаляции дочерних продуктов радона при нахождении в помещениях школ и детских садов города Душанбе в течение календарного года.

Заключение

Анализ полученных данных показал, что вклад радона и дочерних продуктов его распада в среднюю годовую эффективную дозу облучения детей при нахождении в помещениях школ и детских садов города Душанбе составляет 0,64–1,64 мЗв. Выявлено, что содержание радона в помещениях, расположенных на втором этаже, гораздо ниже, чем на первом. Проведение дополнительных обследований зданий школ, включая подвальные помещения, позволит установить источник поступления радона в воздух помещений и разработать рекомендации по осуществлению радонозащитных мероприятий отдельно для каждого здания. Полученные результаты обследований также были использованы для составления радоновой карты города Душанбе.

Авторы благодарны МАГАТЭ за техническую помощь и руководству Министерства образования и науки Республики Таджикистан за сотрудничество при проведении исследований.

Литература

1. Радиологическая защита от облучения радон. Перевод публикации 126 МКРЗ; под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. 92 с.
2. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
3. Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В. Радоновая безопасность зданий. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 180 с.
4. Гулябянц Л.А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий. М.: НО «ФЭН-НАУКА», 2013. 52 с.
5. Назаров Х.М., Бобоев Б.Д., Эрматов К.А. Оценка радоноопасности территории Дигмайского хвостохранилища // XXI век. Техноферная безопасность. 2017. Т. 2, № 3 (7). С. 44–48.
6. 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.
7. Павленко Т.А., Костенецкий М.И., Куцак А.В. и др. Уровни облучения дошкольников за счет радона в воздухе помещений // Гигиена и санитария. 2015. Т. 94, № 4. С. 18–21.
8. Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет НКДАР ООН 2000 года Генеральной Ассамблее с научными приложениями. Том 1: Источники (часть 1); пер. с англ., под ред. акад. РАМН Л.А. Ильина и проф. С.П. Ярмошенко. М.: РАДЭКОН, 2002. 308 с.
9. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York: United Nations; 2009. 142 p.
10. Муродкулов Ш.Я. Геологические условия и оценка сейсмической опасности территории г. Душанбе: автореф. дисс. ... геол.-мин. наук. Бишкек, 2017. 23 с.

Поступила: 25.06.2020 г.

Таблица
Среднегодовые значения ЭРОА радона и индивидуальные годовые эффективные дозы облучения детей радоном в помещениях образовательных учреждений

[Table
Annual average values of radon EEC and individual annual effective doses to the children from exposure to radon in the premises of educational institutions]

№	Величина [Value]	Образовательные учреждения [Educational institutions]			
		Школы (1 этаж) [Schools (1 st floor)]	Школы (2 этаж) [Schools (2 nd floor)]	Детсады (1 этаж) [Kindergartens (1 st floor)]	Детсады (2 этаж) [Kindergartens (2 nd floor)]
1.	Диапазон значений среднегодовой ЭРОА радона, Бк/м ³ [Range of annual average radon EEC, Bq/m ³]	49–331	50–82	61–142	42–62
2.	Среднее значение среднегодовой ЭРОА радона, Бк/м ³ [Mean annual average radon EEC, Bq/m ³]	103	59	93	54
3.	Диапазон значений индивидуальных годовых эффективных доз облучения, мЗв [Range of individual annual effective doses, mSv]	0,53–3,6	0,54–0,88	1,09–2,55	0,75–1,11
4.	Среднее значение индивидуальной годовой эффективной дозы облучения, мЗв [Mean individual annual effective dose, mSv]	1,11	0,64	1,67	0,97

Муминов Сафарали Валиевич – заведующий сектором контроля облучения населения Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Баротов Бахтиёр Бурхонович – заведующий научно-исследовательским сектором Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана. Адрес для переписки: 734025, Таджикистан, г. Душанбе, пр. Рудаки, 33; E-mail: b.barotov@nrsa.tj

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

Хамидов Фарход Абдуфаттохевич – заведующий сектором лицензирования и контроля Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Ахмедов Матин Зафарджонович – заместитель директора по науке и образованию Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Мирсаидов Улмас Мирсаидович – главный научный сотрудник Агентства по ядерной и радиационной безопасности Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Для цитирования: Муминов С.В., Баротов Б.Б., Махмудова М.М., Хамидов Ф.А., Ахмедов М.З., Мирсаидов У.М. Изучение уровней содержания радона в зданиях дошкольных и школьных учреждений г. Душанбе Республики Таджикистан // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 124-132. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-124-132

References

1. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126, Ann. ICRP 43 (3); 2014. 73 p.
2. Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Regularities of radon field formation in the geological environment. Moscow: Pero; 2016. 394 p. (In Russian)
3. Zhukovsky MV, Kruzhalov AV, Gurvich VB, Yarmoshenko IV. Radon safety of buildings. Ekaterinburg: UB RAS; 2000. 180 p. (In Russian)
4. Gulabyants LA. A guide for the design of radon protection of residential and public buildings. Moscow: FEN-NAUKA; 2013. 52 p. (In Russian)
5. Nazarov KhM, Boboev BD, Ermatov KA. Radon hazard assessment for the Digma tailing dump. XXI vek. Tekhnosferная bezopasnost = Twenty-first century. Technosphere safety. 2017;2(3(7)): 44–8 (In Russian)
6. Mirsaidov UM, Nazarov KM, Shosafarova SG, Makhmudova MM. Radon monitoring on the territory of Northern Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 68–73. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-68-73 (In Russian)
7. Pavlenko TA, Kostenetskiy MI, Kutsak AV, Sevalnev AI, Aksenov NV, Frizyuk MA. Irradiation levels for preschool children due to indoor radon. *Gigiena i Sanitaria = Hygiene and Sanitation*. 2015;94(4): 18–21 (In Russian)
8. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Volume I: Sources. Annex B: Exposures from natural radiation sources. New York: United Nations; 2000. 76 p.
9. Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II: Scientific Annexes C, D and E. Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. New York: United Nations; 2009. 142 p.
10. Murodkulov ShYa. Geological conditions and seismic hazard assessment of the territory of Dushanbe [dissertation]. Bishkek (Kyrgyzstan); 2017. 23 p. (In Russian)

Received: 25 June, 2020

Radon survey in kindergartens and schools of Dushanbe, Republic of Tajikistan

Safarali V. Muminov¹, Bakhtiyor B. Barotov¹, Manizha M. Makhmudova², Farkhod A. Khamidov¹, Matin Z. Akhmedov¹, Ulmas M. Mirsaidov¹

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

²Avicenna Tajik State Medical University, Dushanbe, Tajikistan

The paper presents results of the radon survey carried out in preschool and school institutions in Dushanbe, Republic of Tajikistan. Radon concentration was measured using solid state nuclear track detectors Radtrak². Track detectors were exposed for 3 months during the heating and warm seasons of the year in

Bakhtiyor B. Barotov

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

Address for correspondence: 33 Rudaki ave, Dushanbe, 734025, Tajikistan; E-mail: b.barotov@nrsa.tj

the same premises. In total, the measurements were performed in 200 premises of 14 kindergartens and 36 schools. The radon equilibrium equivalent concentration during the heating and warm seasons and the annual average radon equilibrium equivalent concentration were calculated. Annual average radon equilibrium equivalent concentration in surveyed buildings ranged from 42 to 331 Bq/m³ with the mean value of 98 Bq/m³ on the first floor and 56 Bq/m³ on the second floor. It was shown that both seasonal values and annual average value of radon equilibrium equivalent concentration in the premises on the second floor are lower than in the premises on the first floor. The annual average effective dose to children from exposure to radon and its progeny in the premises of schools and kindergartens in Dushanbe ranged from 0,64 to 1,64 mSv. The limit value of annual average radon equilibrium equivalent concentration in dwellings and public buildings is set to 100 Bq/m³ for newly built buildings and 200 Bq/m³ for existing buildings in the Radiation safety norms (NRB-06) of the Republic of Tajikistan. This limit was exceeded only on the first floors in one kindergarten during the heating season, in three schools during the warm season and in eight schools during the heating season. When comparing the results of measurements of radon equilibrium equivalent concentration with data on the geological structure of underlying rocks at the locations of the surveyed buildings, no regularity was found. Additional detailed measurements in the buildings, including basements, will help to identify the source of radon entry into the indoor air and to develop recommendations for implementing radon remediation actions separately for each building. The survey results were also used to develop a radon map of Dushanbe.

Key words: radiation safety, radon, equilibrium equivalent concentration, school, kindergarten, radon monitoring, track detectors, dose, Dushanbe.

Safarali V. Muminov – Leader of the sector of the control of the public exposure, Nuclear and Radiation Safety Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

For correspondence: Bakhtiyor B. Barotov – Leader of the scientific-research sector, Nuclear and Radiation Safety Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan (33 Rudaki ave, Dushanbe, 734025, Tajikistan; E-mail: b.barotov@nrsta.tj)

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

Farkhod A. Khamidov – Leader of the licensing and control sector, Nuclear and Radiation Safety Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

Matin Z. Akhmedov – Deputy director on science and education, Nuclear and Radiation Safety Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

Ulmas M. Mirsaidov – Chief scientist, Nuclear and Radiation Safety Agency of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

For citation: Muminov S.V., Barotov B.B., Makhmudova M.M., Khamidov F.A., Akhmedov M.Z., Mirsaidov U.M. Radon survey in kindergartens and schools of Dushanbe, Republic of Tajikistan. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021. Vol. 14, No 1. P. 124-132. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-124-132

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 научно-го 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.