

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 15 № 1, 2022



**Научно-практический
журнал**

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

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

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

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

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

Издается ежеквартально.

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

Ссылка на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» обязательна.

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

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

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

Тираж 150 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 15 № 1, 2022

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)

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

FOUNDER:

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

Quarterly published

Editorial office address:

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

RADIATION HYGIENE

Chairman of Editorial Council

Gennadiy G. Onishchenko

Editor-in-Chief

Ivan K. Romanovich



RADIATION HYGIENE

Vol. 15 № 1, 2022

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mattsson Lars Juhan Sören — Professor of medical radiation physics department of Lund University (Malmö, 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 15 № 1, 2022

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С., Храмов Е.В., Варфоломеева К.В.

Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр»6

Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклейев А.В.

Восточно-Уральский радиоактивный след: смертность от злокачественных опухолей за 57-летний период (1957–2014 гг.)27

Рабинович Е.И., Поволоцкая С.В., Дегтева М.О., Толстых Е.И.

Связь распространенности заболеваний щитовидной железы с дозой облучения у лиц, переселенных с радиоактивно загрязненных территорий Южного Урала36

Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д.,

Малиновский Г.П., Васильев А.В., Назаров Е.И.

Оценка уровней содержания радона в многоэтажных зданиях на примере восьми крупных городов России47

Голиков В.Ю.

Оценка радиационного риска, обусловленного проведением медицинских исследований в Российской Федерации с учетом половозрастного состава пациентов59

Зарединов Д.А., Ли М.В.

Оценка радиационных рисков облучения пациентов при проведении мультисрезовой спиральной компьютерной томографии на основе эффективных доз68

Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф.

Оценка радиоактивного загрязнения лекарственных растений луговых экосистем поймы реки Сож спустя 30 лет после катастрофы на Чернобыльской атомной станции80

ДИСКУССИИ

Романович И.К., Водоватов А.В., Библин А.М., Кормановская Т.А.

К проблеме совершенствования законодательного и нормативного обеспечения радиационной безопасности населения88

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Маренный А.М., Антропов С.Ю., Карл Л.Э., Щитов Д.В.,

Сидякин П.А., Мурзабеков М.А.

Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения96

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Сапрыкин К.А.

Опыт использования систем радиационного контроля в России во время проведения Чемпионата мира по футболу 2018104

МНЕНИЕ ЭКСПЕРТА

Балтрукова Т.Б., Воронкова С.В., Водоватов А.В.

Актуальные проблемы обеспечения радиационной безопасности при проведении рентгеностоматологических исследований111

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Петрова А.Е., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Станжевский А.А.,

Майстренко Д.Н., Лумпов А.А., Синюхин А.Б., Бойков И.В.,

Рамешвили Т.Е.

Оценка поглощенных доз в органах пациентов от высвобожденного радионуклида-метки при проведении радионуклидной терапии с ^{225}Ac 120

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»132

CONTENTS

Vol. 15 № 1, 2022

RESEARCH ARTICLES

Ramzaev V.P., Biblin A.M., Repin V.S., Khramtsov E.V., Varfolomeeva K.V.

Tritium contamination of surface and ground waters at the

“Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site6

Silkin S.S., Krestinina L.Yu., Akleyev A.V.

East Ural Radioactive Trace: cancer mortality over a 57-year period (1957–2014)34

Rabinovich E.I., Povolotskaya S.V., Degteva M.O., Tolstykh E.I.

Relation between the thyroid diseases prevalence and doses of radiation exposure in the individuals relocated from radioactively contaminated areas in South Urals44

Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovskiy G.P.,

Vasilyev A.V., Nazarov E.I.

Assessment of radon levels in multistory buildings on example of eight Russian cities57

Golikov V.Yu.

Evaluation of the radiation risk of medical examinations in the Russian Federation taking into account the age and sex distribution of the patients66

Zaredinov D.A., Li M.V.

Risk assessment based on effective patient radiation doses during multislice spiral computed tomography68

Daineko N.M., Timofeev S.F.

Assessment of radioactive contamination of medicinal plants of meadow ecosystems of the Sozh River floodplain 30 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant86

DISCUSSIONS

Romanovich I.K., Vodovатов A.V., Biblin A.M., Kormanovskaya T.A.

On the issue of the development of legislative and regulatory provision of the radiation safety of the public94

RADIATION MEASUREMENT

Marennyy A.M., Antropov S.Yu., Karl L.E., Shchitov D.V.,

Sidyakin P.A., Murzabekov M.A.

The system of acquisition of information on indoor radon concentration with the motivated participation of the population102

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Saprykin K.A.

Experience of using radiation monitoring systems in Russia during the 2018 FIFA World Cup109

EXPERT OPINION

Baltrukova T.B., Voronkova S.V., Vodovатов A.V.

Topical issues of the provision of the radiation safety for dental X-ray examinations118

BRIEF MESSAGES

Petrova A.E., Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Stanzhevsky A.A.,

Maystrenko D.N., Lumpov A.A., Sinyukhin A.B., Boykov I.V.,

Rameshvil T.E.

Estimation of absorbed doses in patients' organs from the released radionuclide-label during radionuclide therapy with ^{225}Ac 129

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS132

Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site

Valery P. Ramzaev, Artem M. Biblin, Viktor S. Repin, Evgeniy V. Khramtsov, Kseniya V. Varfolomeeva

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

The article presents results of a study on the tritium content in surface and ground waters in the area of peaceful underground nuclear explosions of the “Dnepr” series. Low-yield thermonuclear explosions (1.8–2.1 kt of TNT equivalent) were carried out inside Mount Kuel’por (Khibiny Massif, Kola Peninsula, Murmansk Oblast, the Russian Federation) in 1972 and 1984. The purpose of the explosions was to crush the ore body (apatite minerals), followed by the extraction of the crushed rock to the ground surface. The main long-term problem generated by these explosions was the flow of tritium-contaminated groundwater onto the ground surface. The area where the explosions took place is actively visited by tourists. Water from local reservoirs, in particular from the Kuniyok River, is used by people for drinking. The purpose of this study was to assess the drinkability of the local waters in terms of activity concentration of tritium. To achieve this goal, 35 water samples were taken in 2019 from wells, boreholes, rivers, streams, lakes and other accessible environmental waterbodies. Activity concentration of tritium in the samples was determined using the Quantulus 1220 low-background liquid scintillation spectrometer. The activity concentration of tritium in the water samples was in a rather wide range: from less than 2 Bq/kg up to 1510 Bq/kg. The maximum value was up to three orders of magnitude higher than the regional background level of approximately 2 Bq/kg. At the same time, the maximum activity concentration was significantly lower compared to the intervention level for drinking water (7600 Bq/kg, according to Sanitary Norms and Rules of the Russian Federation). Based on the results of this study and data obtained by other researchers earlier, it became possible to assess the half-time for decrease of activity concentration of tritium in surface and ground waters in the period 2008–2019. The mean value ($\pm$ standard error of the mean) of the effective half-time of tritium in water from the mine, the boreholes, and the Kuniyok River was estimated as 4.4 ± 0.2 year. The decrease in activity concentration of tritium in water depended more on ecological processes (dilution with “pure” water) than on physical decay of the radionuclide. In 2019, the estimated value of the effective dose due to ingestion of tritium in drinking water from the Kuniyok River was 0.17 μ Sv; this was negligible compared to the dose limit of 1 mSv per year for the public.

Key words: tritium, water, peaceful underground nuclear explosion, “Dnepr”, Murmansk Oblast, Khibiny Massif, Mount Kuel’por, Kuniyok River, effective dose.

Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр»

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

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

В статье приводятся результаты исследования содержания трития в поверхностных и подземных водах в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр». Термоядерные заряды малой мощности (1,8–2,1 килотонны в тротиловом эквиваленте) были взорваны внутри горы Куэльпор (горный массив Хибин, Кольский полуостров, Мурманская область) в 1972 и 1984 гг. Целью взрывного воздействия было дробление рудного тела (апатитовые минералы) с последующим извлечением раздробленной породы на поверхность. Основной долговременной радиологической

Valery P. Ramzaev

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

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

Рамзаев Валерий Павлович

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

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

проблемой, порожденной этими взрывами, являлось поступление на земную поверхность подземных вод, загрязненных тритием. Территория в месте проведения взрывов активно посещается туристами, и вода из местных водоемов, в частности, из реки Кунийок, используется людьми для питья. Целью настоящего исследования являлась оценка пригодности для питья воды из источников долины реки Кунийок по показателю удельной активности трития. Для достижения этой цели в 2019 г. было отобрано 35 проб воды из колодцев, скважин, рек, ручьев, озер и других доступных водных объектов окружающей среды. С помощью низкофонового спектрометрического радиометра альфа- и бета-излучения Quantulus 1220 было определено содержание трития в пробах. Удельная активность трития в воде находилась в весьма широком диапазоне: от менее 2 Бк/кг до 1510 Бк/кг. Максимальное зарегистрированное значение почти на три порядка величины превышало региональную фоновую величину (около 2 Бк/кг), но было существенно ниже уровня вмешательства в питьевой воде (7600 Бк/кг, согласно НРБ-99/2009). По результатам настоящего исследования и данным, полученным ранее другими авторами, представилась возможность оценить время полужизни подземных и поверхностных вод от трития в период 2008–2019 гг. Средняя величина ($\pm$ стандартная ошибка средней) эффективного периода полужизни удельной активности трития в рудничной воде, в воде из скважин и в речной воде равнялась $4,4 \pm 0,2$ года. Снижение концентрации трития в воде в большей мере зависело от экологических процессов (разбавление «чистой» водой), нежели от физического распада радионуклида. Оцененное значение эффективной дозы внутреннего облучения человека за счёт поступления трития в организм с питьевой водой из реки Кунийок в 2019 г. равнялось 0,17 мЗв, что было пренебрежимо мало по сравнению с допустимой дозой техногенного облучения населения 1 мЗв/год.

Ключевые слова: тритий, вода, мирный подземный ядерный взрыв, «Днепр», Мурманская область, Хибины, гора Кузьмор, река Кунийок, эффективная доза.

Introduction

Tritium (^3H or T), the only long-lived ($T_{1/2} = 12.3$ years) radioactive isotope of hydrogen, is ubiquitous on Earth in the atmosphere, hydrosphere and biosphere [1–3]. Tritium is a “soft” beta emitter (the maximum energy of beta particle = 18.6 keV). The tritium concentration in drinking water (in the form of HTO) is regulated by hygienic standards in many countries [4], including the Russian Federation (RF) [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. (hereinafter NRB-99/2009). (In Russian)].

At the present time, there are two main sources of tritium in the atmosphere and the hydrosphere (and subsequently in the human body): 1) natural processes (mainly the formation of ^3H in the upper atmosphere by the interaction of cosmic rays with nuclei of atoms, for instance, of nitrogen and oxygen); 2) the activities of nuclear fuel cycle (NFC) facilities [1–3].

The accidents at the Chernobyl nuclear power plant (1986) and the “Fukushima-1” nuclear power plant (2011) did not affect the annual average tritium content in the atmospheric precipitation water in the RF [5, 6], although at the regional level, directly in Japan, the tritium contamination associated with the Fukushima accident is still a real problem (for example, [7, 8]).

Once a powerful and absolutely dominant source of tritium, which was formed in the stratosphere during the period of nuclear (especially thermonuclear) explosions in the atmosphere (1945–1980) [2, 5], has already been practically depleted. After 2014 it had no significant influence on the dynamics of tritium content in atmospheric precipitation and in water of large rivers in the RF [6]. In 2015–2019, the annual mean activity concentration of tritium in precipitation and river water (outside the radioactive contamination zones), when

Введение

Тритий (^3H или T), единственный долгоживущий ($T_{1/2} = 12,3$ года) радиоактивный изотоп водорода, распространен повсеместно на Земле в окружающей среде – атмосфере, гидросфере и биосфере [1–3]. Тритий является сравнительно «мягким» чистым бета-излучателем (максимальная энергия частиц 18,59 кэВ). Содержание трития в питьевой воде (в форме НТО) регулируется гигиеническими нормативами во многих странах мира [4], включая Российскую Федерацию (РФ)¹.

В настоящее время есть два основных источника поступления трития в атмосферу и гидросферу (а затем и к человеку): 1) естественные процессы (в основном, образование ^3H в верхних слоях атмосферы при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов, например, азота и кислорода); 2) деятельность предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) [1–3]. Аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и АЭС «Фукусима-1» (2011 г.) не сказались на среднегодовом содержании трития в воде атмосферных осадков на территории РФ [5, 6], хотя на региональном уровне, непосредственно в Японии, тритиевое загрязнение, связанное с Фукусимской аварией, до сих пор представляет реальную проблему [7, 8]. Некогда мощный и абсолютно доминировавший источник трития, который сформировался в стратосфере в период проведения ядерных (в особенности термоядерных) взрывов в атмосфере (1945–1980 гг.) [2, 5], уже практически исчез и после 2014 г. не оказывает заметного влияния на динамику содержания трития в атмосферных осадках и в воде крупных рек РФ [6]. В 2015–2019 г. усредненное по всей территории РФ среднегодовое содержание трития в осадках и в речной воде (за пределами зон радиоактивного загрязнения) колебалось в диапазоне 1,6–1,8 Бк/л и

¹ Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534.

averaged over the whole territory of the RF, ranged from 1.6 to 1.8 Bq/l and from 1.6 to 1.9 Bq/l, respectively [6]. These values can be considered as modern background values in relation to the tritium content in atmospheric precipitation and surface waters of the RF.

In the zones of influence of operating NFC facilities, the tritium content in atmospheric precipitation, in surface and ground waters, and in drinking water can significantly exceed the “background” values [9–12]. In addition to operating NFC facilities, local or regional above-background tritium contamination may be associated with some sites of nuclear and radiation legacy [13] of the former USSR. Among these sites, a fairly large group of peaceful underground nuclear explosions (UNEs) sites occupies a certain niche. Currently, these sites have the status of “special radioactive waste disposal sites” in accordance with [Federal Norms and Rules on the Use of Atomic Energy “Requirements for Ensuring the Safety of Special Radioactive Waste Disposal Sites and Special Radioactive Waste Conservation Facilities” (NP-103-17). (In Russian)].

Totally, 81 UNEs were carried out on the territory of the RF within the framework of the USSR program No. 7 “Nuclear explosions for the national economy” [14–17]. The explosion sites are located on the territory of 19 constituent entities of the RF.

Background

Among the performed UNEs, the series of explosions of the “Dnepr” experiment (Mount Kuel’por, Khibiny Massif, Kola Peninsula, Murmansk Oblast, the RF; see Figs. 1 and 2) occupies a special place. Unlike all other UNEs, when the explosive charge was placed underground through a drilled hole, in the “Dnepr” series, the explosive device was loaded through a charging adit pierced into the mountain [15]. The purpose of the explosive impact was the crushing of the ore body (apatite minerals), followed by the extraction of the crushed rock onto the ground surface. Charges of a comparatively low power (1–3 kt of TNT equivalent) were created especially for this purpose. The basis of the charge

1,6–1,9 Бк/л соответственно [6]. Эти значения можно рассматривать в качестве современных фоновых величин в отношении содержания трития в атмосферных осадках и поверхностных водах на территории РФ.

В зонах влияния действующих предприятий ЯТЦ содержание трития в атмосферных осадках, в поверхностных и подземных водах и в питьевой воде может существенно превышать «фоновые» величины [9–12]. Помимо действующих предприятий ЯТЦ, локальное или региональное надфоновое загрязнение тритием может быть связано с некоторыми объектами ядерного и радиационного наследия [13] бывшего СССР. Среди этих объектов определенную нишу занимает довольно многочисленная группа мест проведения подземных мирных ядерных взрывов (МЯВ). В настоящее время эти объекты имеют статус – «пункт размещения особых радиоактивных отходов»².

Всего на территории РФ во времена существования СССР в рамках программы № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства» был проведен 81 МЯВ [14–17]. Места проведения взрывов располагаются на территории 19 субъектов РФ.

История вопроса

Среди выполненных МЯВ серия взрывов эксперимента «Днепр» (гора Куэльпор, горный массив Хибин, Кольский полуостров, Мурманская область) занимает особое место (рис. 1, 2). В отличие от всех других МЯВ, когда заряд помещался под землю через пробуренную скважину, в серии «Днепр» загрузка взрывного устройства осуществлялась через зарядную штольню, пробитую внутрь горы [15]. Целью взрывного воздействия являлось дробление рудного тела (апатитовые минералы) с последующим извлечением раздробленной породы на земную поверхность. Специально для такого воздействия были созданы заряды сравнительно малой мощности (1–3 килотонны тротилового эквивалента). Основой зарядного устройства являлся «чистый» термоядерный узел, в котором использовалось газообразное термоядерное горючее [18]. Кроме того, технология проведения взрыва предусматривала малую



Fig. 1. Location the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site (UNE “Dnepr”) in the Murmansk Oblast, Russia
[Рис. 1. Расположение места проведения мирных ядерных взрывов серии «Днепр» (UNE “Dnepr”) в Мурманской области России]

² Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» (НП-103-17). Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10 октября 2017 г. № 418. Введены в действие с 14 ноября 2017 г.



Fig. 2. A view at Mount Kuel'por from the west. «UA» indicates the entrance into the upper (charging) adit. «D» indicates the dump of rock extracted during the construction of the upper adit

[Рис. 2.] Вид на гору Куэльпор с запада. «UA» обозначает вход в верхнюю (загрузочную) штольню. «D» обозначает отвал породы, извлеченной при строительстве верхней штольни]

was a “clean” thermonuclear device that contained a gaseous thermonuclear fuel [18]. In addition, the explosion technology provided for a low residual contamination with long-lived radionuclides of the extracted rock. Most of the unreacted fissile material and fission fragments escaped at the moment of explosion into the special burial chamber created in advance inside the mountain outside the expected fracture zone [15, 18].

The experiments on the impact on the ore body inside Mt. Kuel'por were carried out in 1972 (one explosion with a power of 2.1 kt) and in 1984 (two simultaneous explosions with a power of 1.8 kt each) [14]. According to Vasiliev [18], more than 85% and 94% of technogenic radionuclides went into the burial chamber during the first and second explosions, respectively. Later on, a haulage adit was drilled to the base of the ore body. About 400 thousand tons of apatite ore were extracted through the adit [14]. In 1990, the “Dnepr” experiment was completed, and the entrances to the upper (charging) and lower (haulage) adits were sealed off with concrete walls.

In general, the experiment “Dnepr” on the use of nuclear explosions for crushing ore was recognized as successful; in terms of radioactive contamination, the ore could be used without any restrictions [15, 18]. However, there were also other opinions [19]. The main problem that resulted from the explosions was the disruption of the surface of Mt. Kuel'por and the formation of deep fractures and cracks. As a result, rain and melt waters began to actively penetrate into the mountain. These waters also reached the place where up to 90% of technogenic radionuclides were concentrated [20]. The water that passed through the zone of radioactive contamination naturally flowed through the lower adit to the ground surface. In 1989–1992, the activity concentration (AC) of tritium in the mine water reached the level of 1.5×10^6 Bq/l that was higher by a factor of 10 compared to the intervention level (IL) of 1.5×10^5 Bq/l adopted for drinking water for a limited part of the public (category B) in the USSR during that period [21]. At the same time, the AC of ^{90}Sr (0.017 Bq/l) and $^{239,240}\text{Pu}$ (<0.02 Bq/l) in the mine water were much lower than the corresponding values of the IL [20].

A drainage and dilution system was constructed for controlled runoff of tritium-contaminated water from the lower adit down the slope of Mt. Kuel'por into the Kuniyok riverbed (see Fig. 3 and 4). The system included a water conduit made of concrete (conditionally upper and lower

остаточную загрязненность долгоживущими радионуклидами извлекаемой породы. Основная часть непрореагировавшего делящегося материала и осколков деления отходила в момент взрыва в специальную камеру захоронения, заранее созданную внутри горы за пределами формирования ожидаемой зоны трещиноватости [15, 18].

Эксперименты по воздействию на рудное тело внутри горы Куэльпор были проведены в 1972 г. (один взрыв мощностью 2,1 кт) и в 1984 г. (два одновременных взрыва мощностью по 1,8 кт) [14]. По оценкам участников эксперимента [18], в камеру захоронения ушло более 85% и 94% техногенных радионуклидов во время первого и второго этапа соответственно. Для извлечения породы к основанию рудного тела была пробита откаточная штольня, через которую на земную поверхность было извлечено около 400 000 тонн апатитовой руды [14]. В 1990 г. эксперимент «Днепр» был завершен и входы в верхнюю (зарядную) и нижнюю (откаточную) штольни были перекрыты бетонными стенками.

В целом, эксперимент «Днепр» по применению термоядерных взрывов для дробления руды был признан удачным; по показателям радиоактивного загрязнения руда могла быть использована без каких-либо ограничений [15, 18]. Однако имелись и другие мнения [19]. Основной проблемой, порожденной проведенными взрывами, было нарушение поверхности горы Куэльпор и образование глубоких разломов и трещин. В результате внутрь горы начали активно проникать дождевые и талые воды. Такие воды достигали и того места, где было сосредоточено до 90% техногенных радионуклидов, образовавшихся при взрывах [20]. Вода, прошедшая через зону радиоактивного загрязнения, естественным образом стекала в нижнюю штольню, а через нее и наружу в месте выхода штольни на поверхность. В 1989–1992 гг. объемная активность (ОА) трития в рудничной воде достигала величины $1,5 \times 10^6$ Бк/л, что в 10 раз превышало допустимый уровень содержания трития в питьевой воде ($1,5 \times 10^5$ Бк/л), установленный для ограниченной части населения (категория Б) в СССР в тот период [21]. В то же время значения ОА ^{90}Sr (0,017 Бк/л) и $^{239,240}\text{Pu}$ (<0,02 Бк/л) в рудничной воде были намного ниже уровней вмешательства [20].

Для контролируемого отвода загрязненной тритием воды из штольни вниз по склону горы Куэльпор в русло реки Кунийок была сооружена дренажно-разбавительная система (рис. 3, 4), включающая в себя водовод, сделанный из бетона (условно верхний и нижний колодцы), и ке-

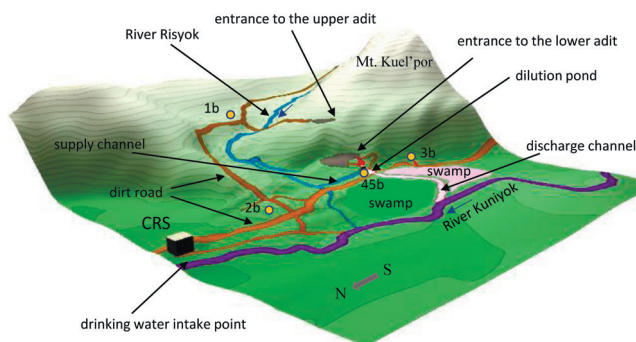


Fig. 3. A 3D schematic representation of the western slope of Mount Kuel'por and the Kuniyok River valley at the UNEs "Dnepr" site. Water boreholes are marked with circles. «CRS» indicates the Base of the control and rescue service of EMERCOM; 1b, 2b, 3b and 45b indicate water boreholes. The drawing is not scaled

[Рис. 3. Трехмерное схематическое изображение западного склона горы Куэльпор (Mt. Kuel'por) и долины реки Кунийок (River Kuniyok) в месте проведения МЯВ серии «Днепр». Водные скважины (1b, 2b, 3b и 45b) отмечены кружками: CRS – база контрольно-спасательной службы МЧС; swamp – болото; entrance to the upper adit – вход в верхнюю штольню; entrance to the lower adit – вход в нижнюю штольню; supply channel – подводящий канал; dilution pond – пруд разбавления; discharge channel – отводящий канал; dirt road – грунтовая дорога. Рисунок не масштабирован]

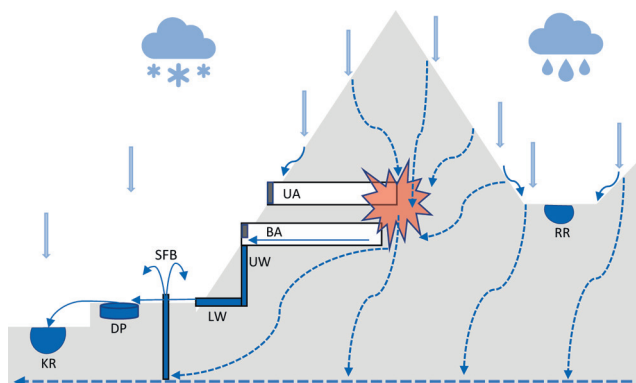


Fig. 4. A schematic representation of a vertical section of Mount Kuel'por at the site of the "Dnepr" UNEs (for the period 2008–2019). The zone of nuclear explosions and the accumulations of radioactive products are shown in red. Visible and known directions of water movement are indicated by solid blue arrows. Prospective directions of water movement are indicated by dotted blue arrows. UA – upper adit; BA – lower adit; UW – upper well; LW – lower well; SFB – self-flowing borehole No. 45; DP – dilution pond; KR – Kuniyok River; RR – Risyok River. The drawing is not scaled

[Рис. 4. Схематическое изображение вертикального среза горы Куэльпор в месте проведения МЯВ серии «Днепр» (на период 2008–2019 гг.). Зона ядерных взрывов и скопления радиоактивных продуктов взрывов показана красным цветом. Видимые и установленные направления движения воды обозначены сплошными синими стрелками. Предполагаемые направления движения воды обозначены пунктирными синими стрелками: UA – верхняя штольня; BA – нижняя штольня; UW – верхний колодец; LW – нижний колодец; SFB – самоизливающаяся скважина № 45; DP – пруд разбавления; KR – река Кунийок; RR – река Рисйок. Рисунок не масштабирован]

wells) and a large-diameter ceramic pipe. Before entering the Kuniyok River, the mine water was mixed with "pure" water in an artificial reservoir (storage/diluent pond). The "pure" water entered the pond through a supply channel dug between the Risyok River and the pond. The outflow of diluted mine water into the Kuniyok River occurred by gravity through another (discharge) channel. This system for drainage and dilution of the mine water was working very effectively. According to the survey of Kasatkin et al. [20], in 1999 AC of tritium in the mine water at the outlet of the lower adit reached 110,000 Bq/l. This value significantly exceeded the IL of 7700 Bq/kg adopted for drinking water at that time in the RF [21]. In the dilution pond, the AC of tritium (4000 Bq/l) was already lower compared to the IL. An additional natural dilution of the mine water occurred in the Kuniyok River down to a value of 340 Bq/l. By 2002, AC of tritium in the water flowing out of the adit through a water

рамическую трубу большого диаметра. Перед попаданием в реку Кунийок рудничная вода смешивалась с чистой водой в искусственном водоеме (пруд накопитель/разбавитель). Чистая вода поступала в пруд через подводящий канал, прорытый между рекой Рисйок и прудом. Отток разбавленной рудничной воды в реку Кунийок проходил самотеком через другой (отводящий) канал. Созданная система отвода и разбавления рудничной воды действовала весьма эффективно. По данным обследования В.В. Касаткина и др. [20], в 1999 г. ОА трития в рудничной воде на выходе из нижней штольни достигала величины 110 000 Бк/л, что существенно превышало уровень вмешательства (УВ) 7700 Бк/кг, принятый для питьевой воды на тот период времени в РФ [21]. В пруде-разбавителе ОА (4000 Бк/л) была уже ниже УВ. В реке Кунийок происходило дополнительное естественное разбавление руд-

conduit had significantly decreased, down to 32,000 Bq/l [22]. This value, however, was four times higher than the IL adopted for drinking water in the RF (7700 Bq/l [21]). The AC of tritium in the river water (120 Bq/l) was already significantly lower than the IL [22]. AC of ^{137}Cs and ^{90}Sr in all water samples (including mine waters) did not exceed 0.04 Bq/l, which was two orders of magnitude lower than the IL for ^{137}Cs (11 Bq/kg) and ^{90}Sr (5 Bq/kg) in drinking water, according to NRB-99/2009. That is, only tritium was the radioactive contaminant of concern for water quality at the "Dnepr" UNEs site.

Surveys carried out in 2008–2013 [16, 20, 23] revealed a tendency towards a gradual decrease in the AC of tritium in water samples from the "Dnepr" site. No increase in the contamination of surface and ground waters with ^{137}Cs and ^{90}Sr was found as well. At the same time, it was noted that a part of the drainage system was destroyed. This led to the continuous and uncontrolled spreading of mine waters over the ground surface at the base of Mt. Kuel'por [20].

Surveys carried out in previous years to estimate the levels of radioactive contamination of water with technogenic radionuclides were of practical importance, because the Kuniyok River valley and Mt. Kuel'por are popular tourist places. The river itself and its tributaries are sources of drinking water. It has been shown that information on the actual levels of contamination of water with tritium at the site of the UNEs was demanded by the public of the Murmansk Oblast and by tourists [23]. Therefore, regular monitoring surveys of water sources at the "Dnepr" UNEs site remain relevant at the present time.

The purpose of this study was to assess the drinkability of water from the sources of the Kuniyok River valley at the "Dnepr" UNEs site in terms of activity concentration of tritium. The research objectives were the following:

- to collect samples of water from wells, boreholes, rivers, streams, lakes and other accessible environmental waterbodies;
- to determine AC of tritium in the samples of water using a low-background scintillation beta-spectrometer;
- to compare the measurement data on the AC of tritium in the samples of water with the hygienic norms and with results of surveys performed by other researchers;
- to calculate the rate of decrease in AC of tritium in the waterbodies depending on time;
- to estimate the effective dose of internal exposure from ingestion of tritium with drinking water.

Materials and methods

The site of the UNEs "Dnepr" is located in a mountainous area at a distance of about 20 km north of the nearest large settlement Kirovsk, 130 km south of Murmansk, and 150 km east of the border with Finland (Fig. 1). The nearest NFC facility, the Kola nuclear power plant (Polyarnye Zori, Murmansk Oblast), is situated to the south-west from the UNEs site at a distance of approximately 60 km.

The main waterway in area under study is the Kuniyok (the other names: Kuna, Kuniok, Petremus) River (the watercourse length is 40 km; the catchment area is 341 km² [24]) (Figs. 3 and 5). The river flows from south to north at the western base of Mt. Kuel'por (max. elevation is 902 m) into Lake Gol'covoye. The tributary of the Kuniyok River is the Risyok River, which skirts Mt. Kuel'por from the north. Another tributary, the Partomyok River, flows into the Kuniyok River

ничной воды: до значения 340 Бк/л. К 2002 г. ОА трития в воде, вытекающей из штольни по водоводу, существенно снизилась – до 32 000 Бк/л [22]. Это значение, однако, в 4 раза превышало УВ, установленный для питьевой воды в РФ (7700 Бк/л [21]). В реке Кунийок уровень содержания трития (120 Бк/л) был уже существенно ниже УВ [22]. Значения объемной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr во всех водных пробах (включая рудничные воды) не превышали 0,04 Бк/л, что было на 2 порядка ниже УВ для ^{137}Cs (11 Бк/кг) и ^{90}Sr (5 Бк/кг) в питьевой воде, согласно НРБ-99/2009. То есть только тритий был тем радиоактивным загрязнителем, который вызывал беспокойство в отношении качества воды на объекте «Днепр» [22].

Обследования, выполненные в 2008–2013 гг. [16, 20, 23], выявили тенденцию к дальнейшему снижению содержания трития в водных пробах с объекта «Днепр» и отсутствие нарастания загрязнения подземных и поверхностных вод радионуклидами цезия и стронция. Одновременно было отмечено, что часть дренажной системы подверглась разрушению. Это привело к постоянному и бесконтрольному растеканию рудничных вод по поверхности земли у основания горы Куэльпор [20].

Выполненные в предыдущие годы работы по оценке уровней радиоактивного загрязнения воды имели прямое прикладное значение, т.к. долина реки Кунийок и гора Куэльпор являются местами, которые активно посещаются туристами. Сама река и ее притоки являются источниками воды для питья. Как показали опросы, информация о реальных уровнях загрязнения тритием природных вод в месте проведения МЯВ востребована населением Мурманской области и туристами [23]. Поэтому регулярные мониторинговые обследования водных источников в месте проведения МЯВ «Днепр» остаются актуальным и в настоящее время.

Цель исследования – оценка пригодности для питья воды из источников долины реки Кунийок в месте проведения МЯВ серии «Днепр» по показателю удельной активности (УА) трития.

Задачи исследования

1. В 2019 г. отобрать пробы воды из колодцев, скважин, рек, ручьев, озер и других доступных водоносных объектов окружающей среды.
2. С помощью низкофонового сцинтилляционного бета-спектрометра определить содержание трития в пробах.
3. Сравнить полученные экспериментальные данные по содержанию трития в отобранных водных пробах с гигиеническим нормативом и с результатами исследований, выполненных другими авторами.
4. Вычислить скорость снижения УА трития в водных объектах в зависимости от времени.
5. Оценить эффективную дозу внутреннего облучения от трития при использовании воды для питья.

Материалы и методы

Место проведения МЯВ «Днепр» располагается в горной местности на расстоянии примерно 20 км к северу от ближайшего крупного населенного пункта (г. Кировск), в 130 км к югу от г. Мурманска и 150 км к востоку от границы с Финляндией (рис. 1). Ближайшее предприятие ЯТЦ –

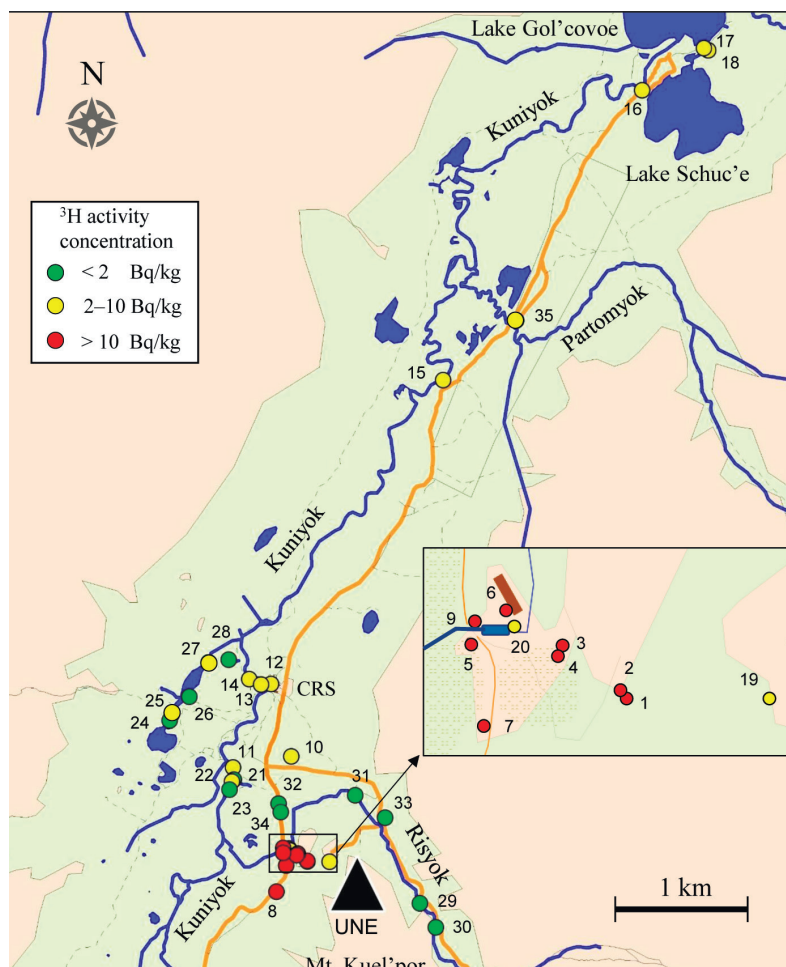


Fig. 5. Location of sampling points (circles) for determination of tritium activity concentration in water at the region of the “Dnepr” UNEs. UNE – the approximate place of the explosions is marked by the black triangle; CRS – Base of the control and rescue service of EMERCOM [Рис. 5. Расположение точек отбора проб (кружки) для определения удельной активности трития в воде в регионе проведения МЯВ серии «Днепр»: Mt. Kuel'por – гора Куэльпор; UNE – приблизительное место взрывов обозначено черным треугольником; CRS – база контрольно-спасательной службы МЧС; Kuniyok – река Кунийок; Risyok – река Рисйок; Partomyok – река Партомйок; Lake Gol'covoe – озеро Гольцовое; Lake Schuc'e – озеро Щучье; ^3H activity concentration – удельная активность ^3H ; Bq/kg – Бк/кг]

three kilometers north of the explosion site. In addition, there are many small streams and lakes in the valley of the Kuniyok River; the territory is swampy in places and mostly difficult to pass. Several dirt roads were built for the movement of people and vehicles. There is a tourist base approximately 1.5 km to the north of the explosions site. A hotel and the base of the control and rescue service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM of Russia) are located on its territory.

The Khibiny Massif is located beyond the Arctic Circle; the climatic conditions are harsh, subarctic. We did not come across exact quantitative data on the main weather conditions (temperature, amount of precipitation) concerning the very site of the “Dnepr” UNEs. Therefore, we present the ranges typical for the Khibiny Massif as a whole [25]. The annual mean long-term temperatures are negative and range from $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the valleys to $-(5-6)\text{ }^{\circ}\text{C}$ on the mountain plateaus. There are noticeable spatial variations in the annual total precipitation depending on the altitude: from 600–700 mm in the foothills and valleys up to 1600 mm on the mountain plateaus.

Кольская атомная электростанция (Полярные Зори, Мурманская область) – расположено на расстоянии около 60 км к юго-западу от площадки МЯВ.

Основной водной артерией является река Кунийок (другие названия Куна, Куниок, Петремус; длина водотока 40 км, водосборная площадь 341 км² [24]) (рис. 3 и 5), протекающая с юга на север у западного основания горы Куэльпор (максимальная высота горы 902 м). Река впадает в озеро Гольцовое. Притоком реки Кунийок является река Рисйок, которая огибает гору Куэльпор с севера. В 3 км к северу от места взрыва в реку Кунийок впадает река Партомйок. Кроме того, в долине реки Кунийок имеется много мелких ручьев и озер; территория местами заболочена и, в основном, труднопроходима. Для передвижения людей и транспортных средств было построено несколько грунтовых дорог. Примерно в 1,5 км к северу от места взрывов находится туристическая база, на территории которой располагается гостиница и база контрольно-спасательной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России).

Precipitation is in the form of rain and snow. The rivers of the Khibiny have predominantly snow (melt) feeding.

The field survey of the Mt. Kuel'por and the Kuniyok River valley at the site of the "Dnepr" UNEs was performed in July 2019. A visual inspection revealed an intensive inflow of the mine water from the lower adit into the upper well and further through the drainage system into the diluent pond. At the same time, it was noted that due to mechanical damage of the pipe connecting the lower well and the dilution pond, a part of the mine water flowed out onto the road forming puddles (Fig. 6). Water from the puddles flowed into a swamp extending from the road to the Kuniyok River along the discharge channel (Fig. 3). A self-flowing borehole was found at the site next to the dilution pond. This borehole, designated No. 45 (Fig. 7),

Горный массив Хибины находится за Северным полярным кругом; климатические условия здесь суровые, субарктические. Точных количественных данных об основных погодных показателях (температура, количество осадков), касающихся самого места проведения МЯВ «Днепр», в доступных источниках нам не встретилось. Поэтому приводим диапазоны, характерные для массива Хибины в целом [25]. Значения среднегодовой многолетней температуры являются отрицательными и колеблются от -1°C в долинах до $-(5-6)^{\circ}\text{C}$ на горных плато. В Хибинах выпадает сравнительно много осадков. Отмечаются заметные пространственные вариации суммы годовых осадков в зависимости от высоты: от 600–700 мм в предгорьях и долинах до 1600 мм на горных плато.



Fig. 6. A puddle on the main dirt road where a portion of the mine water flows
[Рис. 6. Лужа на главной грунтовой дороге, куда стекает часть шахтной воды]



Fig. 7. Self-flowing borehole No. 45
[Рис. 7. Самоизливающаяся скважина № 45]

has been used by hydrogeologists for long-term monitoring of groundwater quality [26]. The water from the borehole spilled over the adjacent ground uncontrollably; a portion of the water flowed into the dilution pond. There were three more boreholes near the explosions site, conventionally numbered 1b, 2b, and 3b (Fig. 3). Water from the borehole 3b, located at the foot of Mt. Kuel'por, 400 m south of the borehole No. 45, flowed by gravity into the swamp on the opposite side of the main dirt road. In the available literature, we have not found data on the time of creation of these four boreholes and their depth.

Water samples were taken at 35 points (Table 1; Fig. 5) located both on the western slope of Mt. Kuel'por at the outlets of the upper and lower adits, and in the valleys of the Kuniyok and Risyok rivers. The location of the outflow of the mine water from the lower adit was used as a reference point (No. 1 in Table 1 and in Fig. 5). The sampling points were chosen so as to get a fairly complete picture of AC of tritium in: 1) groundwater flowing from the mine; 2) groundwater from boreholes; 3) water having mainly a direct surface origin (due to atmospheric precipitation). The last category included samples of river water (the Risyok, Kuniyok, and Partomyok rivers), water from streams, lakes and swamps, as well as a sample from the water streaks formed by condensation from atmospheric moisture on the surface of the Mt. Kuel'por slope. The samples in the valley of the Kuniyok River were taken downstream (south to north) of the confluence of the discharge channel to the river. The survey covered many of the places that were or could be used by people for taking water for drinking. In particular, the river water at the place of its intake for the needs of the local hotel was sampled (point 12 in Fig. 5). To evaluate the temporal dynamics of AC of tritium in waterbodies, the selection list included nine places (No. 2, 3, 6, 8, 12, 19, 20, 29, 33 in Table 1 and Fig. 5) that had been surveyed by expeditions of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev [23] to study AC of tritium in water in 2008 and 2013. During the 2008, 2013, and 2019 surveys, water samples were taken at the same time of the year, namely in the second half of July.

The water samples were taken into 200 ml plastic vessels and acidified with concentrated nitric acid to pH of 3–4. The pH level was checked using a universal indicator paper PND 50-975-84. The vessels were hermetically sealed and delivered to the laboratory.

Water samples were freed from chemical impurities by distillation. 10 ml of the distillate were further mixed with the same amount of the commercially available OptiPhase HiSafe 3 scintillant ("PerkinElmer, Inc.", the USA) in 20 ml plastic vials to form a measurement sample. The vials were tightly covered with lids and shaken. Before counting, the vials were stored in the cooled measuring chamber of the low-background alpha-beta-radiation spectrometer Quantulus 1220 ("PerkinElmer Life Sciences/Wallac Oy", Finland) for at least 12 hours. The background sample was prepared from artesian bottled water according to the same method.

Determination of the conversion coefficient from the counting rate to the AC of tritium in the sample was carried out using calibration samples prepared from a reference (standard) solution. The AC of tritium in the solution was of 100,000 Bq/l at the date of manufacture. The declared uncertainty of the AC value was no more than 5% (95% probability).

The duration of measurements of the samples in the Quantulus 1220 system was at least 360 min. The number of

Осадки выпадают в форме дождя и снега. Реки Хибин имеют преимущественно снеговое (талое) питание.

Наземное обследование горы Куэльпор и долины реки Кунийок в месте проведения МЯВ «Днепр» было проведено в июле 2019 г. Визуальный осмотр обнаружил интенсивное поступление рудничной воды из нижней штольни в верхний колодец и далее по дренажной системе в пруд-разбавитель. При этом отмечено, что в результате механического повреждения трубы, идущей от нижнего колодца к пруду-разбавителю, часть рудничной воды вытекает на дорогу, образуя лужи (рис. 6). Из луж вода стекает в болото, простирающееся от дороги до реки Кунийок вдоль отводного канала (рис. 3). На площадке рядом с прудом-разбавителем имеется самоизливающаяся скважина. Эта скважина, обозначаемая № 45 (рис. 7), используется гидрогеологами для долговременного мониторинга качества подземных вод [26]. Вода из скважины растекается по прилегающей территории бесконтрольно; часть воды попадает в пруд-разбавитель. Вблизи от места проведения взрыва находятся еще 3 скважины, имеющие условные номера 1b, 2b и 3b (рис. 3). Вода из скважины 3b, расположенной у подножья горы Куэльпор в 400 м югу от самоизливающейся скважины № 45, самотеком поступает в болото. В доступной литературе нам не встретились данные о времени создания этих 4 скважин и их глубине.

Отбор проб воды был проведен в 35 точках (табл. 1; рис. 5), расположенных как на западном склоне горы Куэльпор у выходов из верхней и нижней штольни, так и в долинах рек Кунийок и Рисйок. Место истечения рудничных вод из нижней штольни взято в качестве опорной точки (№ 1 в табл. 1 и на рис. 5). Точки пробоотбора были выбраны таким образом, чтобы получить достаточно полное представление о содержании трития в: 1) подземной воде, вытекающей из рудника; 2) подземной воде из скважин; 3) воде, имеющей преимущественно поверхностное происхождение (за счет атмосферных осадков). В последнюю категорию вошли пробы речной воды (реки Рисйок, Кунийок и Партомйок), воды из ручьев, озер и болот, а также водных потоков, формирующихся путем конденсации из атмосферной влаги на поверхности склона горы Куэльпор. Отбор проб в долине реки Кунийок был проведен вниз по течению реки (с юга на север) от места впадения отводящего канала. Обследованием были охвачены многие из тех мест, которые использовались или могли использоваться человеком для забора питьевой воды. В частности, была исследована речная вода в месте ее забора для нужд местной гостиницы (точка 12 на рис. 5). Для оценки временной динамики УА трития в водных объектах в перечень отбора были включены 9 точек (№ 2, 3, 6, 8, 12, 19, 20, 29, 33), опробованных экспедициями Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева [23] для исследования содержания трития в воде в 2008 и 2013 гг. (рис. 5 и табл. 1). Отбор проб при обследованиях 2008, 2013 и 2019 гг. проводили в один и тот же период времени – в июле.

Водные пробы отбирали в чистые пластиковые емкости объемом 0,2 л и подкисляли концентрированной азотной кислотой до уровня pH 3–4. Значение pH проверяли с помощью универсальной индикаторной бумаги ПНД 50-975-84. Емкости с пробами герметично закрывали и доставляли в лабораторию.

Activity concentration of tritium (AC) in water samples collected at the “Dnepr” UNEs site in 2019
[Таблица 1
Удельная активность трития (УА) в пробах воды, отобранных в 2019 г. в месте проведения МЯВ «Днепр»]

No. * [№ *]	Location [Локация]	Distance from point No. 1 (m) [Расстояние от точки № 1 (м)]	Altitude above sea level (m) [Высота над уровнем моря (м)]	Latitude (° N) [Широта (° с.ш.)]	Longitude (° E) [Долгота (° в.д.)]	Form of water ap- pearance [Форма водопроявления]	Main source of water [Основной источник воды]	AC (Bq/kg) [УА (Бк/кг)]
1	Entrance to the lower adit [Вход в нижнюю штольню]	0	333	67.79111	33.60778	running [Текущая]	adit [Штольня]	1260 ± 190
2	Upper well [Верхний колодец]	23	322	67.79115	33.60722	running [Текущая]	adit [Штольня]	1210 ± 180
3	Lower well [Нижний колодец]	88	302	67.79160	33.60615	running [Текущая]	adit [Штольня]	1270 ± 190
4	Puddle near lower well [Лужа около нижнего колодца]	88	301	67.79150	33.60596	still [Стоячая]	adit [Штольня]	934 ± 140
5	Puddle on road [Лужа на дороге]	183	293	67.79166	33.60369	still [Стоячая]	adit [Штольня]	1190 ± 180
6	Borehole No. 45 [Скважина № 45]	162	295	67.79193	33.60463	running [Текущая]	borehole [Скважина]	490 ± 74
7	Underground cis- tern [Подземная цистерна]	156	298	67.79085	33.60417	still [Стоячая]	adit [Штольня]	303 ± 49
8	Borehole-3b [Скважина 3b]	305	303	67.78920	33.60258	running [Текущая]	borehole [Скважина]	1510 ± 230
9	Discharge chan- nel [Отводящий канал]	197	292	67.79196	33.60370	running [Текущая]	surface [Поверхность]	16.9 ± 4.6
10	Borehole-2b [Скважина 2b]	750	298	67.79770	33.67440	running [Текущая]	borehole [Скважина]	5.0 ± 1.0
11	Kuniyok River [Река Кунийок]	750	277	67.79707	33.59528	running [Текущая]	surface [Поверхность]	5.5 ± 1.0
12	Kuniyok River [Река Кунийок]	1280	266	67.80237	33.60164	running [Текущая]	surface [Поверхность]	5.5 ± 0.9
13	Left bank of the Kuniyok River [Левый берег реки Кунийок]	1290	265	67.80234	33.59997	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	6.2 ± 1.1
14	Left bank of the Kuniyok River [Левый берег реки Кунийок]	1350	264	67.80234	33.59997	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	6.3 ± 1.1
15	Kuniyok River [Река Кунийок]	3540	232	67.82164	33.63057	running [Текущая]	surface [Поверхность]	6.9 ± 1.1
16	Kuniyok River [Река Кунийок]	5950	210	67.84002	33.66400	running [Текущая]	surface [Поверхность]	4.7 ± 0.8
17	Lake Gol'covo [Озеро Гольцовое]	6400	208	67.84256	33.67511	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	5.6 ± 1.0
18	Lake Gol'covo [Озеро Гольцовое]	6400	208	67.84270	33.67440	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	5.3 ± 1.7

End of Table 1
[Окончание таблицы 1]

No. * [№ *]	Location [Локация]	Distance from point No. 1 (m) [Расстояние от точки № 1 (м)]	Altitude above sea level (m) [Высота над уровнем моря (м)]	Latitude (° N) [Широта (° с.ш.)]	Longitude (° E) [Долгота (° в.д.)]	Form of water ap- pearance [Форма водопроявления]	Main source of water [Основной источник воды]	AC (Bq/kg) [УА (Бк/кг)]
19	Slope above the entrance to the upper adit [Склон над входом в верхнюю штольню]	156	380	67.79110	33.61147	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.2 ± 0.9
20	Supply channel [Подводящий канал]	146	296	67.79181	33.60484	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.5 ± 0.9
21	Spring near the edge of swamp [Ручей на краю болота]	780	278	67.79618	33.59507	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.8 ± 0.9
22	Risyok River [Река Рисйок]	780	278	67.79630	33.59538	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
23	Edge of swamp [Край болота]	752	278	67.79567	33.59466	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	<2
24	Unnamed spring [Безымянный ручей]	1420	280	67.80045	33.58495	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
25	Unnamed lake [Безымянное озеро]	1400	280	67.80006	33.58463	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	2.5 ± 0.8
26	Unnamed lake [Безымянное озеро]	1430	278	67.80156	33.58790	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	<2
27	Unnamed spring [Безымянный ручей]	1570	2576	67.80373	33.59117	running [Текущая]	surface [Поверхность]	2.1 ± 0.7
28	Unnamed spring [Безымянный ручей]	1530	263	67.80391	33.59454	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
29	Risyok River [Река Рисйок]	850	386	67.78846	33.62669	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
30	Risyok River [Река Рисйок]	1020	403	67.78693	33.62935	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
31	Risyok River [Река Рисйок]	585	334	67.79530	33.61578	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
32	Risyok River [Река Рисйок]	450	289	67.79477	33.60294	running [Текущая]	surface [Поверхность]	<2
33	Borehole-1b [Скважина 1b]	635	358	67.79388	33.62083	running [Текущая]	borehole [Скважина]	<2
34	Unnamed pond [Безымянный пруд]	400	288	67.79424	33.60330	still [Стоячая]	surface [Поверхность]	<2
35	Partomyok River [Река Партомйок]	4100	226	67.82543	33.64284	running [Текущая]	surface [Поверхность]	3.3 ± 0.8

* – number corresponds to the number of the sampling point shown in Fig. 5.

[* – номер соответствует номеру точки отбора проб, указанному на рис. 5.]

pulses counted in the channels from 40th to 200th was used for further calculations. The 200th channel corresponded to the energy equal to approximately 20 keV.

The AC of tritium in a measurement sample (C_{TNO} , Bq/l) was calculated using the equation:

$$C_{TNO} = (N_{smp} - N_b) \times K, \quad (1)$$

where N_{smp} is the counting rate for the measurement sample, pulse/min; N_b is the counting rate for the background sample, pulse/min; K is the conversion coefficient, (Bq/l)/(pulse/min).

The relative error in determining the counting rate CE (%) was calculated with the formula:

$$CE = 2 \times \sqrt{\frac{N_b + N_{smp}}{T_b + T_{smp}}} \times 100, \quad (2)$$

where T_{smp} and T_b is the duration of measurement of a measurement sample and a background sample, respectively, min; N_{smp} and N_b is the counting rate of a measurement sample and a background sample, respectively, pulse/min.

AC of tritium in a water sample was calculated as the arithmetic mean of AC of tritium in three measurement samples prepared from this water sample.

The overall uncertainty of the measurement (95% probability) was calculated considering the statistical uncertainty of the number of pulses counted in the channels from 40th to 200th, the non-excluded systematic uncertainty of the determination of the conversion coefficient (5%), the uncertainty of the AC of tritium in the reference solution (5%), and the uncertainty associated with the preparation of measurement sample (2%).

To calculate the minimum detectable activity concentration (MDA , Bq/l), we used the formula suitable for a low-background radiometric device [27]:

$$MDA = \frac{2.7 + 4.65 \times \sqrt{R_b \times T_b}}{60 \times \epsilon \times T_b \times V}, \quad (3)$$

where R_b is the counting rate of background sample, pulse/min; T_b is the background measurement time, min; ϵ is the efficiency, pulse/Bq; V is the volume of water in a measurement sample (0.01 l).

For the measurement time, T_b , of 360 min, the MDA was 2 Bq/l.

Considering that the IL for drinking water in the current NRB-99/2009 is expressed as activity concentration in Bq/kg units, results of our study are also presented in the same units. The density of water at 20 °C was taken equal to 1.00 g/cm³ (rounded from 0.9982 g/cm³ [28]).

The effective dose due to ingestion of tritium with drinking water was estimated for two groups of population: local hotel staff and tourists. For a conservative dose estimate it was assumed that the hotel staff stayed in the surveyed area continuously for 11 months (335 days) a year, since their accommodation was located in the hotel building. The staff consumed water from the Kuniyok River. The tourists stayed near the site of the UNEs for 14 days and consumed water from the self-flowing borehole No. 45. The daily water consumption for

Для подготовки счетных образцов пробы воды освобождали от химических примесей посредством дистилляции. Счетные образцы готовили в пластиковых виалах объемом 20 мл путем смешивания 10 мл коммерческого сцинтилляционного коктейля OptiPhase HiSafe 3 (фирма «PerkinElmer, Inc.», США) и такого же количества дистиллята. Виалы плотно закрывали крышками, встряхивали и помещали в охлажденную измерительную камеру низкофонового спектрометрического радиометра альфа-, бета-излучения Quantulus 1220 (фирма «PerkinElmer Life Sciences/Wallac Oy», Финляндия), где выдерживали перед измерением не менее 12 ч. Фоновый образец готовили из артезианской бутилированной воды после дистилляции по той же схеме.

Расчет градуировочного коэффициента связи УА трития в счетном образце со скоростью счета импульсов проводили по калибровочным образцам, приготовленным из образцового (эталонного) раствора объемом 100 мл с объемной активностью трития на дату изготовления 100 000 Бк/л с ошибкой не более 5% (95% вероятность).

Длительность измерений составляла не менее 360 мин. Подсчет числа импульсов фонового, калибровочного и счетных образцов проводили в каналах с 40 по 200; при этом 200-й канал соответствовал энергии излучения, равной приблизительно 20 кэВ.

Объемную активность счетного образца C_{TNO} (Бк/л) определяли по формуле:

$$C_{TNO} = (N_{smp} - N_b) \times K, \quad (1)$$

где N_{smp} – скорость счета счетного образца с фоном, имп./мин; N_b – скорость счета фонового образца, имп./мин; K – градуировочный коэффициент, (Бк/л)/(имп./мин).

Ошибку определения скорости счета импульсов счетного образца (CE , %) рассчитывали по формуле:

$$CE = 2 \times \sqrt{\frac{N_b + N_{smp}}{T_b + T_{smp}}} \times 100, \quad (2)$$

где T_{smp} и T_b – время измерений счетного и фонового образца соответственно, мин; N_{smp} и N_b – скорость счета счетного и фонового образца соответственно, имп./мин.

Объемную активность трития в пробе определяли как среднее арифметическое из результатов измерений 3 счетных образцов, приготовленных из данной пробы.

Общую неопределенность ($P = 0,95$) измерения объемной активности рассчитывали с учетом статистической неопределенности подсчета числа импульсов в окне, неисключаемой систематической неопределенности оценки градуировочного коэффициента (5%), неопределенности заявленного значения активности трития в эталонном растворе (5%) и неопределенности, связанной с приготовлением счетного образца (2%).

Для вычисления минимально детектируемой удельной активности (MDA , Бк/л) использовали формулу, пригодную для низкофонового радиометрического устройства [27]:

$$MDA = \frac{2.7 + 4.65 \times \sqrt{R_b \times T_b}}{60 \times \epsilon \times T_b \times V}, \quad (3)$$

где R_b – скорость счета фонового образца, имп./мин; T_b – продолжительность измерения фонового образца,

both groups was equal to 2 kg (2 l). This value is used in NRB-99/2009 to estimate internal doses to adults. To calculate the annual effective dose for the i -th group (E_i , $\mu\text{Sv/year}$), the following expression was used:

$$E_i = n_i \times m \times AC_i \times DC \times 10^{-6}, \quad (4)$$

where n_i is the duration of water consumption for the i -th group, day; m is the daily water consumption, kg/day; AC_i is the AC of tritium in water consumed by the i -th group (Bq/kg); DC is the dose coefficient (equal to 4.8×10^{-11} Sv/Bq for tritium, according NRB-99/2009); 10^{-6} is the conversion factor from Sv to μSv .

Microsoft Excel was used for statistical calculations and data plots. Linear regression was applied for analysis of temporal trends. The non-parametric Mann-Whitney U test was used to compare two independent samples.

Results and discussion

The AC of tritium in water samples varied in a very wide range: from less than 2 Bq/kg up to 1510 Bq/kg (see Table 1).

At the sampling sites located in the Risyok riverbed, along streams and lakes on the left bank of the Kuniyok River, AC of tritium did not exceed 2.5 Bq/kg; in most of these samples the AC was below the MDA (2 Bq/kg). All these waterbodies are constantly replenished and renewed by atmospheric precipitation and obviously have no direct connection with the water flow from the lower adit in Mt. Kuel'por. Hence, 2 Bq/kg can be considered as a value close to an average background AC of tritium in surface waters in the studied area. This value is generally in reasonable agreement with the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia (Roshydromet) data obtained in 2019 in the RF [6]. The annual average values of AC of tritium in atmospheric precipitation for the entire territory of the RF and in water of the main rivers of the RF outside the radioactively contaminated zones were 1.78 Bq/l (1.15–2.42 Bq/l) and 1.62 Bq/l (0.9–2.2 Bq/l), respectively. The annual average AC of tritium in atmospheric precipitation in Murmansk in 2019 was 1.3 Bq/l, which was lower compared to the average value for the RF as a whole. AC of tritium in water of two main rivers located in the northern part of the European territory of the RF, the Severnaya (Northern) Dvina River (sampled in Arkhangelsk city) and the Pechora River (sampled in Naryan-Mar city) was 1.2 Bq/l and 1.4 Bq/l, respectively. These values were also lower than the average value for the main rivers of the RF.

The AC of tritium (1260 Bq/kg) in groundwater coming from the mine through the outlet from the lower adit was about three orders of magnitude higher compared to the AC of tritium in atmospheric precipitation in Murmansk. No changes in AC of tritium were observed as the mine water flowed through the wells. At the exit place from the diluent pond (point 9 in Fig. 5), AC of tritium in the mine water sharply decreased (to 17 Bq/kg) due to dilution with "pure" water (AC of tritium was equal to 2.5 Bq/kg) entering through the supply channel (point 20 in Fig. 5). AC of tritium further decreased to 5.5 Bq/kg in the water of the Kuniyok River below the outlet of the discharge channel (point 11 in Fig. 5). No further decrease of AC of tritium in the water downstream of the Kuniyok River (points 12–16) was observed. The AC of tritium (5.3 and 5.6 Bq/kg) in water sampled on the southern shore of the Lake Gol'covoe (points 17 and 18) was similar to that in the Kuniyok River water.

мин; ε – эффективность, имп./Бк; V – объем воды в счетном образце (0,01 л).

При продолжительности измерений 360 минут MDA была равна 2 Бк/л.

Учитывая то обстоятельство, что в действующих НРБ-99/2009 уровень вмешательства для питьевой воды имеет размерность Бк/кг (удельная активность, УА), полученные результаты также приводятся в этой же размерности. Плотность воды при 20 °C была принята равной 1,00 г/см³ (округлено от 0,9982 г/см³ [28]).

Эффективная доза облучения от поступления трития с питьевой водой была оценена для 2 групп населения: работники местной гостиницы и туристы. Для консервативной оценки предполагали, что работники гостиницы постоянно находились на обследованной территории в течение 11 месяцев (335 дней) в году, т.к. служебное жилье размещалось в здании гостиницы. Они постоянно потребляли воду из реки Кунийок. Туристы находились вблизи места проведения МЯВ в течение 14 дней и потребляли воду из самоизливающейся скважины № 45. Суточное потребление питьевой воды для обеих групп принято равным 2 кг (2 л). Это значение используется в НРБ-99/2009 для расчета доз внутреннего облучения взрослого человека. Для вычисления годовой эффективной дозы для i -й группы (E_i , мкЗв/год) использовали следующее выражение:

$$E_i = n_i \times m \times AC_i \times DC \times 10^{-6}, \quad (4)$$

где n_i – продолжительность потребления воды для i -й группы (день); m – масса ежедневно потребляемой воды; AC_i – удельная активность трития в воде, потребляемой i -той группой (Бк/кг); DC – дозовый коэффициент (для трития он равен $4,8 \times 10^{-11}$ Зв/Бк по НРБ-99/2009); 10^{-6} – коэффициент пересчета Зв в мкЗв.

Для статистических расчетов и построения графиков использовали Microsoft Excel. Для анализа временных трендов УА трития в воде применяли метод линейной регрессии. Сравнение двух независимых выборок проводили с помощью непараметрического U-критерия Манна – Уитни.

Результаты и обсуждение

Значения УА трития в отобранных пробах воды находились в весьма широком диапазоне: от <2 Бк/кг до 1510 Бк/кг (табл. 1). В точках, которые были расположены в русле реки Рисйок, на ручьях и озерах левого берега реки Кунийок, УА не превышала величины 2,5 Бк/кг; для большинства из этих проб содержание трития было ниже уровня MDA (2 Бк/кг). Все эти водные тела постоянно пополняются и обновляются за счет атмосферных осадков и, очевидно, не имеют прямой связи с водотоком из нижней штольни горы Куэльпор. Поэтому величину 2 Бк/кг можно рассматривать в качестве значения, близкого к среднему фоновому содержанию трития в воде поверхностных водоемов зоны нашего обследования. Эта величина, в целом, разумно согласуется с данными Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), полученными в 2019 г. в РФ [6]. Среднегодовые значения содержания трития в атмосферных осадках для всей территории России и в воде основных рек России вне загрязненных зон составили

AC of tritium in the portion of the mine water that flowed over the territory as a result of partial destruction of the drainage system (specifically, a puddle on the road, point 4 in Fig. 5) was 1190 Bq/kg and similar to that at the exit point from the lower adit (1260 Bq/kg). It indicated that there was no source (in particular, rain) to dilute this portion of the mine water near the foot of Mt. Kuel'por during the sampling period.

The boreholes near the UNEs site differed very significantly from each other in terms of AC of tritium in groundwater. AC of tritium in water from the borehole 1b (point 33 in Fig. 5) located to the north of the outlet from the lower adit outside the foot of Mt. Kuel'por was below the MDA (2 Bq/kg). Obviously, the aquifer that fed this borehole did not have a direct connection with the mine of Mt. Kuel'por. The highest AC (1510 Bq/kg) was measured in water from the borehole 3b (point 8 in Fig. 5) located directly at the base of Mt. Kuel'por. It was not lower compared to that in water flowing out through the lower adit (1260 Bq/kg). This could indicate that the borehole 3b was fed from an aquifer saturated with contaminated mine water. The AC of tritium in water from the self-flowing borehole No. 45 (490 Bq/kg) was three times lower than that from the borehole 3b. It seems that the borehole No. 45 was fed from the aquifer where a mixing of contaminated mine's water and pure groundwater of other genesis was occurring. The AC of tritium in water from the borehole 2b (5.0 Bq/kg) slightly exceeded the background values of ~2 Bq/kg. Apparently, the aquifer that fed this borehole also had some kind of connection with the mine of Mt. Kuel'por.

The AC of tritium in water flowing down the surface of the stones above the exit of the upper adit was 2.2 Bq/kg and barely exceeded the MDA.

In all water samples taken at the site of the "Dnepr" UNEs in 2019, the AC of tritium was significantly lower than the IL for drinking water (7600 Bq/kg, according to NRB-99/2009). In addition, the AC values for reference locations and samples (mine water, water from boreholes No. 45 and 3b, and water from the Kuniyok River) in 2019 were significantly lower than those in 2013 and, in particular, in 2008 (Table 2). The time-dependent change in AC of tritium in water from these points (examples are given in Fig. 8) can be well described with a negative exponential dependence:

$$AC_t = AC_0 \times \exp(-\lambda_{eff} \times t), \quad (5)$$

where AC_t is the AC of tritium (Bq/kg) at the time t ; AC_0 is the AC of tritium (Bq/kg) at zero time point (July 25, 2008); λ_{eff} is the empirical constant of effective decrease of AC (year⁻¹); t is time (year).

The constant λ_{eff} can be represented as the sum of two components: the decay constant, λ_{phys} (0.0563 year⁻¹ for tritium), and the constant of decrease of AC of tritium due to all ecological processes (λ_{eco} , year⁻¹). Accordingly, λ_{eco} is calculated as:

$$\lambda_{eco} = \lambda_{eff} - \lambda_{phys}, \quad (6)$$

Using the λ_{eff} values, we calculated the effective half-time (T_{eff} , year) of tritium in water with the formula:

$$T_{eff} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eff}}. \quad (7)$$

The ecological half-time (T_{eco} , year) of tritium in water was calculated in a similar way:

1,78 Бк/л (диапазон = 1,15–2,42 Бк/л) и 1,62 Бк/л (диапазон = 0,9–2,2 Бк/л) соответственно. Среднегодовое значение трития в атмосферных осадках в г. Мурманске в 2019 г. было равно 1,3 Бк/л, что ниже среднего по России в целом. Концентрация трития в воде двух основных рек, расположенных в северной части европейской территории России (Северная Двина (г. Архангельск) и Печора (г. Нарьян-Мар)), равнялась 1,2 Бк/л и 1,4 Бк/л соответственно, что также ниже среднего показателя для основных рек РФ.

Значение УА трития (1260 Бк/кг) в подземной воде, поступающей из рудника через выход из нижней штольни, было примерно на 3 порядка выше, чем значение УА трития в атмосферных осадках в Мурманске. При продвижении рудничной воды по колодцам не отмечалось изменения концентрации трития. На выходе из пруда-разбавителя (точка 9 на рис. 5) УА трития в воде резко снизилась (до 17 Бк/кг) за счет разбавления «чистой» водой (с УА трития, равной 2,5 Бк/кг), поступающей через подводящий канал (точка 20 на рис. 5). В воде реки Кунийок ниже выхода отводящего канала концентрация трития дополнительно уменьшилась до 5,5 Бк/кг (точка 11 на рис. 5). Ниже по течению (точки 12–16) дальнейшего снижения УА трития в воде реки Кунийок не наблюдалось. У южного берега озера Гольцовое (точки 17 и 18 на рис. 5) УА трития (5,3–5,6 Бк/кг) была аналогична таковой в реке Кунийок.

Рудничная вода, растекающаяся по территории в результате частичного разрушения дренажной системы (лужа на дороге, точка 4 на рис. 5), имела УА, сходную с таковой на выходе из нижней штольни. Это свидетельствовало об отсутствии источника (в частности, дождя) для разбавления этой части рудничной воды у подножья горы Куэльпор в период пробоотбора.

Скважины, находящиеся около места проведения МЯВ, весьма существенно различались между собой по показателю УА трития в подземной воде. Вода из скважины 1b, расположенной к северу от выхода из нижней штольни за пределами подножья горы Куэльпор, не содержала измеримой активности трития (УА <2 Бк/кг). Очевидно, что горизонт питания этой скважины не имеет непосредственной связи с рудником горы Куэльпор. Наибольшее значение УА (1510 Бк/кг) было зарегистрировано в скважине 3b (точка 8), расположенной непосредственно у основания горы Куэльпор. УА трития в воде из этой скважины была не ниже значения УА в воде, вытекающей через нижнюю штольню (1260 Бк/кг), что могло свидетельствовать о питании скважины 3b из подземного горизонта, насыщенного исключительно загрязненной рудничной водой. Значение УА трития в воде из самоизливающейся скважины № 45 (490 Бк/кг) было в 3 раза ниже соответствующего показателя для скважины 3b. Очевидно, что питание скважины № 45 происходит из подземного горизонта, в котором имеет место смешивание загрязненной рудничной воды и чистых подземных вод иного генеза. УА трития в воде из скважины 2b (5 Бк/кг) несколько превышала фоновые значения. Повидимому, горизонт питания этой скважины также имеет какую-то связь с рудником горы Куэльпор.

Вода, стекающая по поверхности камней над местом выхода верхней штольни, содержала тритий на уровне (2,2 ± 0,9 Бк/кг), который едва превышал предел детектирования.

Table 2

Activity concentration of tritium (AC) in water samples collected in certain locations at the “Dnepr” UNEs site in 2008, 2013, and 2019 [23; this study]

[Таблица 2]

Удельная активность трития (УА) в пробах воды, отобранных в определенных точках в 2008, 2013 и 2019 гг. в месте проведения МЯВ «Днепр» [23; данная работа]

No. * [№ *]	Location [Локация]	Main source of water [Основной источник воды]	AC (Bq/kg) [УА (Бк/кг)]		
			2008	2013	2019
2	Upper well [Верхний колодец]	adit [Штольня]	7500 ± 800	3655 ± 146	1210 ± 180
3	Lower well [Нижний колодец]	adit [Штольня]	7500 ± 800	3791 ± 151	1270 ± 190
6	Borehole No. 45 [Скважина № 45]	borehole [Скважина]	2900 ± 300	1556 ± 93	490 ± 74
8	Borehole-3b [Скважина 3b]	borehole [Скважина]	8700 ± 900	4506 ± 135	1510 ± 230
12	Kuniyok River [Река Кунийок]	surface [Поверхность]	24 ± 3	14.5 ± 0.5	5.5 ± 0.9
19	Slope above the entrance to the upper adit [Склон над входом в верхнюю штольню]	surface [Поверхность]	6.8 ± 1.4	<2	2.2 ± 0.9
20	Supply channel [Подводящий канал]	surface [Поверхность]	5.6 ± 1.3	<2	2.5 ± 0.9
29	Risyok River [Река Рисйок]	surface [Поверхность]	3.6 ± 1.3	<2	<2
33	Borehole-1b [Скважина 1b]	borehole [Скважина]	2.1 ± 1.2	2.0 ± 0.8	<2

* – number corresponds to the number of the sampling point shown in Fig. 5 and Table 1.

[* – номер соответствует номеру точки отбора проб, указанному на рис. 5 и в табл. 1].

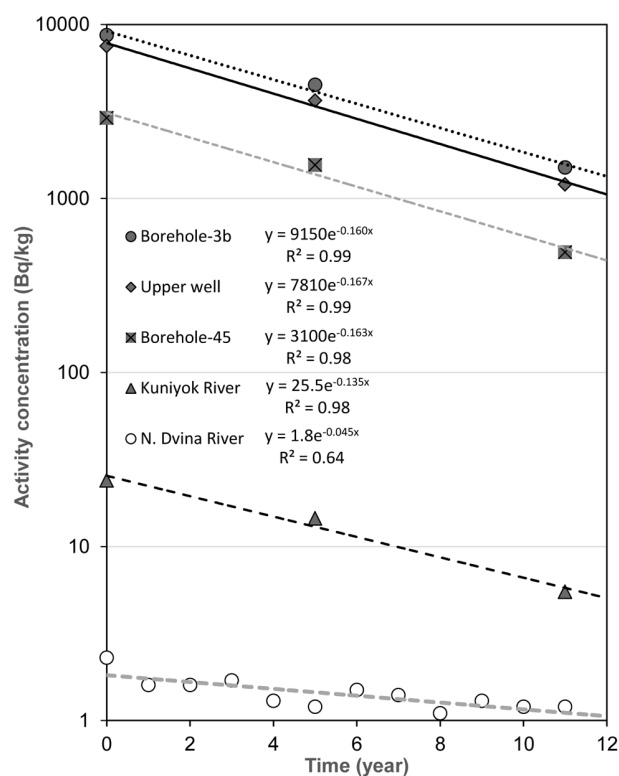


Fig. 8. Changes over time in the activity concentration of tritium in water from the underground sources (Borehole-3b, Upper well, Borehole-45) and the Kuniyok River at the site of the UNEs “Dnepr”, and from the Northern Dvina River in Arkhangelsk. Zero time point corresponds to 2008. The locations of the water sampling points Borehole-3b, Upper well, Borehole-45 and the Kuniyok River are marked in Fig. 5 with numbers 8, 2, 6, and 12, respectively. Exponential curves are fitted to the data points for each sampling location. The data on the Northern Dvina River are taken from ref. [6]

[Рис. 8. Изменение со временем объемной активности трития в воде подземных источников (скважина 3b [Borehole-3b], верхний колодец [Upper well], скважина № 45 [Borehole-45] и реки Кунийок [Kuniyok River] в месте проведения МЯВ серии «Днепр», а также в воде из реки Северная Двина [N. Dvina River] в городе Архангельск. Нулевая отметка времени соответствует 2008 г. Места расположения точек отбора воды из скважины 3b, верхнего колодца, скважины № 45 и реки Кунийок отмечены номерами 8, 2, 6 и 12 соответственно на рисунке 5. Экспоненциальные кривые построены по точкам экспериментальных данных для каждого места отбора проб. Данные по реке Северная Двина взяты из [6]. Time (year) – время (год); Activity concentration (Bq/kg) – удельная активность (Бк/кг)]

$$T_{eco} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eco}}. \quad (8)$$

Results of the calculations are provided in Table 3. The values of T_{eff} of tritium at the "Dnepr" site were in the range of 4.1–5.1 years. The median and mean values of T_{eff} were equal to 4.3 and 4.4 years, respectively (standard error of the mean, SEM, = 0.2 year). The T_{eco} values ranged from 6.2 to 8.8 years with the mean $\pm$ SEM = 6.9 $\pm$ 0.9 years. Therefore, the rate of decrease in AC of tritium in water from the mine, the boreholes 3b and 45, and the Kuniyok River depended more on ecological processes (dilution with "pure" water) than on physical decay ($T_{1/2}$ = 12.3 years) of the radionuclide. For comparison, we performed similar calculations of the effective half-time of tritium in water of 11 largest rivers of the RF: Northern Dvina, Pechora, Volga, Don, Yenisei, Lena, Kolyma, Nizhnyaya Tunguska, Indigirka, Ob, and Amur. The original experimental data were obtained by Roshydromet (Table 1, Appendix A9 in [6]) based on results of the annual analysis of water samples taken in 15 observation points. Fig. 8 shows an example of using regression analysis to assess temporal variations in AC of tritium in the water from the Northern Dvina River sampled at the Solombala station, located in Arkhangelsk (see Fig. 1), at a distance of approximately 480 km from the site of the "Dnepr" UNEs. The Arkhangelsk station is the closest to our studied area sampling point, which is used by Roshydromet for annual monitoring of river water. The regression analysis (Fig. 8) and calculations (expressions 5–8) showed that in the uncontaminated Northern Dvina River, the T_{eff} value (15.4 years) for AC of tritium was much larger than that in the mine waters of Mt. Kuel'por. For the whole set of 11 uncontaminated rivers, the T_{eff} values (range = 10.5–23.9 years, median = 16.9 years, mean $\pm$ SEM = 17.2 $\pm$ 1.1 years) significantly (the Mann-Whitney U test, $P < 0.01$) exceeded the T_{eff} values that were calculated for the five monitored places at the "Dnepr" site (Table 3). The differences between the major rivers and the Mt Kuel'por mine in terms of the rate of decrease in AC of tritium in water can be attributed to different sources of origin of tritium. For the mine water, virtually the only (and never replenished) source of radioactive contamination is the constantly depleting tritium inventory formed inside Mt. Kuel'por as a result of the 1972 and 1984 UNEs. Tritium in water of the

Во всех пробах воды, отобранных в 2019 г. в месте проведения МЯВ «Днепр», УА трития была существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды (7600 Бк/кг, согласно НРБ-99/2009). Кроме того, значения УА в пробах 2019 г. (рудничная вода, вода из скважин 45 и 3b, а также вода реки Кунийок) были заметно ниже значений 2013 г. и в особенности 2008 г. (табл. 2). Зависящее от времени изменение УА трития в воде из этих точек (примеры даны на рис. 8) может быть хорошо описано отрицательной экспоненциальной зависимостью:

$$AC_t = AC_0 \times \exp(-\lambda_{eff} \times t), \quad (5)$$

где AC_0 – удельная активность трития (Бк/кг) в момент времени 0 (принято 25 июля 2008 г.); AC_t – удельная активность трития (Бк/кг) в момент времени t ; λ_{eff} – эмпирическая постоянная эффективного уменьшения удельной активности (год⁻¹); t – время (год).

λ_{eff} может быть представлена как сумма двух компонент – постоянной распада, λ_{phys} , (для трития она равна 0,0563 год⁻¹) и постоянной уменьшения удельной активности за счет всех экологических процессов (λ_{eco} , год⁻¹). Соответственно, λ_{eco} вычисляем как:

$$\lambda_{eco} = \lambda_{eff} - \lambda_{phys}, \quad (6)$$

Используя значения λ_{eff} , мы вычислили значения эффективного периода полууменьшения (T_{eff} , год) УА трития в воде по формуле:

$$T_{eff} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eff}}. \quad (7)$$

Аналогичным способом был вычислен и экологический период полууменьшения (T_{eco} , год) УА трития в воде:

$$T_{eco} = \frac{\ln 2}{\lambda_{eco}}. \quad (8)$$

Результаты вычислений представлены в таблице 3. Значения T_{eff} трития на объекте «Днепр» находились в диапазоне 4,1–5,1 года. Медианное и среднее значение T_{eff} составили 4,3 и 4,4 года соответственно (стандартная ошибка среднего, SEM, = 0,2 года). Значения T_{eco}

Table 3

Estimated values of the activity concentration of tritium (AC_0) for the zero time point (2008), effective half-time (T_{eff}), ecological half-time (T_{eco}) for tritium in water at the "Dnepr" site in the period 2008–2019. The least squares' regression method was used to assess the AC_0 , T_{eff} and T_{eco} .

[Таблица 3]

Расчетные значения удельной активности трития ($УА_0$) для нулевой отметки времени (2008 г.), эффективного периода полууменьшения (T_{eff}), экологического периода полу-уменьшения (T_{eco}) удельной активности трития в воде в период 2008–2019 гг. на объекте «Днепр». Для вычисления AC_0 , T_{eff} и T_{eco} была использована линейная регрессия (метод наименьших квадратов)]

No.* [№ *]	Location [Локация]	Main source of water [Основной источник воды]	AC_0 (Bq/kg) [$УА_0$ (Бк/кг)]	R^2	T_{eff} (y) [T_{eff} (год)]	T_{eco} (y) [T_{eco} (год)]
2	Upper well [Верхний колодец]	adit [Штольня]	7810	0.99	4.1	6.2
3	Lower well [Нижний колодец]	adit [Штольня]	7850	0.99	4.3	6.6
6	Borehole No. 45 [Скважина № 45]	borehole [Скважина]	3100	0.98	4.3	6.6
8	Borehole-3b [Скважина 3b]	borehole [Скважина]	9150	0.99	4.3	6.6
12	Kuniyok River [Река Кунийок]	surface [Поверхность]	25.5	0.98	5.1	8.8

* – number corresponds to the number of the sampling point shown in Fig. 5 and Table 1.

[* – номер соответствует номеру точки отбора проб, указанному на рис. 5 и в табл. 1].

large rivers originates mainly from a global inventory of tritium, which is constantly replenished due to natural processes and human activities [2, 5, 6].

In 2019, the effective dose to the hotel staff due to ingestion of tritium with drinking water from the Kuniyok River was estimated as 0.17 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. The effective dose to tourists in case of consumption of the tritium-contaminated water from the self-flowing borehole No. 45 during 14 days was estimated as 0.66 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. Both estimations gave the dose values that were negligible in comparison with the effective dose limit for public exposure (1 mSv/year or 1000 $\mu\text{Sv}/\text{year}$, according to NRB-99/2009) and with the value of annual average effective dose due to natural radiation for a citizen of Murmansk Oblast in 2019 (2.98 mSv [29]).

Conclusions

The study revealed that in 2019, the tritium-contaminated water continued to flow from the site of peaceful underground thermonuclear explosions of the "Dnepr" series into waterbodies located in the Kuniyok River valley, Khibiny Massif. The maximum AC of tritium in surface and ground water samples reached 1500 Bq/kg, which was almost three orders of magnitude higher than the regional background level (about 2 Bq/kg). However, the maximum measured value was significantly lower compared to the IL for drinking water (7600 Bq/kg, according to NRB-99/2009). Hence, in terms of tritium contamination, surface and ground waters in the region of the "Dnepr" UNEs are drinkable without any restrictions.

Based on the results of this study and data obtained earlier by other researchers, it became possible to estimate the half-time for decrease of AC of tritium in surface and ground waters in 2008–2019. The decrease in AC of tritium occurred at the same rate in the mine water and in the water from boreholes; T_{eff} values were in the range of 4.1–4.3 years. The effective half-time of tritium in water from the Kuniyok River (5.1 years) was slightly longer than that in the mine water and in water from the boreholes. In all sampling points, the rate of decrease in AC of tritium in water depended more on ecological processes (dilution with "pure" water) than on the physical decay of the radionuclide.

In 2019, the effective dose to the staff of the local hotel due to ingestion of tritium with drinking water from the Kuniyok River was 0.17 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. The effective dose to tourists in case of consumption of the tritium-contaminated water from the self-flowing borehole No. 45 during 14 days was 0.66 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. Both estimations gave the dose values, which were negligible in comparison with the public dose limit of 1 mSv/year.

Based on the available experimental data and estimates, in the following years we should not expect an increase in the level of tritium contamination of waterbodies at the "Dnepr" UNEs site. However, regular monitoring of AC of tritium in those water sources that are used or can be used by people for the drinking water intake should be continued. Having the updated and experimentally based assessments of water contamination and communicating them promptly to the public will help to keep the level of concern among the local residents and tourists at a low level. At the same time, such assessments may be in demand in the scientific synthesis of modern and archival data on AC of tritium in surface and ground waters in various regions of the world.

варьировали от 6,2 до 8,8 лет со средним значением и SEM, равными 6,9 года и 0,9 года соответственно. Эти оценки показывают, что скорость снижения концентрации трития в воде в большей мере зависела от экологических процессов (разбавление «чистой» водой), нежели от физического распада радионуклида ($T_{1/2} = 12,3$ года). Для сравнения мы выполнили аналогичные расчеты в отношении изменения концентрации трития в воде 11 основных крупных рек РФ: Северная Двина, Печора, Волга, Дон, Енисей, Лена, Колыма, Нижняя Тунгуска, Индигирка, Обь, Амур. Оригинальные экспериментальные данные были получены Росгидрометом (табл. 1 из Приложения А9 в [6]) по результатам ежегодного анализа проб воды из 15 пунктов наблюдения. На рисунке 8 приведен пример использования регрессионного анализа для оценки временных изменений УА трития в реке Северная Двина в пункте Соломбала, расположенном в Архангельске (рис. 1) на расстоянии приблизительно 480 км от места проведения МЯВ «Днепр». Это самый близкий к ареалу нашего обследования пост, используемый Росгидрометом для ежегодного мониторинга речной воды. Регрессионный анализ (рис. 8) и вычисления (выражения 5–8) показали, что в незагрязненной реке Северная Двина значение T_{eff} для трития в воде (15,4 года) было существенно больше значений этого показателя в рудничной воде горы Кузельпор. Для всей выборки из 11 незагрязненных рек значения T_{eff} (диапазон 10,5–23,9 года, медиана = 16,9 года, средняя $\pm$ SEM = $17,2 \pm 1,1$ года) статистически значимо (U-критерий Манна – Уитни, $P < 0,01$) превышали значения T_{eff} определенные для 5 мест мониторинга на объекте «Днепр» (табл. 3). Различия между крупными реками и рудником горы Кузельпор в отношении скорости уменьшения концентрации трития в воде объясняются разными источниками происхождения трития. Для воды из рудника практически единственным (и непополняемым) источником загрязнения является постоянно истощающийся запас трития, сформировавшийся внутри горы Кузельпор в результате подземных термоядерных взрывов 1972 и 1984 гг. Тритий в воде крупных рек имеет происхождение, в основном, из глобального резервуара трития, который постоянно пополняется за счет естественных процессов и деятельности человека [2, 5, 6].

Эффективная доза облучения работника гостиницы за счет присутствия трития в питьевой воде из реки Кунийок составила в 2019 г. 0,17 мкЗв/год. Доза облучения туриста в случае потребления загрязненной тритием воды из самоизливающейся скважины № 45 была равна 0,66 мкЗв/год. Оба сценария дают дозовую оценку, величина которой является пренебрежимо малой по сравнению с допустимой дозой техногенного облучения населения 1 мЗв/год (1000 мкЗв/год), согласно НРБ-99/2009, и дозой облучения населения Мурманской области за счет природных источников (2,98 мЗв/год) [29].

Заключение

Выполненное исследование показало, что в 2019 г. продолжалось поступление трития с водой от места проведения подземных термоядерных взрывов серии «Днепр» в водотоки и водоемы, расположенные на поверхности земли в Хибины. Максимальная удельная активность трития в пробах воды из поверхностных и под-

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this article.

The individual contributions of authors

V.P. Ramzaev analyzed the newly obtained and archived experimental data, wrote a draft of the manuscript and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

A.M. Biblin participated in collection of samples, analyzed literature data and edited an intermediate version of the manuscript.

V.S. Repin provided general management of the project, secured the funding, calibrated the measuring equipment, and edited an intermediate version of the manuscript.

E.V. Khramtsov supervised the field part of the research, participated in collection of samples, and edited an intermediate version of the manuscript.

K.V. Varfolomeeva measured activity of tritium in samples.

Acknowledgements

The authors are grateful to S.A. Ivanov (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) and V.A. Nekrasov (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for help in sampling, and to M.A. Timofeeva (Saint Petersburg State University) for her help in creating Figure 3. The authors are deeply thankful to Professor M.I. Balonov (Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev) for valuable suggestions on a preliminary version of the manuscript and to two reviewers for constructive comments and suggestions that considerably improved the quality of the final version of this paper.

Sources of funding

Funding of the study was provided by the Federal Medical and Biological Agency of Russia (Contracts No. 81.001.17.2 and No. 81.001.20.3).

References

1. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2000 REPORT, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York; 2000. Vol. 1.
2. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2016 Report, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Annex C – Biological Effects of Selected Internal Emitters – Tritium. United Nations, New York; 2017.
3. Eyrolle F, Ducros L, Le Dizès S, Beaugelin-Seiller K, Charmasson S, Boyer P, Cossonnet C. An updated review on tritium in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;181: 128–137. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
4. Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water. Minister of Public Works and Government Services, Canada. 2008. Available on: https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf. [Accessed 23.10.2021].
5. Makhon'ko KP, Kim VM, Katrich IY, Volokitin AA. Comparison of the behavior of tritium and ^{137}Cs in the atmosphere. *Atomnaya Energiya = Atomic Energy*. 1998;85(4): 313–318. (In Russian).
6. The Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2019. Yearbook. NPO Typhoon. Obninsk; 2020. (In Russian). Available on: http://egasmro.ru/files/documents/ro_ezhhegodniki/ezhegodnik_ro_2019.pdf. [Accessed 23.10.2021].

земных источников достигала 1500 Бк/кг, что почти на 3 порядка величины превышало региональное фоновое значение (около 2 Бк/кг), но было существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды (7600 Бк/кг). Соответственно, по показателю загрязнения тритием поверхностные и подземные воды в регионе проведения МЯВ «Днепр» пригодны для питья без каких-либо ограничений.

По результатам данного исследования и на основе сведений, полученных ранее другими авторами, представлялась возможность оценить период полуочищения подземных и поверхностных вод от трития в период 2008–2019 гг. В рудничной воде и в воде из скважин уменьшение удельной активности трития проходило с одинаковой скоростью; значения T_{eff} находились в диапазоне 4,1–4,3 года. Период полууменьшения УА трития в воде реки Кунийок (5,1 года) был несколько больше такового в рудничной воде и в воде из скважин. Во всех случаях скорость снижения концентрации трития в воде в большей мере зависела от экологических процессов (разбавление «чистой» водой), нежели от физического распада радионуклида.

В 2019 г. оцененное значение эффективной дозы облучения работника гостиницы за счёт присутствия трития в питьевой воде из реки Кунийок равнялось 0,17 мкЗв. Доза облучения туриста в случае потребления загрязненной тритием воды из самоизливающейся скважины № 45 была равна 0,66 мкЗв/год. В обоих случаях величина дозовой оценки является пренебрежимо малой по сравнению с допустимой дозой техногенного облучения населения 1 мЗв/год.

На основе имеющихся экспериментальных данных и оценок в последующие годы не следует ожидать увеличения уровня загрязнения тритием водных объектов в месте проведения МЯВ серии «Днепр». Однако регулярный мониторинг загрязнения тритием тех источников, которые используются или могут использоваться человеком для забора питьевой воды, следует продолжить. Наличие актуализированных и экспериментально-обоснованных оценок показателей загрязнения воды и их публичное оперативное представление в средствах массовой информации поможет сохранять уровень тревожности у местного населения и туристов на низком уровне. В то же время такие оценки могут оказаться востребованными при научном обобщении современных и архивных данных о содержании трития в поверхностных и подземных водах в различных регионах мира.

Конфликт интересов

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

Персональное участие авторов

В.П. Рамзаев провел анализ вновь полученных и архивных экспериментальных данных, подготовил черновик рукописи, оформил окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

А.М. Библин провел отбор части проб, выполнил анализ литературных данных, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

В.С. Репин осуществлял общее руководство выполне-

7. Matsumoto H, Shimada Y, Nakamura AJ, Usami N, Ojima M, Kakinuma S, et al. Health effects triggered by tritium: how do we get public understanding based on scientifically supported evidence? *Journal of Radiation Research*. 2021;62(4): 557–563. DOI: 10.1093/jrr/rrab029.
8. “Fukushima-1” NPP Accident: Radiological Consequences and Lessons. Ed. by acad. of RAS G.G. Onishenko and prof. A.Yu. Popova. St. Petersburg: Research Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev; 2021. 388 p. (In Russian). Available on: http://www.niirg.ru/PDF/2021/F1_2021.pdf. [Accessed 23.10.2021].
9. Atlas of the East Ural and Karachay Radioactive Trace Including Forecast up to 2047. Editor-in-chief Yu.A. Izrael. Moscow: IGCE Roshydromet and RAS, «Infosphere» Foundation; 2013. 140 p. (In Russian). Available on: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/index.html. [Accessed 23.10.2021].
10. Chebotina MYa, 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). DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
11. Finashov LV, Vostrotin VV, Yanov AYu. Tritium in urine in residents of Ozyorsk, the Chelyabinsk region in 2016. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 42–49. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
12. Panov AV, Trapeznikov AV, Korzhavin AV, Geshel IV, Korovin SV, Edomskaya MA. Radiation monitoring of drinking water in the vicinity of the Beloyarsk NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 86–101. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-86-101.
13. Nuclear Legacy Problems and Ways to Solve Them. Under the general editorship of E.V. Evstratova, A.M. Agapova, N.P. Laverova, L.A. Bolshova, I.I. Linge. 2012. 356 p. Available on: http://en.ibrae.ac.ru/docs/Monografii/yadern_nasledie_t1%20sq.pdf. [Accessed 23.10.2021].
14. Nordyke MD. The Soviet program for peaceful uses of nuclear explosions. *Science and Global Security*. 1998;7: 1–117. Available on: <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs07nordyke.pdf>. [Accessed 01.12.2021].
15. Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety. Ed. by prof. V.A. Logachev. Moscow: Izd.AT; 2001. 519 p. (In Russian).
16. Ramzaev VP, Repin VS, Khrantsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
17. Timofeeva MA, Barkovsky AN, Medvedev AYu, Ramzaev VP, Repin VS. On including the data relevant to peaceful nuclear explosions in the radiation hygiene passport of a territorial subject of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(3): 51–54. (In Russian).
18. Vasiliev AP. Nuclear explosive technologies for peaceful nuclear explosions In: Zababakhinskiy Scientific Readings: Collection of Materials of the XIII International Conference (March 20–24, 2017). Snezhinsk; 2017. P. 10. (In Russian). Available on: http://vniitf.ru/data/images/zst/2017/section_0/2_vasiliev_plenar_en.pdf. [Accessed 23.10.2021].
19. Yablokov AV. The Myth about the Safety and Effectiveness of Peaceful Underground Nuclear Explosions. Moscow: TsEPR; 2003. 176 p. (In Russian). Available on: https://www.yabloko.ru/books/mif_6.pdf. [Accessed 21.11.2021].
20. Kasatkin VV, Mamonov BP, Kasatkin AV. Radiation monitoring of the “DNEPR” nuclear explosion facility after its conservation (decommissioning). V International Nuclear Forum – Nuclear Technology Safety: Safety Strategy and Economics. St. Petersburg, September 27 – October 01, 2010. (In Russian). Available on: <https://www.atomic-energy.ru/presentations/18978>. [Accessed 23.10.2021].
21. Kochetkov OA, Monastyrskaya SG, Kabanov DI. Problems of anthropogenic tritium limitation (review). *Saratov Journal*

нием проекта, обеспечил привлечение финансирования, провел калибровку измерительной аппаратуры, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

Е.В. Храмцов руководил выполнением полевых исследований, провел отбор части проб, провел редактирование промежуточного варианта рукописи.

К.В. Варфоломеева выполнила измерения активности трития в пробах.

Благодарность

Авторы благодарят С.А. Иванова (ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева) и В.А. Некрасова (ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева) за помощь при отборе проб и М.А. Тимофееву (Санкт-Петербургский государственный университет) за помощь в создании рисунка 3. Авторы выражают глубокую благодарность профессору М.И. Балонову (ФБУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева) за ценные рекомендации по коррекции предварительной версии рукописи и двум рецензентам за конструктивные комментарии и предложения, значительно улучшившие качество окончательной версии статьи.

Источники финансирования

Финансирование работы осуществлялось по контрактам № 81.001.17.2 и № 81.001.20.3 с Федеральным медико-биологическим агентством России.

Литература

1. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2000 REPORT, Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York; 2000. Vol. 1.
2. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation. 2016 Report, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, Annex C – Biological Effects of Selected Internal Emitters – Tritium. United Nations, New York; 2017.
3. Eyrolle F., Ducros L., Le Dizès S., et al. An updated review on tritium in the environment // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 181. P. 128–137. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.11.001.
4. Standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water. Minister of Public Works and Government Services, Canada. 2008. URL: https://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/info_0766_e.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
5. Махонько К.П., Ким В.М., Катрич И.Ю., Волокитин А.А. Сравнительное поведение трития и ^{137}Cs в атмосфере // *Атомная энергия*. 1998. Т. 85, № 4. С. 313–318.
6. Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств в 2019 г. Ежегодник. НПО «Тайфун». Обнинск, 2020. URL: http://egasmro.ru/files/documents/ro_ezhegodniki/ezhegodnik_ro_2019.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
7. Matsumoto H., Shimada Y., Nakamura A.J., et al. Health effects triggered by tritium: how do we get public understanding based on scientifically supported evidence? // *Journal of Radiation Research*. 2021. Vol. 62, No. 4. P. 557–563. DOI: 10.1093/jrr/rrab029.
8. Авария на АЭС «Фукусима-1»: радиологические последствия и уроки / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. – СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2021. – 388 с. URL: http://www.niirg.ru/PDF/2021/F1_2021.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
9. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Ю.А. Израэля. – М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2013. 140 с. URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/index.html. [Дата обращения: 23.10.2021].

- of Medical Scientific Research. 2013;9(4): 815–818. (In Russian).
22. The Modern Radioecological Situation at the Sites of Peaceful Nuclear Explosions on the Territory of the Russian Federation. Ed. by prof. V.A. Logachev. Moscow: Izd.AT; 2005. 256 p. (In Russian). Available on: http://elib.biblioatom.ru/text/sovremennaya-radioekologicheskaya-obstanovka-rf_2005/go,0/ [Accessed 05.12.2021].
23. Khramtsov EV, Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Arkhangel'skaya GV, Repin VS, Vishnyakova NM. Objective and subjective in an assessment of the danger of the consequences of peaceful nuclear explosions on the example of facility «Dnepr». *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(1): 35–44. (In Russian).
24. Search according to the State Water Register. Available on: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=155543> [Accessed 21.12.2021].
25. Shevchenko A. Precipitation in Khibiny. Available on: <http://hibtravel.ru/rain.html> [Accessed 21.12.2021].
26. Mazukhina SI, Maksimova VV, Chudnenko KV, Masloboev VA, Sandimirov SS, Drogobuzhskaya SV, et al. Water Quality in the Arctic Zone of the Russian Federation: Physical and Chemical Modeling of Water Formation, Forms of Migration of Elements, Impact on the Human Body. Apatity: Publishing House of the Federal Research Center of the KSC RAS; 2020. 158 p. (In Russian). Available on: https://inep.ksc.ru/documents/51_mazukhina_20.pdf. [Accessed 21.11.2021].
27. Arun B, Vijayalakshmia I, Sivasubramaniana K, Jose MT. Optimization of liquid scintillation counter for tritium estimation in water samples. *Radiochemistry*. 2019;61(1): 61–65. DOI: 10.1134/S1066362219010090.
28. Jones FE, Harris GL. ITS-90 Density of water formulation for volumetric standards calibration. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1992;97(3): 335–340. DOI: 10.6028/jres.097.013.
29. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AN, et al. Information Bulletin: Radiation Doses in Russia, 2019. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev: St. Petersburg; 2020. (In Russian). Available on: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2019.pdf. [Accessed 21.11.2021].
30. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-87-92.
31. Финашов Л.В., Востротин В.В., Янов А.Ю. Тритий в моче у жителей города Озерска Челябинской области в 2016 г. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 42–49. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-42-49.
32. Панов А.В., Трапезников А.В., Коржавин А.В., и др. 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.
33. Проблемы ядерного наследия и пути их решения / Под общ. ред. Е.В. Евстратова, А.М. Агапова, Н.П. Лаврова, Л.А. Большова, И.И. Линге. 2012. 356 с. URL: http://en.ibrae.ac.ru/docs/Monografii/yadern_nasledie_t1%20sq.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
34. Nordyke M.D. The Soviet program for peaceful uses of nuclear explosions // Science and Global Security. 1998. Vol. 7. P. 1–117. URL: <https://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs07nordyke.pdf>. [Дата обращения: 01.12.2021].
35. 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.
36. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные подземные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
37. Тимофеева М.А., Барковский А.Н., Медведев А.Ю., и др. О внесении данных о радиационно-гигиенической обстановке в местах проведения мирных ядерных взрывов в радиационно-гигиенический паспорт территории субъекта Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 51–54.
38. Васильев А.П. Ядерные взрывные технологии в мирных ядерных взрывах. Забабахинские научные чтения: Сборник материалов XIII Международной конференции (20–24 марта 2017). Снежинск, 2017. С. 10. URL: http://vniitf.ru/data/images/zst/2017/section_0/2_vasiliev_plenar_en.pdf. [Дата обращения: 23.10.2021].
39. Яблоков А.В. Миф о безопасности и эффективности мирных подземных ядерных взрывов. М.: ЦЭПР, 2003. 176 с. URL: https://www.yabloko.ru/books/mif_6.pdf. [Дата обращения: 21.11.2021].
40. Касаткин В.В., Мамонов Б.П., Касаткин А.В. Радиационный мониторинг объекта ядерного взрыва «ДНЕПР» после его консервации (вывода из эксплуатации). V Международный ядерный форум – Безопасность ядерных технологий: стратегия и экономика безопасности. С-Петербург, 27 сентября–01 октября 2010 г. URL: <https://www.atomic-energy.ru/presentations/18978>. [Дата обращения: 23.10.2021].
41. Кочетков О.А., Монастырская С.Г., Кабанов Д.И. Проблемы нормирования техногенного трития (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. Т. 9, № 4. С. 815–818.
42. 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. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/sovremennaya-radioekologicheskaya-obstanovka-rf_2005/go,0/ [Дата обращения: 05.12.2021].
43. Храмцов Е.В., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., и др. Объективное и субъективное в оценке опасности последствий мирных ядерных взрывов на примере объекта «Днепр» // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 1. С. 35–44.
44. Поиск по данным государственного водного реестра. URL: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=155543> [Дата обращения: 21.12.2021].
45. Осадки в Хиби́нах. URL: <http://hibtravel.ru/rain.html> [Дата обращения: 21.12.2021].

Received: November 8, 2021

26. Мазухина С.И., Максимова В.В., Чудненко К.В., и др. Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека. Апатиты: Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 158 с. URL: https://inep.ksc.ru/documents/51_mazukhina_20.pdf. [Дата обращения: 21.11.2021].
27. Arun B., Vijayalakshmia I., Sivasubramaniana K., Jose M.T. Optimization of liquid scintillation counter for tritium estimation in water samples // *Radiochemistry*. 2019. Vol. 61, No. 1. P. 61–65. DOI: 10.1134/S1066362219010090.
28. Jones F.E., Harris G.L. ITS-90 Density of water formulation for volumetric standards calibration // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1992. Vol. 97, No. 3. P. 335–340. DOI: 10.6028/jres.097.013.
29. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Информационный сборник: «Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году». СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2020. URL: http://www.niirg.ru/PDF/inf_sbor/2019.pdf. [Дата обращения: 21.11.2021].

Поступила: 08.11.2021 г.

Valery P. Ramzaev – Ph.D of Medical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of External Exposure, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing. **Address for correspondence:** Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

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

Viktor S. Repin – Advanced Doctor in Biological Sciences, Head of the 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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Kseniya V. Varfolomeeva – Junior Researcher of the 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 Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

Рамзаев Валерий Павлович – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: V.Ramzaev@mail.ru

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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

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, Санкт-Петербург, Россия

Варфоломеева Ксения Владимировна – младший 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, Санкт-Петербург, Россия

For citation: Ramzaev V.P., Biblin A.M., Repin V.S., Khramtsov E.V., Varfolomeeva K.V. Tritium contamination of surface and ground waters at the “Dnepr” peaceful underground nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26

Для цитирования: Рамзаев В.П., Библин А.М., Репин В.С., Храмцов Е.В., Варфоломеева К.В. Загрязнение тритием поверхностных и подземных вод в месте проведения мирных подземных ядерных взрывов серии «Днепр» // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 6-26. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-6-26

Восточно-Уральский радиоактивный след: смертность от злокачественных опухолей за 57-летний период (1957–2014 гг.)

С.С. Силкин, Л.Ю. Крестинина, А.В. Аклев

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

Целью данного исследования была оценка радиогенного риска смерти от злокачественных опухолей в когорте населения, облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за 57-летний период наблюдения (с 1957 по 2014 г.) с использованием индивидуализированных доз. Материалы и методы: в конце сентября 1957 г. на территории производственного объединения «Маяк» в результате аварии в системе охлаждения емкостей с жидкими радиоактивными отходами произошел взрыв, приведший к образованию Восточно-Уральского радиоактивного следа. Население, проживавшее в загрязненных населенных пунктах Челябинской и Свердловской областей, подверглось длительному внешнему и внутреннему облучению. Когорта облученных лиц насчитывает 21 384 человека, 2055 из которых до аварии 1957 г. проживали в населенных пунктах на реке Тече и получили дополнительное облучение. Средняя доза на желудок для членов когорты Восточно-Уральского радиоактивного следа составила 36 мГр, максимальная – 1130 мГр. Для оценки индивидуализированных доз использована обновленная дозиметрическая система TRDS-2016. За 57-летний период наблюдения за когортой (1957–2014 гг.) на территории наблюдения зарегистрировано 1294 случая смерти от злокачественных опухолей. Число человеко-лет под риском составило 511 278. Анализ риска смертности от злокачественных опухолей проведен с использованием программ статистического пакета EPICURE методом Пуассоновской регрессии. Доверительные интервалы рассчитаны с использованием метода максимального правдоподобия. Результаты: при анализе смертности от злокачественных опухолей в когорте Восточно-Уральского радиоактивного следа за 57-летний период получен статистически значимый избыточный относительный риск смерти на 100 мГр, равный 0,05 (95% ДИ: 0,002; 0,11, $p=0,04$) во всей когорте. При исключении из анализа лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече, величина риска теряет статистическую значимость.

Ключевые слова: Восточно-Уральский радиоактивный след, ВУРС, когорта Восточно-Уральского радиоактивного следа, злокачественные новообразования, злокачественные опухоли, избыточный относительный риск смерти, радиогенный риск смерти.

Введение

В 1950-е гг. на Южном Урале произошли две значимых радиационных ситуации. Обе связаны с деятельностью запущенного в эксплуатацию в 1948 г. предприятия по производству оружейного плутония ПО «Маяк». В первые годы работы предприятия (1949–1956 гг.) по причине отсутствия отлаженных технологий переработки и хранения радиоактивных отходов осуществлялся бесконтрольный сброс жидких радиоактивных отходов в реку Течу. Максимум сбросов пришелся на 1951 г. В результате этого население, проживающее в населенных пунктах на реке Тече, которое активно использовало воду для бытовых и хозяйственных нужд, подверглось длительному радиационному воздействию за счет внутреннего и внешнего γ -облучения. Основными дозобразующими радионуклидами были долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs [1–3].

29 сентября 1957 г. вследствие аварийного выхода из строя системы охлаждения в хранилище жидких радиоактивных отходов на территории ПО «Маяк» произошел термический взрыв емкости с отходами. В результате образовалось радиоактивное облако, содержащее коротко- и долгоживущие радионуклиды ($^{144}\text{Ce}+^{144}\text{Pr}=66\%$; $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}=5,4\%$; $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}=24,9\%$; $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}=3,7\%$). Большая часть радионуклидов (18 млн Ки из 20) осела на территории ПО «Маяк», остальные разнесло ветром на территории Челябинской и Свердловской областей. Территории, подвергшиеся радиоактивному загрязнению, получили название Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). Протяженность ВУРСа на северо-восток от эпицентра взрыва составила 350 км. Жители, проживающие на этих территориях, подверглись длительному радиоактивному внешнему и внутреннему γ -облучению. Населенные пункты с плотностью загрязне-

Силкин Станислав Сергеевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

ния по ^{90}Sr выше 2 Ки/км^2 были переселены в несколько этапов на чистые территории, остальные (с плотностью загрязнения ниже 2 Ки/км^2) остались не переселенными. Всего было переселено 22 пункта (19 из Челябинской области и 3 из Свердловской областей) [4–6]. Часть жителей (2055 человек) до аварии 1957 г. проживали в населенных пунктах на реке Тече. Эта группа лиц получила наивысшие в когорте ВУРСа (КВУРС) дозы.

Наблюдение за облученным населением Южного Урала, а также изучение эффектов радиационного излучения на здоровье ведется в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) на протяжении нескольких десятилетий. В конце 1980-х гг. был создан электронный персонализированный регистр облученного на территории ВУРСа населения, позднее была сформирована КВУРС. Первые работы, посвященные эффектам действия радиационного излучения на здоровье населения ВУРСа, проводимые в УНПЦ РМ в 1990-е и 2000-е гг., не выявили значимых зависимостей онкологической заболеваемости и смертности от дозы [7, 8]. В 2010-е гг. в эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ нами были проведены исследования, посвященные анализу смертности [9] и заболеваемости [10] злокачественными опухолями (ЗО) в КВУРС с использованием индивидуализированных доз, которые выявили наличие линейной статистически значимой зависимости «доза – эффект» (ИОР смерти был равен $0,67/\text{Гр}$, $p=0,03$, ИОР заболеваемости составил $0,5/\text{Гр}$, $p=0,08$). В 2020 г. была проанализирована заболеваемость ЗО в КВУРС [11] с расширенным периодом наблюдения до 57 лет. Кроме того, в этом исследовании была проанализирована заболеваемость ЗО в КВУРС с исключением высокодозовой группы лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече. Во всей КВУРС был выявлен статистически значимый риск заболеваемости, равный $0,5/\text{Гр}$ (аналогичный, как и в предыдущем исследовании [10]). Статистическая значимость повысилась за счет увеличения длительности периода наблюдения и количества случаев заболеваний ЗО. Также необходимо отметить, что при исключении группы лиц, получивших дополнительное облучение на реке, риск стал статистически не значимым.

Данное исследование является продолжением исследовательской работы, посвященной эффектам на здоровье населения в КВУРС. Ее целью является оценка ИОР смерти от ЗО в КВУРС с увеличенным на 7 лет периодом наблюдения за когортой, а также с использованием индивидуализированных доз, рассчитанных по обновленной дозиметрической системе TRDS [12].

Материалы и методы

Источники информации о жизненном статусе, об истории проживания членов КВУРС и о случаях ЗНО

Информация об истории проживания облученных лиц на ВУРСе, а также о заболеваемости и смерти собирается в УНПЦ РМ систематически, начиная с конца 1980-х гг. и по настоящее время. Основным источником данных об истории проживания являются данные Челябинского адресного бюро и похозяйственных книг. Дополнительными источниками информации о жизненном статусе членов когорты являлись: опрос родственников, анкетирование, медицинская документация кли-

нического отделения УНПЦ РМ, а также данные единого компьютерного регистра облученного на Южном Урале населения, станции которого находятся на базе многих лечебно-профилактических учреждений Челябинской области.

Основными источниками данных об онкологической заболеваемости и смертности являются извещения о впервые выявленных случаях ЗНО из Челябинского и Курганского онкодиспансеров, которые собираются, начиная с 1956 г. Помимо этого, информация о случаях ЗНО получена из медицинской документации клинического отделения УНПЦ РМ, выписок радиологических, цитологических, гистологических журналов Челябинского областного онкологического диспансера, из заключений ВТЭК и экспертного совета УНПЦ РМ. Идентификация случаев ЗО у членов КВУРС происходит путем пересечения регистра облученного населения, созданного в УНПЦ РМ, и данных Челябинского областного онкологического диспансера.

Демографические характеристики КВУРС

В КВУРС включены лица, родившиеся и/или проживавшие в одном из 34 населенных пунктов на территории ВУРСа в период с 29.09.1957 г. (с даты аварии) по 31.12.1959 г. (к этому времени закончены основные мероприятия по переселению жителей наиболее загрязненных населенных пунктов). В аналитическую когорту численностью 21 384 человек не включены жители населенных пунктов на территории Свердловской области (численностью около 1100 человек) по причине отсутствия постоянного доступа к информации об онкологических заболеваниях в Свердловской области. Численность когорты незначительно отличается по сравнению с предыдущими публикациями. Причиной тому является удаление из регистра УНПЦ РМ дублирующих записей, уточнение информации о местах и датах проживания членов когорты. Демографические характеристики всей КВУРС, а также когорты с исключением облученных на реке Тече (19 329 человек) представлены в таблице 1.

КВУРС на 56% представлена женщинами, преобладают лица русской национальности – 60%. Непереселенное население составляет 60%. На период начала наблюдения (на 31 декабря 1959 г.) в когорте было 75% лиц молодого возраста (до 40 лет), лиц пожилого возраста (60 лет и старше) – 9%. В когорте с исключением лиц, получивших дополнительное облучение на реке, пропорции по демографическим характеристикам практически полностью повторяют всю КВУРС.

Территория наблюдения и жизненный статус

Регистр УНПЦ РМ содержит информацию об истории проживания и жизненном статусе каждого члена когорты. Кроме того, на каждого человека имеются данные о заболеваемости и причинах смерти. Сбор информации производится непрерывно, а также происходит систематическое обновление данных регистра. Благодаря этому имеется возможность включать в анализ только те человеко-годы и те случаи смерти, когда член когорты проживал на территории наблюдения. Территория наблюдения за смертностью (ТНС) ограничена Челябинской и Курганской областями, где имела возможность полу-

Таблица 1

Распределение членов КВУРС по полу, национальности, факту переселения и возрасту на начало периода наблюдения

[Table 1]

Distribution of the East Urals Radioactive Trace cohort members by sex, ethnicity, fact of resettlement and age at the beginning of the follow-up period]

Характеристики [Characteristics]	КВУРС [EURT cohort]		КВУРС без облученных на реке Тече [EURT cohort excluding exposed on the Techa river]	
	Пол [Sex]			
	n	%	n	%
Мужчины [Male]	9489	44	8582	44
Женщины [Female]	11 895	56	10 747	56
Национальность [Ethnicity]				
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	8474	40	7837	41
Русские [Russians]	12 910	60	11 492	59
Факт переселения [Fact of resettlement]				
Переселенные [Resettled]	8494	40	8433	44
Не переселенные [Not resettled]	12890	60	10 896	56
Возраст на 31 декабря 1959 г. [Age on 31 of December 1959]				
0–1	355	2	355	2
1–19	8575	40	7804	40
20–39	7103	33	6344	33
40–59	3363	16	3017	16
60>	1988	9	1809	9
Вся когорта [Total]	21 384	100	19 329	100%

чать информацию об истории проживания и причинах смерти членов когорты с 1957 по 2014 г.

На конец периода наблюдения (31 декабря 2014 г.) о жизненном статусе членов когорты известно, что из 21 384 человек живыми остаются 4328 человек (20%), умерли 9612 человек (45%), потерянными из наблюдения являются 3270 человек (15%), мигранты – 4174 человека (20%). На 90% умерших имеются данные врачебных свидетельств о смерти с указанием причины смерти.

Структура причин смерти в КВУРС

Источником информации о причинах смерти являлись свидетельства о смерти, собираемые на ТНС. Дополнительно информация об онкологических причинах смерти могла быть получена из извещений о впервые выявленных случаях ЗНО. Всего на ТНС было зарегистрировано 1294 случая ЗО (за период наблюдения с 1957 по 2014 г.). Структура смертности от ЗО по полу представлена в таблице 2.

Таблица 2

Структура смерти от ЗО в КВУРС по полу

[Table 2]

Cancer mortality structure in EURT cohort by gender]

Рубрика МКБ-10 [ICD-10 sites]	Мужчины [Male]	%	Женщины [Female]	%	Всего [Total]	%
C00-C14 ЗО губы, ротовой полости и глотки [Lips, mouth and pharynx]	22	3,1	1	0,2	23	1,8
C15 ЗО пищевода [Esophagus]	43	6,1	41	7,0	84	6,5
C16 ЗО желудка [Stomach]	137	19,4	125	21,3	262	20,2
C17–C26 ЗО тонкого и толстого кишечника, прямой кишки, печени и других отделов брюшной полости [Intestine, rectum, liver and other parts of the abdominal cavity]	95	13,4	127	21,7	222	17,2
C30–C32 ЗО носа, гортани [Nose, larynx]	18	2,5	4	0,7	22	1,7
C33–C34 ЗО трахеи, бронхов и легкого [Trachea, bronchi, lung]	257	36,3	32	5,5	289	22,3
C37–C39 ЗО других отделов дыхательной системы [Other parts of the respiratory system]	2	0,3	2	0,3	4	0,3
C40–C49 ЗО костей и соединительной ткани [Bones and connective tissue]	7	1,0	5	0,9	12	0,9

Рубрика МКБ-10 [ICD-10 sites]	Мужчины [Male]	%	Женщины [Female]	%	Всего [Total]	%
C43 Меланома [Melanoma]	4	0,6	4	0,7	8	0,6
C44 30 кожи, не меланома [Skin, not melanoma]	3	0,4	7	1,2	10	0,8
C50 30 молочной железы [Breast]	0	0,0	53	9,0	53	4,1
C53–C54 30 матки [Uterus]	0	0,0	49	8,4	49	3,8
C51, C52, C55–C58 30 других женских половых органов [Other female genital organs]	0	0,0	75	12,8	75	5,8
C60–C62 30 мужских половых органов [Male genital organs]	23	3,2	0	0,0	23	1,8
C64–C68 30 мочевого пузыря и других органов мочевой системы [Bladder and other organs of the urinary system]	45	6,4	8	1,4	53	4,1
C73 30 щитовидной железы [Thyroid]	1	0,1	4	0,7	5	0,4
C69–C80 (кроме C73), D43* 30 других и неуточненных локализаций [Other unspecified sites]	44	6,2	43	7,3	87	6,7
Всего 30 (включая D43) [Total]	708	100,0	586	100,0	1294	100,0

В структуре смерти от 30 у мужчин в КВУРС преобладают рак трахеи, бронхов и легкого – 257 случаев (36,3%), на втором месте по частоте 30 желудка – 137 случаев (19,4%), на третьем – 30 тонкого и толстого кишечника, прямой кишки, печени и других отделов брюшной полости – 95 случаев (13,4%). У женщин лидирующими локализациями являются 30 тонкого и толстого кишечника, прямой кишки, печени и других отделов брюшной полости – 127 случаев (21,7%). Второе место по частоте у женщин занимают 30 желудка – 125 случаев (21,3%), третье – 30 матки и других женских половых органов – 124 случая (21,2%). Если рассматривать общую структуру смертности, суммируя оба пола, то самой частой локализацией являются 30 трахеи, бронхов и легкого – 289 случаев (22,3%).

Если рассмотреть структуру смерти от 30 по национальному признаку, то можно отметить, что у русского населения наиболее часто встречающимися локализациями являются: 30 трахеи, бронхов и легкого – 24,3%, желудка – 20,5%, кишечника, печени и других отделов брюшной полости – 16,6%. У татар и башкир первую строчку занимает смертность от 30 желудка – 19,3%, далее располагаются 30 трахеи, бронхов и легкого – 18,4% и 30 кишечника и печени и других отделов брюшной полости – 17,6%.

Дозы

При анализе риска смерти от 30 используются индивидуализированные дозы, рассчитанные на основе обновленной дозиметрической системы TRDS, разработанной в биофизической лаборатории УНПЦ РМ. Оценка доз, накопленных в органах и тканях, связана с историей проживания членов когорты в населенных пунктах ВУРСа и на реке Тече. Принципы расчета доз подробно описаны в работе сотрудников биофизической лаборатории и их иностранных коллег [12].

Исходя из структуры смертности в КВУРС, самыми частыми локализациями 30 являлись желудок, кишечник,

легкие. Было принято решение выбрать дозу на желудок в качестве реперной. Во всей КВУРС средняя доза на желудок составила 36 мГр, максимальная 1130 мГр. При исключении из анализа группы лиц, получившей дополнительное облучение при проживании в пунктах на реке Тече, средняя доза составила 11 мГр, максимальная – 121 мГр. Это говорит о том, что максимальные дозы получили члены когорты, получившие дополнительное облучение на реке Тече. На рисунке показано распределение членов всей КВУРС и с исключением облученных на реке по дозовым группам. Доля лиц, получивших облучение в дозе выше 100 мГр во всей КВУРС, составляет всего 9,3%, при исключении облученных на реке – 2,7%.

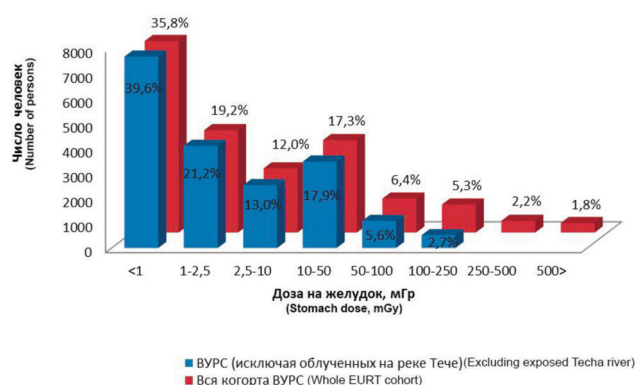


Рис. Распределение членов КВУРС по дозовым группам
[Fig. Distribution of EURT cohort members by dose groups]

Методы анализа

Для анализа риска смерти от 30 в КВУРС использовался статистический пакет EPICURE (программы DATAB и AMFIT) [13].

В DATAB была проведена стратификация всех случаев смерти от 30 по полу, национальности, факту переселе-

ния населенного пункта, возрасту на начало облучения (17 страт по 5 лет от 0 до 80 и старше), времени после облучения (по 5 лет, 0–50 лет и старше), календарным периодам (по 5 лет с 1957 по 2014 г.), по дозовым группам (9 групп от 0 до 500 мГр и выше), году рождения когорты (до 1932 г. и после). Стратификация была проведена для латентных периодов в 0, 2, 5, 10, 15 лет.

В программе AMFIT пакета EPICURE был проведен многофакторный анализ зависимости смертности от радиационных и не связанных с облучением факторов. Тестированием различных моделей в программе была определена форма зависимости риска смерти от дозы. Для оценки риска смерти от ЗО в КВУРС использовалась простая параметрическая модель избыточного относительного риска (ИОР) на базе Пуассоновского распределения в виде:

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

где a – достигнутый возраст, d – доза (Гр), z_0 – факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0), z_1 – факторы, которые могут модифицировать ИОР.

Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа $\rho(d)$ на функцию модификации эффекта ($\varepsilon(z_1)$).

Статистическая значимость и доверительные интервалы определялись методом максимального правдоподобия, результат считался значимым при вероятности ошибки менее 5%.

Результаты и обсуждение

Зависимость смертности от характеристик, не связанных с облучением

Для оценки зависимости базовых уровней смерти от ЗО в КВУРС от характеристик, не связанных с радиационным воздействием, в программе AMFIT были протестированы несколько переменных: пол, национальность, календарный период (до 1986 г. и после), год рождения членов когорты (до 1932 года и после), факт переселения, поло-специфичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма. Тестирование проводилось как для всей КВУРС, так и для когорты с исключением облученных на реке Тече.

В итоговую модель для всей КВУРС были включены статистически значимые переменные: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), факт переселения ($p = 0,03$), календарный период ($p = 0,01$), поло-специфичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма ($p < 0,001$). Для когорты с исключением получивших дополнительное облучение на реке в итоговую модель были включены: пол ($p < 0,001$), национальность ($p < 0,001$), календарный период ($p = 0,007$), поло-специфичная степенная зависимость от достигнутого возраста в виде логарифма и квадрата логарифма ($p < 0,001$).

Зависимость смертности от дозы

При анализе было протестировано несколько латентных периодов после радиационного воздействия (0, 2, 5, 10, 15 лет). Необходимость этого связана с отсроченностью реализации случаев ЗО после радиационного облучения. В ходе тестирования различных латентных периодов с использованием линейной зависимости эффекта от дозы получены почти идентичные значения ИОР (0,05–0,06 на 100 мГр) с почти равной статистической значимостью ($p = 0,03$ –0,04) в разных латентных периодах. При исключении из КВУРС облученных на реке Тече величина ИОР была положительной, но статистически не значимой во всех латентных периодах, что связано с исключением лиц, получивших наиболее значительные дозы в когорте. Это приводило к снижению значимости эффекта. В таблице 3 представлены величины ИОР смерти от ЗО во всей КВУРС и в когорте с исключением облученных на реке.

При использовании линейной модели и 5-летнего латентного периода число избыточных случаев за весь период наблюдения, связанных с радиационным воздействием, составило 30, что составляет 2,4% от всех случаев ЗО в КВУРС на территории наблюдения.

Модификация дозового ответа

Для линейной модели с 5-летним латентным периодом была оценена модификация дозового ответа факторами, не связанными с облучением (пол, национальность, возраст на начало облучения, достигнутый возраст, календарный период). Модификация данными факторами

Таблица 3

Величины ИОР смерти от ЗО в КВУРС и когорте с исключением облученных на реке Тече

[Table 3]

ERR values of cancer mortality in the EURT cohort and in the cohort with the exclusion of exposed members on the Tеча river]

Параметры [Parameters]	КВУРС [EURT cohort]	Когорта без лиц, облученных на реке Тече [cohort with the exclusion of exposed members on the Tеча river]
ИОР/100 мГр [ERR/100 mGy]	0,05	0,18
95% ДИ [95% CI]	0,002; 0,10	-0,01; 0,54
P	0,04	0,23
Избыточные случаи [Excess cases]	30	22
Атрибутивный риск, % [Attributive risk]	2,4%	2,04%
Средняя доза, мГр [Mean dose, mGy]	36	11
Максимальная доза, мГр [Maximum dose, mGy]	1130	121

оценена как для всей КВУРС, так и для когорты с исключением облученных на реке Тече (табл. 4).

Для обеих когорт не выявлено значимой модификации дозовой зависимости риска смерти от факторов, не связанных с радиационным воздействием. В КВУРС были обнаружены тенденции к более высоким значениям ИОР на единицу дозы у татар и башкир по сравнению с русскими и у лиц, достигших 70-летнего возраста, относительно 50-летних. Кроме того, отмечаются тенденции к более высокому риску смерти от ЗО после 1990 г., чем в период с 1957 по 1990 г. Однако все эти различия статистически не значимы. Исключение из анализа лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече, приводит к существенному снижению статистической значимости и отрицательным (или неопределенным) значениям нижней границы доверительного интервала. Отсутствие четкой зависимости риска смерти от ЗО от факторов, не связанных с облучением, по-видимому, связано с небольшим количеством случаев ЗО при распределении их по группам.

Заключение

Данная работа, посвященная исследованию риска смерти от ЗО среди населения, облученного на ВУРСе, является продолжением многолетних исследований УНПЦ РМ в сфере изучения радиационных эффектов на здоровье населения загрязненных районов Челябинской области. Первые аналитические исследования, посвященные риску смерти [9] и заболеваемости [10] ЗО у населения ВУРСа с использованием индивидуализированных органоспецифических доз, были проведены в эпидемиологической лаборатории УНПЦ РМ в 2014 и 2017 гг.

соответственно. Период наблюдения в анализе смерти был ограничен 50-летним промежутком (1957–2006 гг.), заболеваемости – 53-летним (1957–2009 гг.). В обоих исследованиях были получены статистически значимые риски (ИОР смерти был равен 0,07/100мГр, 95% ДИ: 0,006–0,14, $p=0,03$; ИОР заболеваемости – 0,05/100 мГр, 90% ДИ: 0,003–0,1, $p=0,08$). В анализ смерти были включены 1039 случаев смерти от ЗО на территории наблюдения, в анализ заболеваемости – 1426 случаев.

В 2020 г. проведен анализ заболеваемости в КВУРС с увеличенным до 57 лет периодом наблюдения (1957–2014 гг.) [11], включающий 1609 случаев заболеваний ЗО на территории наблюдения. Благодаря увеличению периода наблюдения (на 4 года по сравнению с предыдущим анализом заболеваемости ЗО) и увеличению количества случаев ЗО удалось достичь улучшения достоверности результатов ($p=0,02$ по сравнению с $p=0,08$ в исследовании 2017 г.). ИОР заболеваемости был равен 0,05/100 мГр (95% ДИ 0,01–0,10, $p=0,02$). Помимо этого, в последнем исследовании была установлена связь риска заболеваемости ЗО в КВУРС с дополнительной дозой, полученной группой лиц в КВУРС, которые до аварии 1957 г. проживали в населенных пунктах на реке Тече. При исключении этих людей из анализа риск становится статистически не значимым.

В данной работе исследовался риск смерти от ЗО у населения ВУРС в когорте той же численностью (21 384 человека), период наблюдения составил также 57 лет (1957–2014 гг.). Всего было проанализировано 1294 случая смерти от ЗО в когорте. Полученный достоверный риск смерти от ЗО во всей КВУРС, равный 0,05/100 мГр (95% ДИ 0,002–0,10; $p=0,04$), который сопоставим не

Оценка модификации дозовой зависимости смертности от ЗО факторов, не связанных с облучением

Таблица 4

[Table 4]

Cancer mortality ERR modification by factors unrelated to exposure]		
Параметры [Parameters]	ИОР /100 мГр [ERR/100 mGy]	
	КВУРС [EURT cohort]	Исключая облученных на реке Тече [cohort with the exclusion of exposed members on the Techa river]
Пол [Sex]		
Мужчины [Male]	0,05 (-0,02; 0,12)	0,1 (-0,23; 0,53)
Женщины [Female]	0,05(-0,01; 0,14)	0,3 (-0,10; 0,80)
Национальность [Ethnicity]		
Русские [Russians]	0,04 (-0,01; 0,1)	0,31 (-0,23; 1,03)
Татары/башкиры [Tatars/Bashkirs]	0,1 (-0,01; 0,31)	0,15 (-0,13; 0,50)
Возраст к началу облучения [Age at exposure]		
10 лет [10 year]	0,04 (0,0006; 0,12)	0,17 (nf*; 0,57)
40 лет [40 years]	0,05 (0,0003; 0,11)	0,21 (nf; 0,61)
Достигнутый возраст [Attained age]		
50 лет [50 years]	0,02 (0,0003; 0,09)	0,14 (nf; 0,48)
70 лет [70 years]	0,06 (0,01; 0,20)	0,26 (nf; 0,66)
Календарный период [Calendar period]		
До 1990 г. [Before 1990]	0,02 (-0,04; 0,09)	-0,11 (-0,44; 0,34)
После 1990 г. [After 1990]	0,1 (0,01; 0,2)	0,30 (-0,04; 0,74)

*nf (not found) – граница доверительного интервала не может быть точно вычислена программой

только с риском заболеваемости в этой же когорте, но и с рисками смерти и заболеваемости, полученными в исследованиях в когорте реки Течи (КРТ). В КРТ риск смерти от ЗО статистически значим с ИОР, равным 0,06/100 мГр (95% ДИ: 0,004–0,13) [14], риск заболеваемости ЗО также значимый с ИОР, равным 0,08/100 мГр (95% ДИ: 0,01–0,15) [15].

Как и в анализе заболеваемости ЗО в КВУРС [11], при исключении из анализа смертности лиц, получивших дополнительное облучение до аварии 1957 г. в прибрежных селах на реке Тече (2055 человек, получивших максимальные дозы в КВУРС), риск смерти остается положительным, но становится незначимым (ИОР равен 0,18/100 мГр, 95% ДИ -0,01–0,54; $p=0,23$).

Для увеличения статистической силы в дальнейшем планируется проведение анализа рисков смерти и заболеваемости ЗО, а также нераковых эффектов в объединенной когорте, облученных на Южном Урале [16], включающее в себя население из КРТ и КВУРС. Когорта численностью около 63 000 человек позволит увеличить статистическую значимость исследований, посвященных ситуациям, в которых население облучилось в диапазоне малых и средних доз. Это позволит оценить органоспецифические риски возникновения ЗНО, эффекты облучения в различных возрастных группах и в различные периоды времени. Кроме того, наличие такой когорты даст возможность оценить влияние постнатальной, внутриутробной и гонадной доз.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу биофизической лаборатории УНПЦ РМ под руководством М.О. Дегтевой за расчет индивидуализированных доз для членов КВУРС, а также сотрудникам отдела «База данных «Человек»» под руководством Н.В. Старцева за активное участие в сборе информации о жизненном статусе членов КВУРС.

Литература

- Аклеев А.В., Киселев М.Ф. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. М.: Вторая типография ФУ «Медбиоэкстрем», 2001. 531 с.
- Аклеев А.В., Аклеев А.А., Андреев С.С. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
- Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., и др. Здоровье населения, проживающего на радиоактивных территориях Уральского региона. М.: РАДЭКОН, 2001. 195 с.
- Аклеев А.В., Киселев М.Ф. Восточно-Уральский радиоактивный след (сборник статей, посвященных последствиям аварии 1957 г. на ПО «Маяк»). Челябинск, 2012. 352 с.
- Булдаков Л.А. Медицинские последствия радиационной аварии на Южном Урале в 1957 г. // Медицинская радиология. 1990. Т. 35, № 12. С. 11–16.
- Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 г. на ПО «Маяк» / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: ФУ «Медбиоэкстрем» при Минздраве РФ, 2001. 294 с.
- Kostyuchenko V.A., Krestinina L.Yu. Long-term irradiation effects in the population evacuated from the East Urals radioactive trace area // Science Total Environment. 1994. Vol. 142. P. 119–125.
- Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Онкологическая смертность при хроническом воздействии малых и средних доз облучения в когорте лиц, облученных на ВУРС // Бюллетень сибирской медицины. 2005. Т. 4, № 2. С. 36–44.
- Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Епифанова С.Б. Анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за 50-летний период // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 23–29.
- Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Толстых Е.И., Епифанова С.Б. Анализ риска заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у населения, облучившегося на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа за период с 1957 по 2009 г. // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 36–46.
- Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями у облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа населения за 1957–2014 гг. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 4. С. 58–64. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64
- 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.
- Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
- Schonfeld S.J., Krestinina L.Yu., Epifanova S.B., et al. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950–2007) // Radiation Research. 2013. Vol. 179, No. 2. P. 183–189. DOI: 10.1667/RR2932.1.
- Davis F.G., Krestinina L.Yu., Preston D., et al. Solid cancer incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007 // Radiation Research. 2015. Vol. 184. P. 56–65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
- Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 3. С. 393–402.

Поступила: 16.11.2021 г.

Силкин Станислав Сергеевич – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ssilkin@urcrm.ru

Крестинина Людмила Юрьевна – кандидат медицинских наук., заведующая эпидемиологической лабораторией 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: Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Аклеев А.В. Восточно-Уральский радиоактивный след: смертность от злокачественных опухолей за 57-летний период (1957–2014 гг.) // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 27-35. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-27-35

East Ural Radioactive Trace: cancer mortality over a 57-year period (1957–2014)

Stanislav S. Silkin, Lyudmila Yu. Krestinina, Alexander V. Akleyev

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

The objective of the current study was to assess the cancer mortality risk in the cohort of the exposed population on the territory of the East Urals Radioactive Trace over a 57-year follow-up period from 1957 to 2014 using individual doses. Materials and methods: At the end of September 1957 as a result of an accident in the cooling system of storage tanks with liquid radioactive waste, an explosion occurred on the territory of the Mayak PA which led to the formation of the East Urals Radioactive Trace. The population living in the contaminated settlements of the Chelyabinsk and Sverdlovsk regions has been affected by prolonged external and internal exposure. The cohort of individuals exposed in the territory of the East Urals Radioactive Trace numbers 21,384 people, of whom 2,055 persons had lived in Techa riverside settlements before the 1957 accident and received additional radiation exposure. The mean stomach dose for members of the East Urals Radioactive Trace cohort was 36 mGy, the maximum dose was 1130 mGy. The updated TRDS-2016 dosimetry system was used to assess individualized doses. Over the 57-year follow-up period of the cohort (1957–2014), 1294 deaths from cancer were registered in the catchment area. The number of person-years at risk was 511278. The analysis of the cancer mortality risk was carried out with the EPICURE statistical package using the Poisson regression method. Confidence intervals were calculated using the maximum likelihood method. Results: In the course of the cancer mortality analysis in the East Urals Radioactive Trace cohort over a 57-year period, a statistically significant excess relative risk of mortality per 100 mGy equal to 0.05 (95% CI: 0.002; 0.11, $p = 0.04$) was obtained in the entire East Urals Radioactive Trace cohort. If individuals who received additional exposure on the Techa River were excluded from the analysis, the value of the risk loses its statistical significance.

Key words: East Urals Radioactive Trace, East Urals Radioactive Trace cohort, cancer, excess relative risk of mortality, radiogenic mortality risk.

References

1. Akleyev AV, Kiselev MF. Medical-biological impacts of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 531 p. (In Russian).
2. Akleyev AV, Akleev AA, Andreev SS. Consequences of radioactive contamination of the Techa River. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health. Chelyabinsk: Kniga; 2016. 390 p. (In Russian).
3. Akleyev AV, Kosenko MM, Krestinina LYu, Shalaginov SA, Degteva MO, Startsev NV. Health status of population exposed to environmental Contamination in the Southern Urals. Moscow: Radekon Publ.; 2001. 195 p. (In Russian).
4. East-Urals radioactive trace. Eds.: A.V. Akleyev, M.F. Kiselev. Chelyabinsk: «Fregat»; 2012. 352 p. (In Russian).
5. Buldakov LA, Demin SN, Kosenko MM, Kostyuchenko VA, Koshurnikova NA, Krestinina LY, et al. Medical consequences of the radiation accident in the Southern Urals in 1957. *Meditsinskaya radiologiya = Medical Radiology*. 1990; 35(12): 11–16. (In Russian).
6. Akleyev AV, Kiselev MF, Eds. Ecological and health effects of the radiation accident of 1957 at the Mayak PA. Moscow: Medbioextrem, Russian Ministry of Health; 2001. 290 p. (In Russian).
7. Kostyuchenko VA, Krestinina LYu. Long-term irradiation effects in the population evacuated from the East Urals radioactive trace area. *The Science of the Total Environment*. 1994;142: 119–125.
8. Krestinina LYu, Akleev AV. Cancer mortality under chronic exposure of low and moderate radiation doses in the cohort of persons who were exposed due to the EURT. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2005;4(2): 36–44. (In Russian).
9. Krestinina LYu, Silkin SS, Epifanova SB. Analysis of solid cancer mortality risk for the population exposed in the territory of East-Urals radioactive trace over a 50-year period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014; 7(1): 23–29. (In Russian).
10. Silkin SS, Krestinina LYu, Tolstykh EI, Epifanova SB. Analysis of solid cancer incidence risk among the population exposed in the East Urals Radioactive Trace over 1957–2009. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 36–46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-36-46
11. Silkin SS, Krestinina LYu, Akleev AV. Solid Cancer Incidence Risk among the Population Exposed in the East Urals

Stanislav S. Silkin

Ural Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: 68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru

- Radioactive Trace over 1957–2014. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and radiation safety*. 2020;4: 58-64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2020-65-4-58-64>.
12. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, 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.
 13. Preston DL, Lubin JH, Pierce DA, McConney ME. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation; 1993.
 14. Schonfeld SJ, Krestinina LYu, Epifanova SB, et al. Solid cancer mortality in the Techa River Cohort (1950-2007). *Radiation Research*. 2013;179(2): 183-189. DOI: 10.1667/RR2932.1.
 15. Davis FG, Yu KL, Preston D, et al. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956–2007. *Radiation Research*. 2015;184: 56–65.
 16. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev VN, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).

Received: November 16, 2021

For correspondence: Stanislav S. Silkin – Researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (68A Vorovsky street, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru)

Lyudmila Yu. Krestinina – Candidate of Medical Sciences, Head, 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

For citation: Silkin S.S., Krestinina L.Yu., Akleyev A.V. East Ural Radioactive Trace: cancer mortality over a 57-year period (1957-2014). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 27-35. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-27-35

Связь распространённости заболеваний щитовидной железы с дозой облучения у лиц, переселённых с радиоактивно загрязнённых территорий Южного Урала

Е.И. Рабинович¹, С.В. Поволоцкая¹, М.О. Дегтева², Е.И. Толстых²

¹ Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Челябинская область, Россия

² Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Целью работы является выявление связи между распространённостью тиреопатологии и поглощенной дозой в щитовидной железе от ^{131}I среди лиц, переселённых в г. Озерск с радиоактивно загрязнённых территорий Южного Урала. Источниками для статистического анализа явились электронные базы данных «Щитовидная железа» Южно-Уральского института биофизики, содержащая клинично-лабораторные данные, и «Человек и окружающая среда» Уральского научно-практического центра радиационной медицины, содержащая дозиметрические данные. У 195 человек, переселённых в г. Озерск в разные сроки из сел побережья реки Течи и территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, были сопоставлены индивидуальные дозы облучения от всех источников ионизирующего излучения и случаи заболеваний щитовидной железы. Статистический анализ данных проводили с использованием пакета прикладных программ (табличный процессор Excel, Statistica 6.1). Выявлена дозовая зависимость распространённости тиреоидной патологии: частота узловых доброкачественных образований, опасных в плане малигнизации, в щитовидной железе женщин-переселенцев была статистически значимо увеличена в 1,7 раза ($p=0,03$) в интервале тиреоидных доз 1000–1499 мГр и в 2 раза ($p=0,003$) в интервале доз 1500–1999 мГр по сравнению с распространённостью тиреопатологии при дозах до 1000 мГр. В диапазоне тиреоидных доз 1500–1999 мГр была также повышена распространённость всех заболеваний щитовидной железы в 1,5 раза ($p=0,007$). Возрастание распространённости заболеваний щитовидной железы в 1,6 раза ($p=0,02$) относительно необлучённых лиц отмечено только для женщин-переселенцев, возраст которых на момент обследования был менее 60 лет. Значительное количество факторов риска, оказывавших влияние на формирование дозы облучения щитовидной железы и развитие тиреопатологии, вызывает необходимость использования многофакторного статистического анализа для оценки вклада каждого из них в развитие патологии щитовидной железы у лиц, проживавших на радиоактивно загрязнённых территориях.

Ключевые слова: радиоактивно загрязнённые территории, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след, ^{131}I , переселенцы, заболевания щитовидной железы.

Введение

Интерес к отдалённым неопухолевым последствиям радиационного воздействия на щитовидную железу (ЩЖ) не исчерпан, несмотря на масштабные исследования последних 30 лет. Распространённость патологии ЩЖ исследовали после внешнего γ -облучения в ходе диагностических и лечебных процедур [1]; у лиц, переживших атомную бомбардировку [2]; подвергшихся воздействию β -излучения ^{131}I в составе штатных газо-аэрозольных выбросов ядерного центра в Хенфорде (США) [3], Производственного объединения (ПО) «Маяк» [4]; в результате аварии на АЭС в Чернобыле [5]. Наиболее сложным и малоизученным является вопрос о распрос-

транённости тиреопатологии (ТП) у лиц, проживавших на территориях Южного Урала, загрязнённых радионуклидами вследствие радиационных инцидентов на ПО «Маяк»: сбросов жидких радиоактивных отходов в реку Течу в 1949–1956 гг. и аварии 1957 г. с образованием Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС).

Население радиоактивно загрязнённых территорий (РЗТ) вокруг ПО «Маяк» подверглось комплексному внешнему и внутреннему радиационному воздействию. Потребление воды и местных продуктов питания приводило к внутреннему облучению от радионуклидов, инкорпорированных в органы и ткани. Облучение ЩЖ происходило, главным образом, в результате ^{131}I -содержащих

Рабинович Евгения Израиловна

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456780, Россия, г.Озерск, Челябинская область, Озерское шоссе, 19; E-mail: rei-06@mail.ru

газо-аэрозольных выбросов ПО «Маяк», которые были особенно велики в начальный период работы предприятия. Выбросы ^{131}I в период 1948–1957 г в среднем превышали 10^{15} Бк/год, при этом максимум приходился на 1949–1951 гг. и составлял 10^{16} Бк/год [6]. Загрязнение реки Течи в 1949–1956 гг. привело к дополнительному облучению ЩЖ жителей прибрежных сел за счет поступления ^{137}Cs с водой и молоком [7]. Основным источником внешнего облучения ЩЖ для жителей РЗТ были почвы, загрязненные гамма-излучающими радионуклидами в результате паводков на реке Тече и радиоактивных выпадений на ВУРС. Сведения об отдаленных эффектах со стороны ЩЖ в связи с проживанием на РЗТ немногочисленны. Снижение минеральной плотности костной ткани было обнаружено у жителей, проживающих на РЗТ Уральского региона, что связывают с влиянием облучения ^{131}I на щитовидную и паращитовидную железы, осуществляющие регуляцию кальция в организме [8]. Обнаружено статистически значимое повышение риска развития одноузлового зоба у лиц, переселенных с РЗТ относительно необлученных лиц [9]. В обеих работах не проводилось сопоставления с дозами облучения.

В Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ) в сотрудничестве с зарубежными коллегами была проведена реконструкция индивидуальных поглощенных доз облучения ЩЖ в Уральской когорте аварийного облученного населения (УКАОН), которая объединяет лиц, подвергшихся хроническому облучению на реке Тече и на ВУРС [6]. Дозы на ЩЖ от ^{131}I были оценены на основании данных по газо-аэрозольным выбросам с 1948 по 1972 гг., предоставленных специалистами ПО «Маяк» в рамках Российско-американского проекта 1,4 [10]. Результаты расчетов показали, что 80% суммарной дозы, накопленной в ЩЖ у членов УКАОН, обусловлено поступлением ^{131}I из газо-аэрозольных выбросов [6]. При этом уровни индивидуальных доз существенно снижались с увеличением расстояния места проживания человека от ПО «Маяк». Также было отмечено, что дозы облучения ЩЖ людей, которые были детьми в период наибольших выбросов, в 3–4 раза выше по сравнению с взрослыми людьми [6].

Цель исследования - выявление связи между распространенностью ТП и дозой облучения ЩЖ среди лиц, переселенных в г. Озерск с радиоактивно загрязненных территорий Южного Урала.

Материалы и методы

Источниками для анализа клинико-лабораторных и дозиметрических данных явились зарегистрированные в Роспатенте Базы данных (БД) «Щитовидная железа» ЮУриБФ и «Человек и окружающая среда» УНПЦ РМ. Из БД «Щитовидная железа» было отобрано 265 человек, переселенных в разные сроки с РЗТ Южного Урала в г. Озерск (далее – переселенцы). Переселение жителей с побережья реки Течи и территории ВУРС происходило, начиная с 1956 г. и 1957 г. соответственно. Персональные данные

переселенцев были сопоставлены с УКАОН, в результате чего было идентифицировано 195 человек, для которых в БД УНПЦ РМ имеется детальная информация по истории проживания на РЗТ и индивидуальных дозах облучения. Система расчета доз основывалась на разработанных коллегам из США моделях переноса йода в окружающей среде и его перехода по пищевым цепочкам [11, 12]. Расчет доз облучения ЩЖ от поступивших в организм радионуклидов проводился с использованием зависящих от возраста человека дозовых коэффициентов из Публикации 67 МКРЗ [13]. Также учитывали дозу облучения ЩЖ, полученную в период внутриутробного развития, для этой цели использовались коэффициенты из Публикации 88 МКРЗ [14]. Индивидуальные дозы, полученные за счет проживания на реке Тече и территории ВУРС, рассчитывались по дозиметрической системе TRDS-2016, разработанной в УНПЦ РМ [15]. Для статистического анализа были использованы результаты тиреоидного обследования идентифицированных лиц, содержащиеся в БД «Щитовидная железа» ЮУриБФ. Скрининг ТП проводился в 2013–2014 гг. согласно Методическим рекомендациям¹, формализованный протокол которых включал физикальные, лабораторные и инструментальные исследования с последующей постановкой клинического диагноза. Идентификацию нозологических форм тиреоидной патологии проводили согласно МКБ-9. Для выявления зависимости распространенности ТП от возраста были привлечены имеющиеся в БД результаты обследования группы необлученных лиц, состоящей из 55 индивидуумов, приехавших в г. Озерск в возрасте старше 15 лет из местностей, не загрязненных радионуклидами. Статистический анализ данных проводили с использованием пакета прикладных программ (табличный процессор Excel, Statistica 6.1). Описательная статистика включала среднее арифметическое значение (M), ошибку средней величины (m). Для сравнения количественных показателей использовали t -критерий Стьюдента. Дисперсионный анализ проводили с использованием t -критерия Стьюдента и теста Альтхэм [16] при уровне значимости $p < 0,05$. Анализ статистической значимости факторов риска выполняли при помощи вычисления отношения шансов (ОШ) и доверительного интервала (ДИ) [17]. Различия считали достоверными при уровне значимости соответствующего статистического критерия $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

В состав анализируемой группы переселенцев (195 человек) входили 43 человека, облученных в прибрежных селах реки Течи (22%), 108 человек с территории ВУРС (55,4%) и 44 человека (22,6%), облученных и на Тече, и на ВУРС. Для анализа последние из перечисленных были присоединены к подгруппам в зависимости от населенного пункта первоначального радиационного воздействия. Таким образом, численность группы, проживавшей на побережье реки Течи составила 84 (43%), на территории ВУРС – 111 (57%) человек (табл. 1). Более 70% переселенных лиц проживали на расстоянии от 7 до 20 км от ПО «Маяк». Все переселенцы к моменту начала газо-аэрозольных ^{131}I -содержащих выбро-

¹ МР 12.06-04. Организация целевого обследования щитовидной железы после техногенного облучения в детском возрасте. – М.: ФМБА России. 2004. 31 с [MU 12.06-04. Organization of targeted examination of the thyroid gland after technogenic exposure in childhood. Moscow: FMBA of Russia; 2004. 31 p. (In Russ.)]

сов были в возрасте, не превышающем 10 лет. Соотношение женщины/мужчины в группе составило 2,8:1 (144 женщины и 51 мужчина). Этнический состав представлен славянами (русские и украинцы – 59,5%) и тюрками (башкиры и татары – 40,5%). На момент обследования средний возраст составлял $62 \pm 0,4$ лет, при этом 35% составляли лица в возрасте от 50 до 60 лет, 65% – в возрасте старше 60 лет. В процессе клинико-лабораторного скрининга было выявлено 115 индивидуумов с ТП (59%), из них 99 женщин и 16 мужчин. Всего было диагностировано 122 заболевания, среди них диффузные (неузловые) формы (диффузный зоб, аутоиммунный тиреоидит) и узловые формы (узловой/многоузловой зоб, рак щитовидной железы). Почти в 69% случаев заболевания были обнаружены впервые. В структуре ТП доминирующее место занимали узловые зобы. Оба случая рака ЩЖ (2,4%), выявленные до скрининга, были диагностированы в подгруппе женщин, переселенных с побережья реки Течи. Найденные половые различия в распространенности заболеваний ЩЖ в группе (66,7%

среди женщин и 31,4% среди мужчин) являются известным фактом [9]. Ввиду малой численности группы мужчин и низкой частоты в ней заболеваний ЩЖ анализ связи между дозой облучения ЩЖ и развитием ТП проводили только среди женщин.

Средняя накопленная доза облучения ЩЖ по группе составила 1140 мГр. Различия между мужчинами и женщинами по уровню дозовой нагрузки на ЩЖ были незначительными (табл. 1). Дозы у переселенцев, чей возраст на момент скрининга не превышал 60 лет, были наименьшими (290 мГр). У переселенцев, достигших 60 лет и более, дозы были в 4–6 раз выше. При проживании на побережье реки Течи сформировалась в 2 раза большая доза облучения по сравнению с проживанием на территории ВУРС.

У большей части переселенцев (61%) дозы облучения ЩЖ относились к области «малых» (10–99 мГр) и «средних» (100–1000 мГр) доз (табл. 2) [18]. Высокие дозы (от 1000 мГр и выше) получили около 39% переселенцев.

Таблица 1

Накопленные дозы облучения ЩЖ переселенцев (мГр) в зависимости от некоторых факторов риска развития ТП

[Table 1]

Thyroid doses (mGy) accumulated by relocated individuals in relation to some risk factors of thyroid pathology]

Параметры [Parameters]	Группы [Groups]	n	%	Накопленная доза на ЩЖ [Thyroid accumulated dose] M ± m
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]		51	26,2	1070±240
Женщины [Female]		144	73,8	1180±110
Возраст на дату обследования, лет [Age of examination, years]				
70–77,0	1	24	12,3	1180±200*
60–69,9	2	103	58,2	1700±170*
50–59,9	3	68	34,9	290±40
Место проживания до переселения в г. Озерск [Place of residence prior to relocation into Ozyorsk]				
Побережье реки Течи [Techa riverside]		84	43,0	1620±200*
Территория ВУРС [EURT territory]		111	57,0	790±80

Статистически значимые различия между группами: * – 1 и 3, * – 2 и 3, * – 1 и 2, * – между местами проживания ($p < 0,05$).

[The statistically significant differences between the groups: * – 1 vs 3, * – 2 vs 3, * – 1 vs 2, * – Techa riverside vs EURT territory ($p < 0.05$)]

Таблица 2

Распределение переселенцев по интервалам доз радиационного воздействия (мГр) на ЩЖ

[Table 2]

Distribution of relocated individuals by the intervals of thyroid doses (mGy)]

Интервалы тиреоидных доз [The intervals of thyroid doses]	Средняя доза [Average dose] (M±m)	Общее число человек [Total number of persons]	Доля [Proportion] %
10–99	50±3	39	20,0
100–499	240±20	42	21,5
500–999	730±20	38	19,5
1000–1999	1390±40	45	23,1
2000–3999	2920±110	21	10,8
4000–7070	5420±580	10	5,1
10–7070	1140±100	195	100

Как видно из таблицы 3, средние дозы в группах лиц, родившихся до начала больших выбросов ^{131}I или в самом их начале (1940–1951 гг.), составляли от 710 до 3030 мГр, при этом максимальные дозы наблюдались для лиц 1947–1948 гг. рождения, что согласуется с динамикой атмосферных выбросов ^{131}I ПО «Маяк» [6,19]. В группе людей 1952–1960 гг. рождения дозы облучения ЩЖ варьировали от 30 до 590 мГр, это определялось более низкими уровнями поступления ^{131}I .

Следует отметить, что вариабельность средне-групповых значений доз объясняется различиями в расстоянии мест проживания конкретных людей от источника выбросов и в длительности проживания на РЗТ. Для формирования дозы в ЩЖ существенное значение имеет возраст на момент облучения, причем накопление радиоактивного йода имеет обратную связь с возрастом ребенка [20, 21]. Объем ЩЖ у новорожденных чрезвычайно мал, по разным данным от 0,4 см³ до 1,3 см³, после рождения постепенно увеличивается, составляя к 15 годам 9–11 см³ [22,23]. Повышенная радиочувствительность ЩЖ в детстве обусловлена интенсивной функциональной активностью железы и высокой потребностью в йоде для синтеза тиреоидных гормонов. Онтогенетическими периодами наиболее интенсивной концентрации ^{131}I в ЩЖ являются внутриутробный, «молочный» (от рождения до 3 лет) и пубертатные периоды, в которых поглощенная доза в ЩЖ ребенка может во много раз превосходить значения, наблюдаемые у взрослого человека [20]. Соответственно этому, для детского возраста дозовые коэффициенты на единицу поступления ^{131}I имеют максимальные значения [13].

Нам представляется, что на кривой зависимости дозы от года рождения женщин, представленной на рисунке 1, можно выделить 3 кластера, отличающихся по ряду характеристик. Так, первый кластер объединяет женщин (n=31), рожденных в 1940–1945 гг. еще до выбросов ^{131}I , к началу облучения их возраст составил от 3 до 9 лет; объем ЩЖ – примерно 1/6 от объема ЩЖ взрослого человека (табл. 4). Второй кластер включает 59 женщин 1946–1951 гг. рождения, формирование дозы у которых начиналось в «молочном» периоде детства (до 3 лет);

объем ЩЖ у детей этого возраста был критически мал, а накопленные дозы облучения – максимально высокими, 35,6% женщин имели дозы свыше 2000 мГр, в то время как среди женщин первого временного кластера такими дозами характеризовалось только 16% индивидуумов.

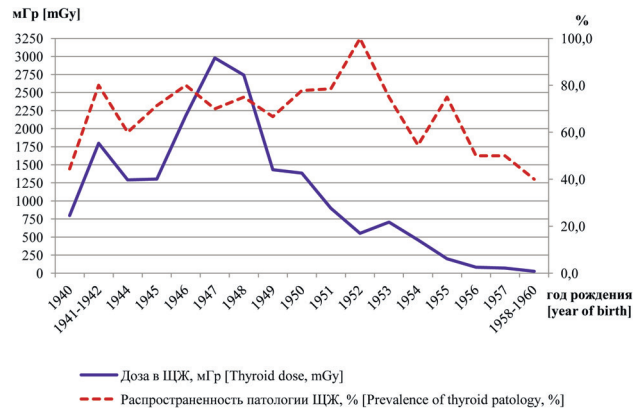


Рис. 1. Зависимость накопленных средних доз в ЩЖ (мГр) и распространенности тиреопатологии (%) от года рождения у переселенных женщин

[Fig. 1. The dependence of average thyroid doses and the prevalence of thyroid pathology on the year of birth in relocated females]

Третий кластер представлен 54 женщинами 1952–1960 гг. рождения (см. табл. 4, рис. 1). Несмотря на то, что облучение на начальном этапе у этих женщин приходилось также на период новорожденности и младенчества, ни у одной из них ЩЖ не была облучена в дозе выше 1500 мГр, средняя тиреоидная доза была почти в 3 раза ниже 1000 мГр. Это отражает падение радиационной нагрузки, обусловленное улучшением радиационной обстановки в зоне влияния ПО «Маяк»: к 1958 г. выбросы снизились в 1000 раз [6], существенно уменьшились дозы облучения от радионуклидов в населенных пунктах по реке Тече, увеличились темпы переселения жителей на незагрязненные

Таблица 3

Накопленные средние дозы радиационного воздействия на ЩЖ обследованных переселенцев (195 чел.) в зависимости от года рождения

[Table 3]

Accumulated average thyroid doses (mGy) in examined relocated individuals (n=195) by the year of birth

Год рождения [Year of birth]	Число лиц [Number of persons]	Доза в ЩЖ [Thyroid dose] M±m	Год рождения [Year of birth]	Число лиц [Number of persons]	Доза в ЩЖ [Thyroid dose] M±m
1940	10	730±180	1950	11	1330±350
1941	9	2000±340	1951	18	860±150
1942	5	830±360	1952	16	420±150
1943	2	710±310	1953	9	590±55
1944	5	1290±350	1954	17	490±80
1945	10	1750±510	1955	15	180±40
1946	5	2180±900	1956	9	80±20
1947	13	2930±620	1957	5	65±20
1948	16	3030±550	1958–60	7	30±5
1949	13	1310±240	1940–1960	195	1140±100

Таблица 4

Некоторые характеристики группы женщин-переселенцев (n=144)

[Table 4]

Some characteristics of relocated females (n=144)]

Год рождения [Year of birth]	Число женщин-переселенцев [Number of relocated females]	К началу воздействия ¹³¹ I [By the beginning of ¹³¹ I exposure]		Возраст на дату обследования, лет [Age of examination, year], M±m	Средняя доза в ЩЖ, мГр [Average thyroid dose, mGy], M±m
		Возраст *, лет [Age*, year], M±m	Объем ЩЖ*, см ³ [Thyroid volume*, cm ³]		
1940	9	9±0,1	3,70	72±0,1	800±180
1941	7	8±0,1	3,70	71±0,1	2090±400
1942	3	7±0,2	3,34	71±0,6	1120±530
1944	5	5±0,1	2,20	68±0,2	1290±350
1945	7	4±0,1	1,56	67±0,1	1300±320
1940–1945	31	7±0,4	1,56–3,70	70±0,4	1320±160
1946	5	3±0,1	1,47	66±0,2	2180±900
1947	10	2±0,1	1,13	65±0,2	2980±630
1948	12	1±0,1		64±0,2	2740±475
1949	9	0		63±0,1	1430±330
1950	9	0		62±0,2	1390±430
1951	14	0		61±0,1	900±180
1946–1951	59	1±0,1		63±0,2	1890±210
1952	10	0		60±0,2	550±230
1953	4	0		59±0,3	710±250
1954	11	0		58±0,2	460±110
1955	12	0	1,0 и менее	57±0,2	200±50
1956	8	0		57±0,3	80±20
1957	4	0		56±0,3	70±20
1958–1960	5	0		54±0,4	30±6
1952–1960	54	0		58±0,2	310±60

*лицам, родившимся в 1949 г. или позже, присваивали «нулевой» возраст [*persons born in 1949 or later were assigned a «zero» age]

▼ – предполагаемый объем ЩЖ в соответствии с возрастом, согласно [23] [▼ – the assumed thyroid volume according to age, by [23]

территории. Авария 1957 г. на ПО «Маяк» не привнесла существенного вклада в кумулятивную дозу облучения ЩЖ (см. табл. 4).

Распространенность ТП среди женщин 1-го и 2-го кластеров (1940–1945 гг. и 1946–1951 гг. рождения, рис. 1) составляла от 64,5% до 72,9% и была близка к значениям ТП для одновозрастного контроля (табл. 5). Следует отметить, что средний возраст на момент обследования женщин данных временных отрезков составил от 63 до 70 лет. Как известно, с увеличением возраста изменяется тиреоидный гормональный баланс, увеличивается распространенность «нетиреоидных» заболеваний, в связи с чем частота и выраженность патологии ЩЖ повышается [24]. В 3-м кластере (женщины 1952–1960 гг. рождения, возраст обследования менее 60 лет) распространенность ТП была на уровне 67% (см. табл. 5). Однако, в отличие от первых 2 кластеров, для женщин 3 кластера этот уровень в 1,6 раза статистически значимо превышал возрастные значения частоты заболеваний ЩЖ у необлученных лиц ($p=0,02$), ОШ – 2,65 при 95% ДИ 1,04–6,9 (см. табл. 5), при этом средняя доза облучения ЩЖ была существенно

ниже (310 мГр). В литературе, касающейся изучения последствий аварии на Чернобыльской АЭС, обсуждаются вопросы относительно пороговой дозы радиационно-индуцированных эффектов в ЩЖ [25]. Отмечают, что к особенностям микрораспределения ¹³¹I относится концентрирование радиоизотопа лишь в функционирующих фолликулах ЩЖ [26]. Доля йодаккумулирующих фолликулов, согласно имеющимся сведениям, «составляет порядка 5% от их общего числа» [цит. по: 25, С.437]. По мнению авторов, это обстоятельство может приводить к неравномерности интратиреоидного распределения поглощенной дозы и служить до некоторой степени объяснением отсутствия корреляции между дозами облучения и развитием некоторых неканцерогенных заболеваний ЩЖ [25, 26].

Результаты, полученные при объединении переселенцев по годам рождения, отчетливо свидетельствуют о неоднородности групп по дозе облучения. Так, в 14 из 18 групп, сформированных по годам рождения, доля лиц с дозами выше 1000 мГр варьировала от 9 до 100%, а в остальных группах составила 0%. Это было обусловлено разли-

Распространенность ТП в зависимости от возраста переселенных женщин при обследовании

Таблица 5

Prevalence of thyroid pathology in relocated females on the examination age]

[Table 5

Группы [Groups]	Возраст при обследовании, лет [The examination age, years]	Общее число женщин [Total number of persons]	Все случаи ТП [All thyroid pathology cases]			
			n	%	P*	ОШ (95% ДИ) [OR (95% CI)]
Необлученные лица [unexposed persons]		29	19	65,5		
Переселенцы [relocated persons] 1940–1945 г.р. [b.y.]	≥ 60	31	20	64,5	0,46	0,96 (0,34–2,7)
Переселенцы [relocated per- sons] 1946–1951 г.р. [b.y.]		59	43	72,9	0,23	1,42 (0,55–3,2)
Необлученные лица [unexposed persons]		26	11	42,3		
Переселенцы [relocated persons] 1952–1960 г.р. [b.y.]	< 60	54	36	66,7	0,02	2,65 (1,04–6,9)

*Оценка различий проведена между переселенцами и необлученными лицами соответствующего возраста
[The differences assessment was carried out between relocated persons and unexposed persons of appropriate age].

чиями в мощности облучения, маршруте передвижения, длительности проживания, в характере жизнедеятельности переселенцев. В связи с этим была предпринята группировка по величине тиреоидной дозы (табл. 6). Обращает на себя внимание, что в дозовой группе 1000–1499 мГр по сравнению с группой до 1000 мГр статистически значимо увеличена частота узловых форм ТП, наиболее опасных в плане малигнизации (в 1,7 раз, $p=0,03$). При еще большем увеличении дозы облучения (1500–1999 мГр) показатель распространенности узловых форм повышался с большей степенью статистической значимости (в 2 раза, $p=0,003$), при этом наблюдалось также учащение ТП в целом (в 1,5 раза, $p=0,007$). Дальнейшее возрастание дозы облучения до 2000 мГр и выше не сопровождалось повышением распространенности заболеваний ЩЖ (см. табл. 6).

Еще до проведения скрининга у 57 женщин (39%), переселенных с загрязненных территорий, ТП была диагностирована при обращении в медицинское учреждение. Среди них в подгруппе с тиреоидной дозой

1000 мГр и более доля женщин с ТП в анамнезе была в 1,7 раза выше (31 из 61 женщины), чем таковая в подгруппе с дозой 1000 мГр (26 из 83 женщин), различия статистически значимы, $p=0,006$. В отличие от скрининга (активного выявления патологии среди популяции), в клинической практике диагностика заболеваний происходит после обращения пациента за медицинской помощью. Среди жалоб, которые приводят пациента к специалисту, могут быть симптомы гипо- или гипертиреоза, диффузное увеличение ЩЖ, сдавление узлом окружающих тканей, сердечно-сосудистые и неврологические заболевания, а также многие другие состояния. Можно думать, что высокие дозы облучения ЩЖ вызвали не только учащение, но и более раннюю манифестацию тиреопатологии. Этот вопрос требует дальнейшего углубленного изучения.

Стратификация по дозовому уровню не исключила неоднородность по некоторым другим параметрам. Практически во всех дозовых интервалах наблюдалась вариабельность по возрасту, достигнутому на момент об-

Распределение случаев ТП среди женщин-переселенцев по интервалам тиреоидных доз

Таблица 6

Distribution of thyroid pathology cases among relocated female by intervals of thyroid doses]

[Table 6

Интервалы тиреоидных доз, мГр [Interval of thyroid doses, mGy]	Число лиц [Number of persons]	Случаи с заболеваниями ЩЖ [Thyroid pathology cases]								
		Все случаи [All cases]			Узловые формы [Thyroid nodular diseases]			Неузловые формы [Nonnodular thyroid diseases]		
		n	%	P*	n	%	P*	n	%	P*
10–999	83	51	61,4		27	32,5		24	28,9	
1000–1499	20	15	75,0	0,14	11	55,0	0,03	4	20,0	0,24
1500–1999	15	14	93,3	0,007	10	66,7	0,003	4	26,7	0,47
≥2000	26	19	73,1	0,15	13	50,0	0,06	6	23,1	0,18

*Различия оценены по сравнению с дозовой группой 10–999 мГр

*[Differences are estimated by comparison with the dose group “10–999” mGy]

следования. Чтобы при статистической обработке нивелировать влияние возраста на реализацию ТП, женщины по возрасту на момент обследования были разделены на две группы: «до 60 лет» (49 человек) и «60 лет и старше» (95 чел). При такой группировке зависимость распространенности тиреоидных отклонений от дозы облучения четко выявилась в старшей возрастной группе (табл. 7). В подгруппе со средней дозой 1450 мГр риск развития ТП был статистически значимо выше, чем среди женщин, облученных в средней дозе 500 мГр: ОШ для всех тиреоидных отклонений составило 3,1 (95% ДИ 1,1–10,1), для узловых форм – 2,9 (95% ДИ 1,1–7,8). Возрастание средне-групповой дозы облучения ЩЖ еще в 2,5 раза (до 3530 мГр) не приводило к увеличению распространенности всех тиреоидных отклонений, однако частота узловых форм оставалась повышенной по сравнению с лицами, облученными в дозах ниже 1000 мГр ($p=0,04$). В младшей возрастной группе («до 60 лет») прослеживалась подобная тенденция: в дозовой подгруппе 1000 мГр и более частота узловых форм была в 2,2 раза выше, однако различия были статистически незначимы ($p=0,057$), скорее всего, из-за малочисленности подгруппы.

Полученные нами данные согласуются с имеющимися в литературе сведениями о росте частоты радиационно-индуцированной доброкачественной тиреоидной патологии в широком диапазоне доз при различных видах и сценариях облучения [1, 2, 4, 5]. Ранее было показано, что распространенность одноузловой зоба у женщин г. Озерска после облучения в раннем детстве от высоких ^{131}I -содержащих выбросов ПО «Маяк» статистически значимо превышала таковую у необлученных лиц (ОШ=1,5, 95% ДИ 1,1;2,04), в то время как у лиц, родившихся в период существенного снижения выбросов ^{131}I , частота узловой солитарной зоба уменьшилась до контрольных значений [27]. Обращает на себя внимание, что возрастание уровня радиационного воздействия более 2000 мГр не сопровождалось увеличением распространенности неканцерогенной ТП (см. табл. 7). Аналогичные ситуации наблюдаются при анализе зависимости некоторых

других радиобиологических эффектов от радиационной дозы. Так, например, связь частоты доброкачественных новообразований в ЩЖ с дозой облучения прослеживается в диапазоне малых и средних доз и теряется после облучения в дозе 5 Гр [28]. Подобный феномен при нарастании дозы облучения отмечен для частоты некоторых видов злокачественных новообразований других органов, в частности, легких [29].

Заключение

В работе приведены результаты анализа связи распространенности отдаленной тиреоидной патологии с индивидуальными дозами на ЩЖ у лиц, переселенных в г. Озерск с прибрежных сел реки Течи и территории ВУРС и подвергшихся в детстве преимущественному воздействию ^{131}I от выбросов ПО «Маяк». Выявлена дозовая зависимость распространенности тиреоидной патологии. Так, частота узловых доброкачественных образований, опасных в плане малигнизации, в ЩЖ женщин-переселенцев была статистически значимо увеличена в 1,7 раза ($p=0,03$) в интервале тиреоидных доз 1000–1499 мГр и в 2 раза ($p=0,003$) в интервале доз 1500–1999 мГр по сравнению с распространенностью ТП при дозах до 1000 мГр. В диапазоне тиреоидных доз 1500–1999 мГр была повышена также распространенность всех заболеваний ЩЖ (в 1,5 раза, $p=0,007$). Дальнейшее увеличение дозы облучения ЩЖ не приводило к возрастанию частоты тиреопатологии. Относительно необлученных лиц более высокая распространенность заболеваний ЩЖ (в 1,6 раза, $p=0,02$) отмечена только для женщин-переселенцев, возраст которых на момент скрининга был менее 60 лет.

Полученные данные носят предварительный характер; для установления четкой зависимости доза – эффект необходимо расширение выборки для исследования. Значительное количество факторов риска, оказывавших влияние на формирование дозы облучения ЩЖ и развитие тиреопатологии, вызывает необходимость использования многофакторного статистического анализа для оценки вклада каждого из них в развитие заболеваний

Распространенность ТП у женщин-переселенцев (возраст на момент обследования 60 лет и более) при различных дозах облучения

Таблица 7

[Table 7]

Thyroid pathology cases prevalence in relocated female (examination age 60 years and more) at different exposure doses

Параметры [Parameters]	Дозовые подгруппы [Dose subgroups]		
Тиреоидные дозы, мГр, $M \pm m$ (min-max) [Thyroid dose, mGy]	500±50 (10-999)	1450±40 (1000-1999)	3530±240 (≥2000)
Возрастной диапазон, лет [Age range, years]	60,0-72,2	60,3-71,9	60,5-71,6
Общее число человек [Total number of persons]	38	31	26
Число случаев с ТП, (%) [Thyroid pathology cases]	23 (60,5)	26* (83,9)	19 (73,1)
Число случаев с узловыми формами ТП, (%) [Cases of thyroid nodular pathology]	12 (31,6)	18* (58,1)	14* (53,8)

* – статистически значимые различия с дозовой подгруппой 10–999 мГр ($p<0,05$)

[* – statistically significant differences with dose subgroup 10–999 mGy]

ЩЖ у лиц, проживавших в детстве на радиоактивно загрязненных территориях.

Литература

1. Ron E., Brenner A. Non-malignant Thyroid diseases after a wide range of radiation exposures // *Radiation Research*. 2010. Vol. 174. P. 877–888. DOI: 10.1667/RR1953.1.
2. Imaizumi M., Ohishi W., Nakashima E., et al. Association of Radiation Dose with Prevalence of Thyroid Nodules among Atomic Bomb Survivors Exposed in Childhood (2007–2011) // *JAMA Internal Medicine*. 2015. Vol. 175, No. 2. P. 228–236.
3. Davis S., Kopecky K., Hamilton T., Onstad L. Thyroid neoplasia, autoimmune thyroiditis and hypothyroidism in person exposed to iodine 131 from the Hanford Nuclear Site // *JAMA*. 2004. Vol. 292, No. 21. P. 2600–2613.
4. Mushkacheva G., Rabinovich E., Privalov V., et al. Thyroid abnormalities associated with protracted childhood exposure to 131I from atmospheric emissions from the Mayak weapons facility in Russia // *Radiation Research*. 2006. Vol. 166. P. 715–722.
5. Рожко А.В. Зависимость роста тиреоидной патологии от полученной дозы облучения детей и подростков, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2010. № 1. С. 49–53.
6. Eslinger P.W., Degteva M.O., Napier B.A., et al. Individual doses for super cohort members exposed to atmospheric radioiodine from the Mayak releases with an emphasis on prenatal doses // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 217. P. 106219. DOI:10.1016/j.jenvrad.2020.106219.
7. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M., et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: 137Cs // *Health Physics*. 2013. Vol. 104, No. 5. P. 481–498.
8. Толстых Е.И., Шагина Н.Б., Перемыслова Л.М., Дегтева М.О. Минеральная плотность костной ткани у жителей радиоактивно загрязненных территорий Челябинской области // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2010. Т. 50, № 4. С. 481–491.
9. Рабинович Е.И., Поволоцкая С.В., Обеснюк В.Ф., и др. Тиреоидная патология в отдаленные сроки после аварийного радиационного воздействия // *Анализ риска здоровью*. 2018. № 2. С. 52–59. DOI:10.21668/health.risk/2018.2.06.
10. Mokrov Y.G., Lyzhkov A.V., Muzruk V.A., et al. Milestone 7: Reconstruction of Atmospheric Releases of I-131 from Mayak Radiochemical Plant Stacks for the Period from 1948 to 1970, Part 2: Results of the Reconstruction of 131I Releases from the Stacks of the Reactors and Radiochemical Plants. US-Russian Joint Coordinating Committee on Radiation Effects Research Project 1.4. 2008. Ozersk, Russia.
11. Miley T.B., Eslinger P.W., Nichols W.E., et al. User Instructions for the DESCARTES Environmental Accumulation Code. Battelle, Pacific Northwest Laboratories: Richland, Washington; 1994. DOI:10.2172/10154088.
12. Snyder S.F., Farris W.T., Napier B.A., et al. Parameters Used in the Environmental Pathway and Radiological Dose Modules (DESCARTES, CIDER and CRD Codes) of the Hanford Environmental Dose Reconstruction Integrated Codes (HEDRIC). Battelle, Pacific Northwest Laboratories: Richland, Washington; 1994. DOI:10.2172/10158073.
13. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67 // *Ann. ICRP*. 1993. 23 (3–4)
14. Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother, ICRP Publication 88. 2002. Corrected Version, May 2002.
15. 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.
16. Altham P. Exact Bayesian analysis of 2x2 contingency table and Fisher's exact significance test. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*. 1969. Vol. 31, No. 2. P. 261–269. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1969.tb00786.
17. Альбом А., Норелл С. Введение в эпидемиологию. Пер. с англ. И. Боня. Таллинн: АО РНЕ, 1996. 122 с.
18. Котеров А.Н. От очень малых до очень больших доз радиации: новые данные по установлению диапазонов и их экспериментально-эпидемиологические обоснования // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2013. №2. С. 5–21.
19. Хохряков В.В., Дрожко Е.Г. Дозы облучения населения г. Озерска, сложившиеся в результате выбросов в атмосферу йода-131. Опыт ретроспективного восстановления // *Вопросы радиационной безопасности*. 2001. № 1. С. 57–66.
20. Касаткина Э.П., Шилин Д.Е. Радиационная патология щитовидной железы у детей и подростков. Лекция 1. Эффект малых доз облучения и концепция риска отдаленных последствий Чернобыльской катастрофы // *Проблемы эндокринологии*. 1977. Т. 43, № 4. С. 24–29. DOI:10.14341/probl1977434324-29.
21. Звонова И.А., Балонов М.И., Братилова А.А., и др. Дозы облучения щитовидной железы у населения России вследствие выпадений радиоактивного йода после аварии на Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия*. 2004. Т. 96, вып. 4. С. 310–316
22. Бережанская С.Б., Малиненко З.И. Зависимость объема щитовидной железы от антропометрических данных у детей раннего возраста // *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2013. № 5. С. 87–91.
23. Aydin O., Aydin E.K., Akpinar I., et al. Normative data of thyroid volume-ultrasonographic evaluation of 422 subjects aged 0–55 years // *Journal of Clinical Research in Pediatric Endocrinology*. 2015. Vol. 7, No. 2. P. 98–101. DOI:10.4274/jcrpe.1818.
24. Петунина Н.А. Особенности диагностики и лечения заболеваний щитовидной железы у пожилых пациентов // *Проблемы эндокринологии*. 2008, Т. 54, № 3, С. 36–42. DOI: 10.14341/probl200854336-42.
25. Маленченко А.Ф., Василенко И.Я., Василенко О.И. Обмен йода и течение патологических процессов в щитовидной железе у людей в регионах зобной эндемии при поражении радиацией // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 435–443.
26. Кеирим-Маркус И.Б., Пантелькин В.П. Радиойод; воздействие на здоровье населения в чрезвычайных ситуациях // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2003. Т. 48, № 5. С. 12–14.
27. Рабинович Е.И. Неканцерогенная патология щитовидной железы у жителей г. Озерска, проживавших в раннем детстве в зоне влияния ионизирующей радиации // *Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия. Челябинск: Челябинский Дом печати*, 2010. Т. 2. С. 101–124.
28. Shore R.E., Hildreth N., Dvoretzky P., et al. Benign thyroid adenomas among persons X-irradiated in infancy for enlarged thymus glands // *Radiation Research*. 1993. Vol. 134. P. 217–223.
29. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. Радиационное воздействие на организм – положительные эффекты. М.: Информ. Атом, 2005. С. 246.

Поступила: 16.11.2021 г.

Рабинович Евгения Израиловна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией радиационной биохимии Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 456780, Россия, г. Озерск, Челябинская область, Озерское шоссе, 19; E-mail: rei-06@mail.ru

Поволоцкая Светлана Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории радиационной биохимии Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

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

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Рабинович Е.И., Поволоцкая С.В., Дегтева М.О., Толстых Е.И. Связь распространенности заболеваний щитовидной железы с дозой облучения у лиц, переселенных с радиоактивно загрязненных территорий Южного Урала // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 36-46. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-36-46

Relation between the thyroid diseases prevalence and doses of radiation exposure in the individuals relocated from radioactively contaminated areas in South Urals

Evgeniya I. Rabinovich¹, Svetlana V. Povolotskaya¹, Marina O. Degteva², Evgenia I. Tolstykh²

¹ Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Chelyabinsk region, Russia

² Urals Scientific and Practical Center of Radiation Medicine of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

The objective of this work was to reveal the relations between thyroid pathology prevalence and absorbed thyroid radiation dose from ¹³¹I in the individuals relocated into Ozyorsk from the radioactively contaminated areas of South Urals. The sources of data for statistical analysis were the electronic database "Thyroid" containing clinical and laboratory data, and electronic database "The man and the environment" containing dosimetry information on irradiated individuals. Thyroid diseases and individual thyroid doses from all sources of ionizing radiation were collate for 195 persons relocated into Ozyorsk from the villages of the Techa riverside and of the territory of the East Ural Radioactive Trace. Statistical analysis of the data was performed using a software package (Excel, Statistica 6.1). The prevalence of thyroid nodules increased in relocated female statistically significantly 1.7 times ($p=0.03$) in the range of thyroid doses of 1000–1499 mGy and 2 times ($p=0.003$) in the range of doses of 1500–1999 mGy compared to this parameter at the doses below 1000 mGy. The prevalence of all thyroid abnormalities has been increased 1.5 times ($p=0.007$) in the range of thyroid doses of 1500–1999 mGy. An increased prevalence of thyroid diseases by 1.6 times ($p=0.02$) relative to non-irradiated persons was noted for relocated female whose age at the time of the medical examination was less than 60 years only. A significant number of risk factors requires the use the multivariate statistical analysis to assess their contribution for the development of thyroid pathology in the individuals residing in childhood in radioactively contaminated areas.

Key words: radioactively contaminated areas, Techa river, East Urals Radioactive Trace, ¹³¹I, relocated persons, thyroid diseases.

Evgeniya I. Rabinovich

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: 456780, Russia, Ozyorsk, Chelyabinskaja oblast, Ozyorskoe shosse, 19; E-mail: rei-06@mail.ru

References

1. Ron E, Brenner A. Non-malignant thyroid diseases after a wide range of radiation exposures. *Radiation Research*. 2010;174: 877–888. DOI: 10.1667/RR1953.1.
2. Imaizumi M, Ohishi W, Nakashima E, Sera N, Neriishi K, Yamada M, et al. Association of radiation dose with prevalence of thyroid nodules among atomic bomb survivors exposed in childhood (2007–2011). *JAMA Internal Medicine*. 2015;175(2): 228–236.
3. Davis S, Kopecky K, Hamilton T, Onstad L. Thyroid neoplasia, autoimmune thyroiditis and hypothyroidism in person exposed to iodine 131 from the Hanford Nuclear Site. *JAMA*. 2004;292(21): 2600–2613.
4. Mushkacheva G, Rabinovich E, Privalov V, Povolotskaya S, Shorokhova V, Sokolova S, et al. Thyroid abnormalities associated with protracted childhood exposure to ¹³¹I from atmospheric emissions from the Mayak weapons facility in Russia. *Radiation Research*. 2006;166: 715–722.
5. Rozhko A. Relation of thyroid pathology increase to received exposure dose among children and adolescents affected as a result of the Chernobyl Accident. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh = Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2010;1: 49–53. (In Russian).
6. Eslinger PW, Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Tokareva EE. Individual doses for super cohort members exposed to atmospheric radioiodine from the Mayak releases with an emphasis on prenatal doses. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;217: 106219. DOI:10.1016/j.jenvrad.2020.106219.
7. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Physics*. 2013;104(5): 481–498.
8. Tolstykh EI, Shagina NB, Peremyslova LM, Degteva MO. Bone mineral density in residents lived on radioactive territories Chelyabinsk Region. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2010;50(4): 481–491. (In Russian).
9. Rabinovich EI, Povolotskaya SV, Obesnyuk VF, Privalov VA, Ryzhova EF, Vasina MA. Thyroid pathology as late radiation effect caused by exposure to radiation during emergencies. *Analiz riska zdorov'yu = Health risk analysis*. 2018;2.P: 52–59. DOI:10.21668/health.risk/2018.2.06. (In Russian).
10. Mokrov YG, Lyzhkov AV, Muzrukova VA, Pyatin NP, Rovny SI, Anspaugh LR, et al. Milestone 7: Reconstruction of Atmospheric Releases of I-131 from Mayak Radiochemical Plant Stacks for the Period from 1948 to 1970, Part 2: Results of the Reconstruction of ¹³¹I Releases from the Stacks of the Reactors and Radiochemical Plants. US-Russian Joint Coordinating Committee on Radiation Effects Research Project 1.4. 2008. Ozersk, Russia.
11. Miley TB, Eslinger PW, Nichols WE, Lessor KS, Ouderkirk SJ. User Instructions for the DESCARTES Environmental Accumulation Code. Battelle, Pacific Northwest Laboratories: Richland, Washington; 1994. DOI:10.2172/10154088.
12. Snyder SF, Farris WT, Napier BA, Ikenberry TA, Gilbert RO. Parameters Used in the Environmental Pathway and Radiological Dose Modules (DESCARTES, CIDER and CRD Codes) of the Hanford Environmental Dose Reconstruction Integrated Codes (HEDRIC). Battelle, Pacific Northwest Laboratories: Richland, Washington; 1994. DOI:10.2172/10158073.
13. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. *Ann. ICRP*. 1993; 23(3–4).
14. Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88. 2002. Corrected Version, May 2002.
15. 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.
16. Altham P. Exact Bayesian analysis of 2x2 contingency table and Fisher's exact significance test. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*. 1969;31(2): 261–269. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1969.tb00786.
17. Ahlbom A, Norell S. Introduction to modern epidemiology. Tallinn: AO RHE; 1996. 122 p. (In Russian).
18. Koterov AN. From very low to very large doses of radiation: new data on ranges definitions and its experimental and epidemiological basing. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2013;2: 5–21. (In Russian).
19. Khokhryakov VV, Drozhko EG. Ozyorsk population exposure doses in the result of iodine-131 releases into atmosphere. Retrospective reconstruction. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Journal of Radiation Safety issues*. 2001;1: 57–66. (In Russian).
20. Kasatkina EP, Shilin DE. Thyroid radiation pathology in children and adolescents. Lecture 1. The effect of small doses and the concept of the risk of the long-term consequences of the Chernobyl disaster. *Problemy endokrinologii = Problems of Endocrinology*. 1997;43(4): 24–29. DOI:10.14341/probl199743424-29. (In Russian).
21. Zvonova IA, Balonov MI, Bratilova AA, Danilova IO, Vlasov OK, Shchukina NV. Radiation doses of the thyroid gland in the population of Russia due to the fallout of radioactive iodine after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2004;96(4): 310–316. (In Russian).
22. Berezhanskaya SB, Malinenko ZI. Relationship between thyroid volume and anthropometric measurements in infants. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii = Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2013;5: 87–91. (In Russian).
23. Aydin O., Aydin E.K., Akpınar İ., Turan S, Bereket A. Normative data of thyroid volume-ultrasonographic evaluation of 422 subjects aged 0–55 years. *Journal of Clinical Research in Pediatric Endocrinology*. 2015;7(2): 98–101. DOI:10.4274/jcrpe.1818.
24. Petunina NA. The diagnosis and treatment of thyroid diseases in the elderly. *Problemy endokrinologii = Problems of Endocrinology*. 2008;54(3): 36–42. DOI:10.14341/probl200854336-42. (In Russian).
25. Malenchenko AF, Vasilenko Ya, Vasilenko OI. Iodine metabolism and pathologic processes in the thyroid gland under radioiodine lesions in the regions of goitrous endemia. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2007;47(4): 435–443. (In Russian).
26. Keirim-Markus IB, Pantelkin VP. Why radioiodine plays significant role when it influences population health in radiological emergency situations. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2003;48(5): 12–14. (In Russian).
27. Rabinovich EI. Non-cancer thyroid pathology in Ozyorsk residents lived as children in Mayak PA affected area. Radioactive sources and radiation exposure effects on the Mayak PA workers and population living in the area of nuclear facility influence. Chelyabinsk: Chelyabinsk Publishing House; 2010. Vol. 2. P.101–124. (In Russian).
28. Shore RE, Hildreth N, Dvoretzky P, Pasternack B, Andersen E. Benign thyroid adenomas among persons X-irradiated in infancy for enlarged thymus glands. *Radiation Research*. 1993;134: 217–223.
29. Buldakov LA, Kalistratova VS. Radiation exposure to the body - positive effects. Moscow: Inform. Atom; 2005. P. 246. (In Russian).

Received: November 16, 2021

For correspondence: Evgeniya I. Rabinovich – Cand. Sci. (Medicin), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Radiation Biochemistry, Southern Urals Biophysics Institute of Federal Medical-Biological Agency of Russia, (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinskaja oblast, 456780, Russia; E-mail: rei-06@mail.ru)

Svetlana V. Povolotskaya – Cand.Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Radiation Biochemistry, Southern Urals Biophysics Institute of Federal Medical-Biological Agency of Russia, Ozyorsk, Russia

Marina O. Degteva – Cand. Sci. (Technical), Head of biophysical laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

Evgenia I. Tolstykh – Doctor Sci. (Biology), Leading Researcher of biophysical laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Rabinovich E.I., Povolotskaya S.V., Degteva M.O., Tolstykh E.I. Relation between the thyroid diseases prevalence and doses of radiation exposure in the individuals relocated from radioactively contaminated areas in South Urals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 36-46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-36-46

Оценка уровней содержания радона в многоэтажных зданиях на примере восьми крупных городов России

М.В. Жуковский, И.В. Ярмошенко, А.Д. Онищенко, Г.П. Малиновский, А.В. Васильев, Е.И. Назаров

Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

В настоящей работе проанализированы результаты измерений ОА радона в многоэтажных многоквартирных зданиях в 8 крупных городах России. В каждом городе на основе квазислучайного подхода были сформированы две выборки в зависимости от года постройки здания — до и после 2000 г. Измерения выполнены с использованием радиометров радона на основе твердотельного трекового детектора CR-39. В квартирах многоэтажных зданий устанавливались по 2 радиометра и рассчитывалась средняя по квартире ОА радона. Период экспонирования радиометров составил 3 месяца. Для оценки среднегодовой ОА применялись сезонные коэффициенты, рассчитанные для преимущественного поступления радона из строительных материалов. Всего измерения ОА радона проведены в 1032 квартирах. Предполагалось, что объединенная выборка для городов Екатеринбург, Краснодар, Нижний Новгород, Новосибирск, Тюмень и Челябинск является представительной для многоэтажных зданий нестоличных городов России. Были получены следующие средние арифметические среднегодовые значения ОА радона в выборках зданий, возведенных до и после 2000 г. соответственно: Москва — 17 и 21 Бк/м³; Санкт-Петербург — 15 и 25 Бк/м³, группа нестоличных городов — 25 и 31 Бк/м³. С учетом весового вклада каждой группы зданий в общий городской жилищный фонд рассчитаны параметры, характеризующие ОА радона в многоэтажных многоквартирных городских зданиях России: среднее арифметическое 25 Бк/м³; среднее геометрическое 21 Бк/м³; геометрическое стандартное отклонение 1,81. В целом, облучение радоном в многоэтажных городских зданиях России является невысоким, как по средней величине, так и диапазону значений. Отмечается тенденция роста облучения населения радоном в новых зданиях, которая связана с внедрением строительных технологий, повышающих энергоэффективность зданий.

Ключевые слова: радон, обследование, радиационная безопасность, города, многоэтажные здания.

Введение

Необходимым этапом оптимизации радиационной безопасности при обращении с источниками ионизирующего излучения является объективная и достоверная оценка ситуации облучения [1, 2]. Воздействие радона и его дочерних продуктов (ДПР) на население определяется по результатам измерения их объемной активности (ОА) или эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) в воздухе помещений с применением соответствующих средств и методов измерений. Контроль облучения населения радоном может проводиться как на уровне отдельных зданий, так и на уровне территории (населенных пунктов, регионов или страны в целом). Обследование зданий проводится с целью определения соответствия этих зданий установленным гигиеническим нормативам по среднегодовым уровням ЭРОА изотопов радона и оценки доз облучения. Радиационное обследование зданий, как правило, проводится в рамках санитарно-эпидемиологического надзора организациями

Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор), а также другими лабораториями радиационного контроля по заявкам жильцов и участников рынка недвижимости [2]. Радоновое обследование территории проводится научно-исследовательскими организациями с целью получения объективных данных об уровнях облучения населения и оценки масштаба проблемы облучения населения радоном [3]. В рамках радонового обследования территории устанавливается частотное распределение ОА радона в жилищах, определяются его форма и параметры. При радоновом обследовании территории массовые измерения ОА радона в жилых зданиях проводятся в рамках целостной скоординированной программы. Основной методологический принцип радонового обследования — это проведение измерений по единой методике в представительной выборке жилищ.

С учетом невозможности охватить все здания на обследуемой территории, обследование проводят в выбор-

Ярмошенко Илья Владимирович

Институт промышленной экологии

Адрес для переписки: 620990, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: ivy@ecko.uran.ru

ке помещений зданий. Считается, что надежным способом формирования представительной выборки является случайный (рандомизированный) отбор. В реальности в полной мере реализовать этот способ оказывается невозможно. В научной литературе рассматривается несколько альтернативных подходов к созданию выборок жилищ, таких как квазислучайный, привлечение добровольцев, обследование жилищ организованных групп граждан и др. [2, 4, 5]. В случае формирования выборки на основе не полностью рандомизированного подхода ее представительность оценивается по соответствию жилому фонду в целом с учетом известных признаков радоноопасности зданий. Объем выборки определяется, исходя из необходимой точности оценки параметров частотного распределения ОА радона и имеющихся организационно-технических возможностей. Как показано в ряде работ, для удовлетворительной оценки среднего арифметического в однородной группе зданий достаточно провести измерения в выборке из нескольких десятков помещений [2]. Для оценки частотного распределения в неоднородной группе зданий размер выборки обследования должен быть увеличен до нескольких тысяч [4]. Базы данных обследованных зданий объемом в десятки тысяч записей используются для составления карт радоноопасности территорий [6].

При проведении радонового обследования территории предпочтение отдается интегрирующим методам измерения ОА радона [4, 7]. Для оценки среднегодового значения ОА радона можно экспонировать интегрирующие радиометры радона в атмосфере помещений в течение 12 месяцев. Однако на практике такое продолжительное экспонирование при массовых измерениях осуществить сложно. В большинстве проведенных в мире радоновых обследований исследователи ограничивались 3-месячными измерениями. Для перехода от измеренного сезонного значения ОА радона к среднегодовому необходимо применять методы сезонной нормализации [7, 8].

В России ежегодно проводится большое количество измерений ОА радона в жилых зданиях [9, 10]. С 2001 г. результаты измерений, проводимых аккредитованными лабораториями, аккумулируются в Федеральном банке данных и публикуются в обобщенном виде [10, 11]. Комплексный анализ результатов измерений ОА радона за период с 2001 по 2017 г., содержащихся в Федеральном банке данных, проведен в работе Д.В. Кононенко [10]. Автор критически проанализировал собранные результаты, оценил их надежность и предложил методы корректировки искаженных распределений ОА радона в отдельных регионах. Для субъектов Российской Федерации оценены среднее геометрическое, геометрическое стандартное отклонение и среднее арифметическое значение ОА радона. Представленные в Федеральном банке данных результаты позволяют проанализировать актуальность проблемы облучения радоном населения России, определить наиболее радоноопасные регионы и оценить численность населения, проживающего при высоких уровнях ОА радона.

Необходимо отметить, что подразделения Роспотребнадзора в большей степени нацелены на выявление превышений санитарно-гигиенических нормативов и поиск радоноопасных территорий. Поэтому выборки зданий, вошедшие в Федеральный банк, необходимо рас-

сматривать как потенциально смещенные. В частности, в этой базе могут быть непропорционально представлены наименее радоноопасные типы зданий и помещений, такие как квартиры в городских зданиях, расположенные выше первого этажа. Кроме того, применение различных методов измерения в различных регионах, в том числе с высокими пределами обнаружения, снижают надежность данных, включенных в Федеральный банк.

Российская Федерация относится к странам с высоким уровнем урбанизации. Городские жители составляют 74,7% населения [12]. Жилищный фонд городов России преимущественно составляют многоэтажные многоквартирные здания. Традиционно считается, что накопление радона в квартирах таких зданий происходит за счет поступления из строительных конструкций и при надлежащем контроле содержания природных радионуклидов в строительных материалах и изделиях ЭРОА радона в жилищах остается низкой и не превышает норматив. С учетом этого, обследование эксплуатируемых городских зданий часто отходит на второй план при планировании радиационно-гигиенических мероприятий на территории.

В последние годы актуальность исследований уровня накопления радона в многоэтажных зданиях возросла с учетом широкого внедрения в практику строительства технологий, повышающих энергоэффективность строящихся зданий. Было показано, что в отдельных зданиях ЭРОА радона достигает значений, приближающихся к нормативу, а в ряде случаев превышающих норматив [13]. С учетом этого, в Институте промышленной экологии УрО РАН было запланировано и проведено исследование по анализу зависимости ОА радона от класса энергоэффективности зданий в 8 крупных городах России: Екатеринбург, Краснодар, Москва, Нижний Новгород, Новосибирск, Санкт-Петербург, Тюмень, Челябинск. В рамках исследования в каждом из городов формировались выборки из зданий, возведенных в период до и после официального введения требований к энергосбережению в зданиях. Уже предварительные результаты радонового обследования этих выборок в 4 городах показали, что в новых зданиях повышенных классов энергоэффективности средние уровни ОА радона существенно выше, чем в домах типовых проектов 1950–1990-х гг. [14, 15]. Проведенные в 8 крупных городах обследования позволяют не только выявить влияние технологий энергосбережения на облучение населения радоном, но и проанализировать облучение радоном городского населения России, проживающего в многоэтажных многоквартирных зданиях. Такой анализ дает возможность получить данные о средней ОА радона и распределении ОА радона в жилищах для крупнейшей группы населения и восполнить пробелы в понимании современной ситуации облучения радоном населения России.

Материалы и методы

Формирование выборок

Особенностью настоящего исследования являлось то, что в каждом городе формировались две неперекрывающиеся выборки в зависимости от года постройки здания – до и после 2000 г. Минимальный объем каждой выборки задавался в 50 объектов.

Участники исследования – жильцы квартир, в которых были проведены измерения, привлекались следующими способами:

- целевое информирование аудитории интернет-сообществ жильцов зданий, относящихся к одному из требуемых типов;
- распространение информации среди аудитории различных тематических групп в социальных сетях;
- поиск потенциальных участников по цепочке личных контактов организаторов исследования;
- привлечение организованных групп населения, таких как сотрудники научных и образовательных учреждений.

Для информирования участников исследования об организационных деталях, ходе исследования и его результатах была создана специальная группа в социальной сети «ВКонтакте» и интернет-сайт. В каждом городе приближение к рандомизированному принципу отбора объектов исследования обеспечивалось за счет сочетания разнообразных способов формирования выборок. Для оценки представительности выборок было проанализировано соответствие строительных, конструктивных и других характеристик выборок квартир жилищ ожидаемым для соответствующих городов и периодов постройки.

Более развернуто методология формирования выборок описана в предыдущей работе [15], в которой представлены результаты измерений в Екатеринбурге, Челябинске, Краснодаре и Санкт-Петербурге. Необходимо отметить, что в настоящую статью дополнительно включены результаты обследований в городах Москва, Нижний Новгород, Новосибирск и Тюмень, полученные позже.

Методы измерения

Измерения ОА радона выполнялись с использованием радиометров радона RSKS компании Radosys (Венгрия). Радиометры радона RSKS являются интегрирующим средством измерения на основе твердотельного трекового детектора CR-39, помещенного в диффузионную камеру. Треки альфа-частиц, образовавшиеся в материале детектора в процессе экспонирования радиометра, протравливаются в растворе щелочи и затем подсчитываются в автоматическом режиме на оптическом микроскопе в лабораторных условиях.

Для обеспечения точности и воспроизводимости результатов измерений радиометры радона RSKS были откалиброваны как производителем, так и в рамках внутреннего лабораторного контроля Института промышленной экологии УрО РАН с использованием специально созданного калибровочного стенда [16]. Калибровочные коэффициенты производителя и Института совпали. Нижний предел измерения для радиометров радона RSKS при 3-месячной экспозиции составляет 5 Бк/м³.

Необходимо отметить, что радиометры радона на основе трекового детектора CR-39 обладают рядом преимуществ по сравнению с устройствами на основе LR-115, которые более распространены в России. В первую очередь, преимуществом является постоянство метрологических характеристик в пределах партии и меньшее значение неопределенности единичного измерения [17]. Отличают радиометры RSKS также относительно невысокая цена и возможность приобретения крупных

партий. Недостатками являются необходимость использовать более дорогие оптические системы считывания и невозможность многократного использования диффузионных камер.

Радиометры радона передавались участникам исследования лично организаторами или через специально проинструктированных распространителей. В период действия ограничений, вызванных COVID-19, радиометры радона доставлялись курьерской службой. Участники исследования получали комплект, состоящий из двух радиометров радона, анкеты и инструкции по установке и экспонированию. Подробная инструкция была также размещена на сайте обследования. Участники исследования заполняли анкету, в которой указывали строительные, конструктивные и другие характеристики здания и своей квартиры, а также такие параметры, как состав семьи, режим проветривания и статус по курению. С участниками исследования поддерживалась связь по телефону и через электронные средства коммуникации.

Участники исследования самостоятельно размещали радиометры радона в своих квартирах на 3 месяца. В многоквартирных квартирах радиометры устанавливались в разных жилых комнатах, в однокомнатных квартирах – рядом. Использование 2 радиометров радона на один объект позволяет рассчитать усредненное значение ОА радона по квартире, а в случае потери или порчи одного из радиометров гарантированно получить результат. Экспонирование радиометров радона в течение 3 месяцев минимизирует влияние краткосрочных вариаций ОА радона.

По окончании экспонирования участники исследования передавали радиометры радона организаторам лично или через курьерскую службу. Трековые детекторы обрабатывались в лаборатории в Институте промышленной экологии УрО РАН.

Сезонная нормализация

С учетом методики проведения обследования ОА радона в выборках зданий требовалось провести сезонную нормализацию для оценки среднегодовой ОА радона. В настоящей работе были использованы методы сезонной нормализации, предложенные для помещений многоквартирных зданий, в которых источником радона являются строительные материалы [18]. Для разработки подхода к сезонной нормализации результатов измерения ОА радона в этом типе зданий были использованы более 20 долгосрочных часовых серий ОА радона, полученных с помощью радон-мониторов AlphaGUARD. В работе [18] было показано, что среднесрочная ОА радона связана с температурой атмосферного воздуха в период экспонирования. На рисунке 1 показаны сезонные коэффициенты, которые применялись для расчета среднегодовой ОА радона в соответствующих городах с учетом месяца, в который начиналось 3-месячное экспонирование радиометров радона. В г. Екатеринбурге измерения проводились в разные сезоны, и расчет среднегодовых ОА радона выполнялся индивидуально для каждого здания в рамках проведенных ранее работ.

Порядок расчета средневзвешенной величины ОА радона

Для расчета средней ОА радона, характерной для квартир в зданиях городского типа РФ, использовались резуль-

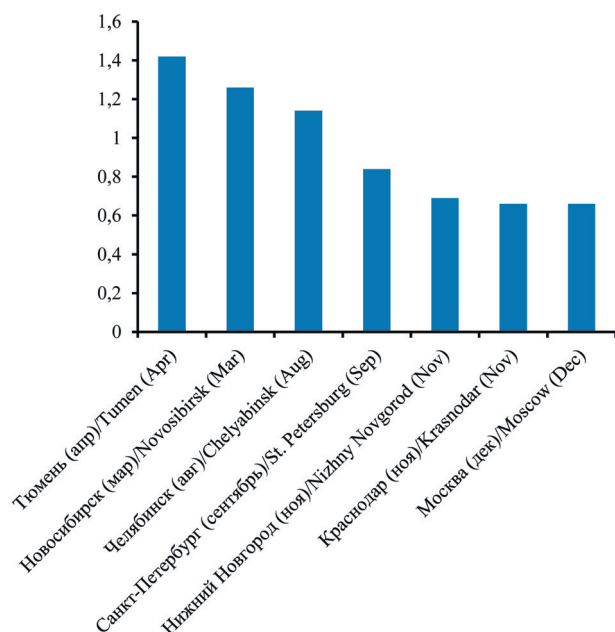


Рис. 1. Сезонные коэффициенты для оценки среднегодового ОА радона по результатам 3-месячных измерений (месяц начала измерения)

[Fig. 1. Seasonal correction factors for assessing the average annual radon concentration based on three-month measurements results (month of the measurement beginning)]

таты обследования 16 выборок в 8 крупных городах России. При анализе предполагалось, что выборки в столичных городах Москва и Санкт-Петербург характеризуют соответствующий жилой фонд этих городов. Выборки в остальных 6 нестоличных городах (Екатеринбург, Краснодар, Нижний Новгород, Новосибирск, Тюмень и Челябинск) объединялись в группы с учетом года постройки здания. Принималось, что такие объединенные группы представительны для квартир в многоэтажных многоквартирных зданиях нестоличных городов России в целом.

Для оценки весового вклада каждой выборки в генеральную совокупность городских зданий использовались статистические данные о площади городского жилищного фонда в Москве, Санкт-Петербурге и России в целом в 2000 и 2019 гг. (табл. 1, по данным Государственной информационной системы жилищно-коммунального хозяйства dom.gosuslugi.ru и информационной системы Федеральной службы государственной статистики <https://rosstat.gov.ru/>).

Для обобщенных оценок проводилось моделирование методом Монте-Карло. Был сгенерирован массив из 1 000 000 значений ОА радона, состоящий из 6 подгрупп: 1) г. Москва, дома, возведенные до 2000 г.; 2) г. Москва, дома, возведенные после 2000 г.; 3) г. Санкт-Петербург, дома, возведенные до 2000 г.; 4) г. Санкт-Петербург, дома, возведенные после 2000 г.; 5) нестоличные города России, дома, возведенные до 2000 г.; 6) нестоличные города России, дома, возведенные после 2000 г. Значения ОА радона генерировались, исходя из логнормального распределения и значений среднего геометрического и геометрического стандартного отклонения среднегодовой ОА радона в соответствующих выборках.

Таблица 1
Городской жилищный фонд Москвы, Санкт-Петербурга и нестоличных городов России

[Table 1]

Urban housing stock of Moscow, St. Petersburg and non-capital cities of Russia]

Город [City]	Городской жилищный фонд, млн м ² [Urban housing, million sq. m]		Доля жилищного фонда, возведенного после 2000 г. [Share of housing stock built after 2000]
	2000 г.	2019 г.	
Москва [Moscow]	157,4	245,8	36%
Санкт-Петербург [St. Petersburg]	87,7	140,0	37%
Нестоличные города [Non-capital cities]	1775,0	2493,7	29%

Каждая группа включалась в общий массив с учетом веса, который рассчитывался следующим образом:

$$W_{y,s} = w_y \cdot w_s, \quad (1)$$

где w_y – доля жилищного фонда (по площади) определенного периода постройки в рассматриваемом городе или группе городов, w_s – доля жилищного фонда определенного города или группы городов в городском жилом фонде России. Доли w_y и w_s рассчитывались с учетом статистических данных, приведенных в таблице 1.

В полученном массиве значений ОА радона рассчитывались среднее геометрическое, среднее арифметическое и геометрическое стандартное отклонение ОА радона.

Результаты

Всего измерения ОА радона были проведены в 1032 квартирах многоэтажных зданий 8 крупных городов России, в том числе в 545 квартирах в зданиях, возведенных после 2000 г. Измерения были проведены последовательно в каждом из городов, в период с августа 2019 г. по апрель 2021 г., за исключением г. Екатеринбурга, для которого выборки были сформированы по результатам исследований, выполненных ранее, в рамках других научно-исследовательских работ.

На рисунках 2–6 приведены основные характеристики выборок зданий для Москвы, Санкт-Петербурга и 6 нестоличных городов. Как видно из рисунка 2, в выборке домов, построенных до 2000 г., основная часть относится к периоду застройки 1950–1989 гг. В Санкт-Петербурге измерения были проведены в 16 многоэтажных кирпичных домах, построенных до 1917 г. В Москве в выборку вошли 15 многоэтажных кирпичных домов, возведенных по индивидуальным проектам в 1930–1949 гг.

Распределение зданий по типу с учетом основного строительного материала представлено на рисунке 3. Подгруппа зданий, возведенных до 2000 г., преимущественно состоит из кирпичных и панельных домов типовых серий. Как видно на рисунке 3, после 2000 г. значительное количество зданий построено с применением

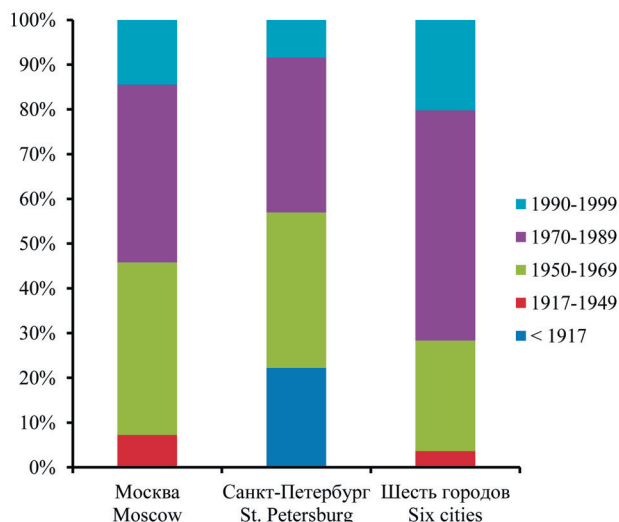


Рис. 2. Распределение зданий по году постройки в выборке зданий, возведенных до 2000 г.

[Fig. 2. Distribution of houses by year of construction in the sample of objects built up before 2000]

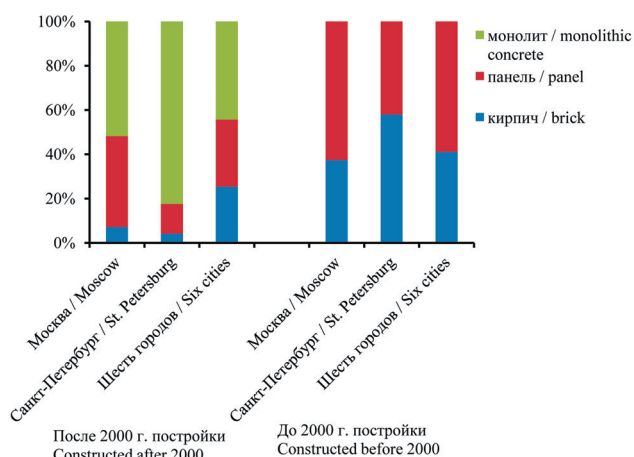


Рис. 3. Распределение зданий по типу (основному строительному материалу) в зданиях, возведенных после 2000 г. (слева) и до 2000 г. (справа)

[Fig. 3. Distribution of houses by type (main building material) in objects built up after 2000 (left) and before 2000 (right)]

технологии монолитного строительства. Анализ технических паспортов зданий показал, что в отдельных городах, например, в Москве и Челябинске, после 2000 г. продолжают развиваться технологии крупнопанельного домостроения, тогда как в других городах дома новых панельных серий практически не возводились. Как видно на рисунке 4, средняя этажность зданий, возведенных до 2000 г., составляет от 7 в нестоличных городах до 11 в Москве. После 2000 г. средняя этажность зданий возрастает до 14–20; при этом московские здания остаются наиболее многоэтажными. Всего в выборке зданий вошли 44 здания высотой 25 этажей и выше.

Согласно принятой стратегии формирования выборки, квартиры включались в программу обследования независимо от указанного жильцами этажа. С учетом этого, квартиры на первых этажах не составляют значимую часть исследованного жилого фонда (рис. 5), как это

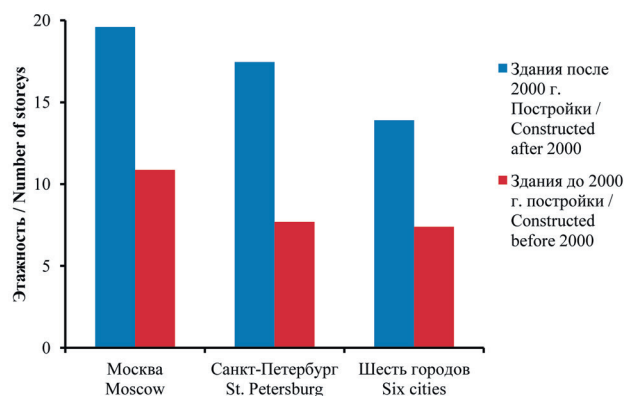


Рис. 4. Средняя этажность зданий в зависимости от периода постройки

[Fig. 4. Average number of storeys in buildings depending on the period of construction]

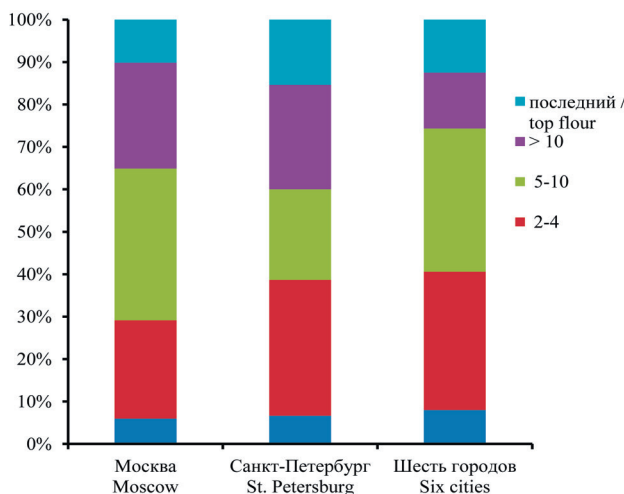


Рис. 5. Распределение квартир по этажу

[Fig. 5. Distribution of flats by floor]

требуется при проведении санитарно-гигиенических обследований жилых зданий. Доля квартир, расположенных на последних этажах зданий (13%), выше, чем на первых (7%) за счет нежилых помещений, расположенных на первых этажах.

На рисунке 6 представлен средний состав семьи, проживающей в обследованных квартирах, с учетом взрослых и детей младше 16 лет. В Москве наблюдается наибольшее количество жильцов, проживающих в одной квартире. Во всех городах количество детей в семьях, проживающих в домах, построенных после 2000 г., больше, чем в зданиях, возведенных ранее. По данным анкетирования, в 56% квартир проживают только лица старше 16 лет.

Результаты измерения ОА района в 8 крупных городах Российской Федерации представлены в таблице 2. С учетом того, что распределение ОА района в жилищах в однородных выборках следует логнормальному закону, в таблице 2, кроме среднего арифметического (СА) значения, представлены основные параметры логнормального распределения – среднее геометрическое (СГ) и геометрическое стандартное отклонение

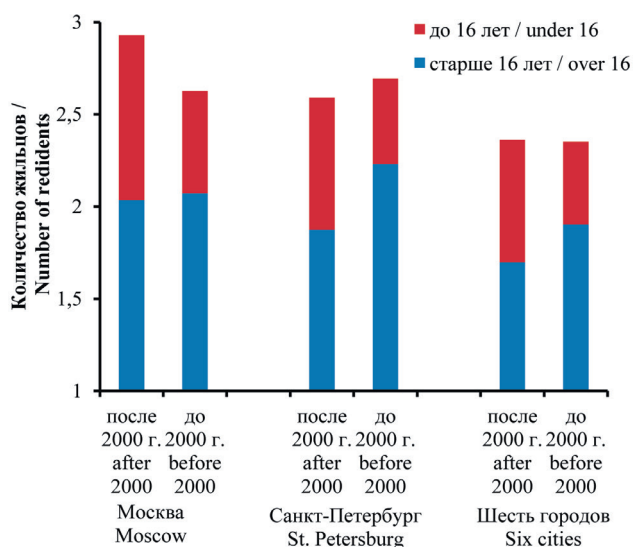


Рис. 6. Средний состав семьи в зависимости от года постройки здания, с учетом взрослых и детей до 16 лет

[Fig. 6. Average family structure, depending on the year of house construction, taking into account adults and children under 16 years old]

(ГСО) ОА радона. С учетом оцененных параметров лог-нормального распределения, для каждой группы рассчитана ожидаемая доля зданий, в которых ОА радона превышает 100 Бк/м³. В последних строках таблицы 2 приведены параметры для объединенной выборки 6 крупных нестоличных городов России – Екатеринбург, Краснодар, Нижний Новгород, Новосибирск, Тюмень и Челябинск.

Гистограммы распределения ОА радона в жилищах Москвы, Санкт-Петербурга и объединенной группы крупных городов для зданий, возведенных до и после 2000 г., представлены на рисунке 7. Во всех подгруппах распределение ОА радона в городских жилищах хорошо описывается логнормальным законом (критерий χ^2 , $p > 0,05$).

Кроме многоквартирных зданий, отдельные участники обследования по своей инициативе размещали радиометры радона в малоэтажных жилых зданиях (коттеджи, односемейные дома и т. п.). Всего незапланированные измерения проведены в 18 малоэтажных зданиях, в которых средняя ОА радона составила 117 Бк/м³, ожидаемая доля домов с превышением уровня ОА радона 400 Бк/м³ – 5,3%. Эти результаты в дальнейший анализ не включались.

Результаты радонового обследования многоквартирных зданий в крупных городах России

Таблица 2

[Table 2]

Results of radon survey of apartment buildings in large cities of Russia

Город [City]	Год постройки (до 2000 г./ после 2000 г.) [Year of construction (before or after 2000)]	Размер выборки [Sample size]	СА [Arithmetic mean]	СГ [Geometric mean]	ГСО [Geometric stan- dard deviation]	Доля больше 100 Бк/м ³ [Percentage above 100 Bq/m ³]
Москва [Moscow]	До [before]	83	17	15	1,53	<0,01%
	После [after]	85	21	19	1,68	0,06%
Санкт- Петербург [St. Petersburg]	До [before]	72	15	13	1,82	0,03%
	После [after]	78	25	22	1,68	0,18%
Екатеринбург [Ekaterinburg]	До [before]	71	33	28	1,81	1,5%
	После [after]	54	77	60	2,10	24%
Краснодар [Krasnodar]	До [before]	33	22	19	1,78	0,18%
	После [after]	59	16	15	1,38	<0,01%
Нижний Новгород [Nizhny Novgorod]	До [before]	72	20	19	1,44	<0,01%
	После [after]	83	23	21	1,46	<0,01%
Новосибирск [Novosibirsk]	До [before]	60	17	15	1,79	0,05%
	После [after]	60	17	14	1,76	0,03%
Тюмень [Tyumen]	До [before]	30	24	21	1,58	0,04%
	После [after]	51	29	27	1,47	0,04%
Челябинск [Chelyabinsk]	До [before]	66	31	28	1,58	0,28%
	После [after]	75	32	29	1,50	0,11%
Группа крупных нестоличных городов [Group of large non-capital cities]	До before]	332	25	21	1,75	0,30%
	После [after]	382	31	24	1,93	1,5%

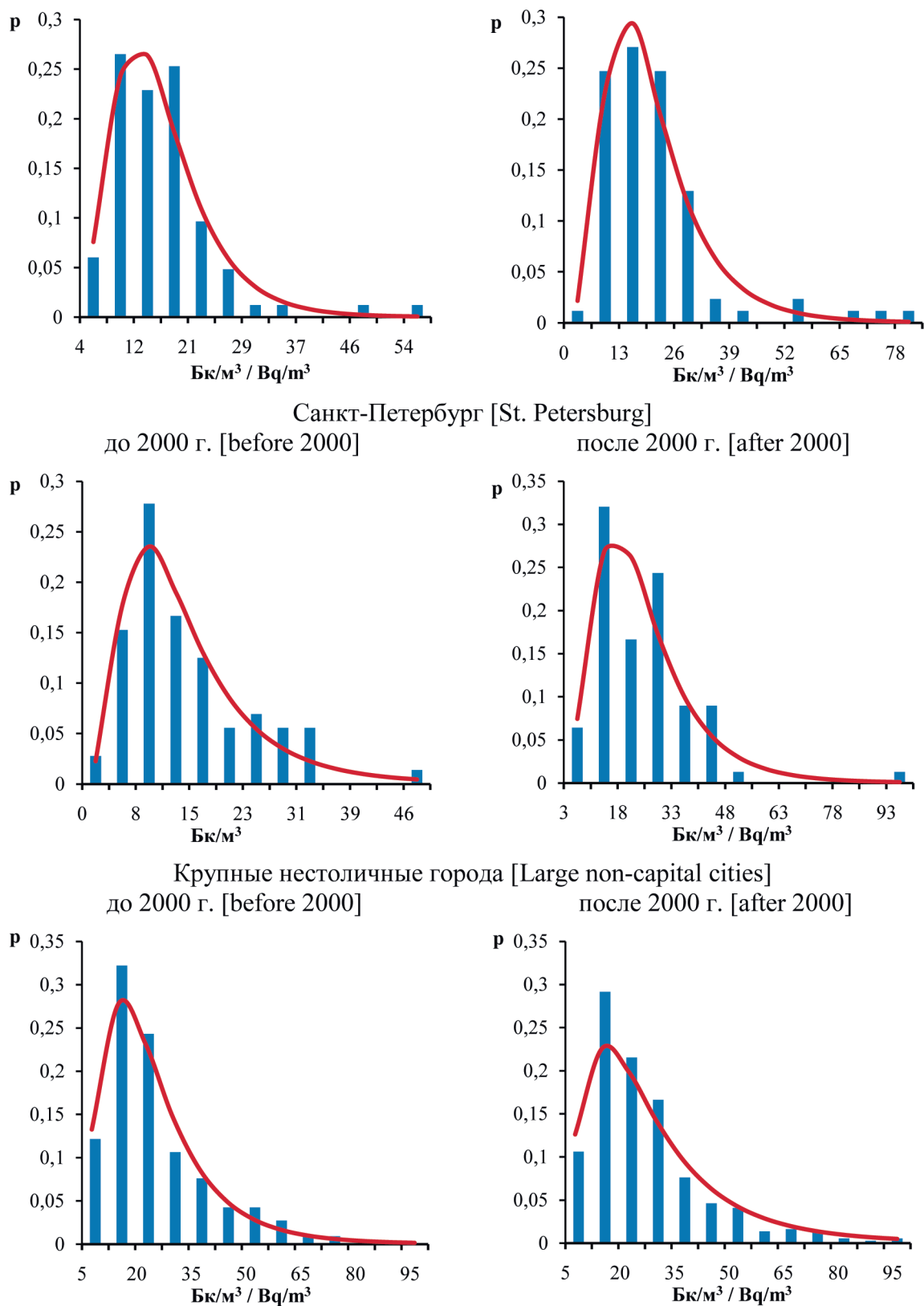


Рис. 7. Гистограммы распределения ОА радона в различных городах в зависимости от года постройки (столбики – наблюдаемая частота, линии – ожидаемая частота)
[Fig. 7. Histograms of radon concentration distribution in different cities depending on the year of construction (bars – observed frequency, lines – expected frequency)]

Итоговые веса, с которыми отдельные выборки включались в общий модельный массив, представлены в таблице 3.

По результатам моделирования следующие параметры характеризуют уровни ОА радона в многоквартирных городских зданиях России:

- среднее арифметическое – 25 Бк/м³;
- среднее геометрическое – 21 Бк/м³;
- геометрическое стандартное отклонение – 1,81.

Обсуждение

В рамках настоящей работы проведены выборочные радоновые обследования жилых зданий городского типа в 8 крупных городах России. При проведении обследований использованы интегрирующие методы измерения на основе детектирования альфа-треков материалом CR-39, имеющие ряд преимуществ, повышающих точность измерения ОА радона. Для оценки среднегодовой ОА радона применен метод температурной нормализации, разработанный для условий преимущественного поступления радона из строительных материалов, которые соответствуют многоэтажным городским зданиям. В целом, использование интегрирующих методов измерения и сезонной нормализации позволяет получить достаточно надежную оценку выборочной средней среднегодовой ОА радона. Выборки жилищ в городских зданиях сформированы с учетом года постройки. Такой подход был обусловлен задачей оценить влияние технологий строительства зданий повышенного класса энергоэффективности на уровни облучения населения. В пределах двух групп – зданий постройки до и после 2000 г., выборки создавались с применением единого квазирандомизированного подхода. Сформированные выборки охватывали различные районы городов, типы зданий, этажи, размеры квартир, составы семей и различные типы поведения жильцов (курение, предпочтения по проветриванию помещений). Анализ по этим факторам не выявил значимых отклонений структуры выборок от ожидаемой. Объем каждой из выборок в больших нестоличных городах превышает 300 квартир, что позволяет достаточно точно установить параметры логнормального распределения ОА радона. В Москве и Санкт-Петербурге в каждую выборку вошли не менее 80 и 70 зданий соответственно. Такие объемы выборок также позволяют определить среднее геометрическое и стандартное отклонение ОА радона с хорошей точностью.

Таким образом, выборки жилищ городских зданий, сформированные для настоящего исследования, являются представительными для современного жилого фонда многоэтажных зданий городского типа России.

Разделение обследованных зданий по году постройки отражается в распределении числа зданий по типам строительных материалов несущих конструкций. Если до 2000 г. здания в российских городах, в основном, строились из кирпича и железобетонных панелей, то после 2000 г. появляются здания из монолитного бетона, и их доля увеличивается со временем. Анализ распределения обследованных зданий по типам строительных материалов показал, что после 2000 г. доля монолитных зданий составила 51%. В то же время в отдельных городах продолжают развиваться технологии панельного домостроения, например, в Москве и Челябинске. Из более чем 1000 обследованных квартир 7% расположены на первом этаже, 70% – на четвертом этаже и выше. Такое распределение отражает подход к формированию выборки, который должен был обеспечить представительность для всех квартир. В целом, средняя ОА радона на первых этажах в 1,2 раза выше по сравнению со средним значением по всем этажам. Пропорциональный учет квартир, расположенных на различных этажах многоэтажных зданий, отличает настоящее исследование от работ, выполняемых лабораториями радиационного контроля для выявления ситуаций облучения радоном выше нормируемого уровня. Последний подход обусловлен решением санитарно-гигиенических задач.

На рисунке 8 приведено сопоставление средних ОА радона в крупных городах (с учетом доли зданий, возведенных до и после 2000 г.), по данным нашего исследования, и средних ОА радона по данным Федерального банка данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона в соответствующем регионе, приведенным Д. В. Кононенко [10]. В 7 городах из 8 средняя ОА радона в городских зданиях, по нашим данным, находится в пределах 0,4–0,7 от средней ОА радона в регионе по данным Федерального банка. Можно предполагать, что различие средних ОА радона по результатам 2 исследований обусловлено составом обследованных выборок. Данные Федерального банка включают дома различного типа, в том числе одноэтажные деревянные и каменные, а также непропорционально высокое количество квартир на

Таблица 3

Веса выборок квартир для оценки обобщенных средних параметров ОА радона в городских многоквартирных многоэтажных зданиях

[Table 3]

Weights of samples of apartments for assessing the generalized average parameters of radon concentration in urban multi-apartment high-rise buildings]

Город [City]	Год постройки [Year of construction]	w_y	w_s	W
Москва [Moscow]	До 2000 г. [before 2000]	0,64	0,085	0,055
	После 2000 г. [after 2000]	0,36	0,085	0,031
Санкт-Петербург [St. Petersburg]	До 2000 г. [before 2000]	0,63	0,049	0,031
	После 2000 г. [after 2000]	0,37	0,049	0,018
Нестоличные города Non-capital cities	До 2000 г. [before 2000]	0,71	0,866	0,616
	После 2000 г. [after 2000]	0,29	0,866	0,250

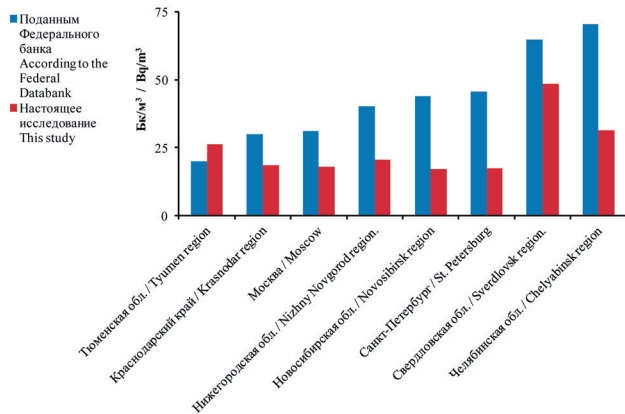


Рис. 8. Сравнение средних ОА радона в зданиях по данным Федерального банка данных по регионам [10] и по результатам настоящего исследования в центральных городах соответствующих регионов

[Fig. 8. Comparison of average radon concentration in buildings according to the Federal Databank by region [10] and according to the results of this study in the central cities of the corresponding regions]

первых этажах в многоэтажных зданиях. Более низкая ОА радона, полученная по нашим данным в представительной выборке многоэтажных зданий, включающей квартиры на всех этажах, является закономерной. В Тюменской области, в отличие от других городов, данные из двух источников практически совпадают, что, возможно, связано с тем, что Федеральный банк включает только 810 значений по Тюменской области за 17 лет. Таким образом, сравнение данных об ОА радона в квартирах многоэтажных зданий с данными Федерального банка показало удовлетворительную сходимость.

В настоящей работе проведен расчет средней ОА радона, характеризующей уровень облучения жителей городских территорий, проживающих в квартирах многоэтажных многоквартирных зданий. Для анализа результатов столичные города Москва и Санкт-Петербург рассмотрены в отдельности, остальные города объединены в одну группу. Выделение столичных городов обусловлено особенностями состава и структуры жилого фонда, а также социальными факторами. В целом, облучение радоном в многоэтажных городских зданиях России, как по средней величине (среднее арифметическое 25 Бк/м^3), так и диапазону значений (прогнозируемая доля зданий с ОА радона выше $100 \text{ Бк/м}^3 - 0,4\%$), является невысоким. Превышение норматива по ЭРОА радона могут ожидать в отдельных зданиях, построенных с использованием строительных материалов с высоким содержанием Ra-226 и низкой кратностью воздухообмена. В частности, такие здания, относящиеся к повышенному классу энергоэффективности, были выявлены в г. Екатеринбурге [13]. В других городах также наблюдается тенденция увеличения ОА радона в новых зданиях [14, 15].

Для оценки ЭРОА радона следует принять некоторые допущения о величине коэффициента равновесия. Для крупных российских городов, расположенных в зоне континентального климата, можно предполагать, что коэффициент равновесия близок к 0,5. В этом случае среднее значение среднегодовой ЭРОА радона в многоэтажных

городских зданиях составит $12,5 \text{ Бк/м}^3$. Средняя эффективная доза облучения городского населения России, проживающего в многоэтажных зданиях, с учетом коэффициента дозового перехода, рекомендованного МКРЗ [19], составляет $1,1 \text{ мЗв}$ в год.

В работе [20] проведен анализ данных о результатах измерения ОА радона в жилых зданиях России по данным Федерального банка данных с учетом количества зданий различного типа. Было получено, что средняя ОА радона по этим данным составляет 48 Бк/м^3 . Принимая во внимание результаты настоящего исследования и долю городского населения ($74,7\%$), можно предварительно оценить среднюю ОА радона в малоэтажных домах примерно 115 Бк/м^3 . Эта оценка совпадает с результатами дополнительных измерений ОА радона в небольшом количестве малоэтажных жилых зданий, попавших в наше исследование.

Значительную часть зданий, возведенных после 2000 г., составляют дома повышенных классов энергоэффективности. В этих зданиях применены специальные инженерно-конструкторские решения, снижающие воздухопроницаемость оболочки здания и теплопотери. В таких зданиях за счет пониженной кратности воздухообмена в пассивном режиме эксплуатации происходит относительное увеличение ОА радона. Как показано в публикации [14], в зданиях с повышенной энергоэффективностью ОА радона в 1,2–2,4 раза выше, чем в зданиях типовых многоквартирных конструкций XX в. Энергоэффективные здания вносят свой вклад в увеличение ОА радона в группе домов, возведенных после 2000 г., практически во всех городах (см. табл. 1). Тенденция роста облучения населения России радоном в новых зданиях требует внимания с точки зрения соблюдения санитарно-гигиенических нормативов и принципа оптимизации радиационной безопасности.

Выводы

1. По данным выборочного радонового обследования представительной выборки квартир в многоэтажных многоквартирных зданиях средняя ОА радона в этом типе жилищ в России составляет 25 Бк/м^3 .
2. Облучение радоном и ДПР городского населения, проживающего в квартирах многоэтажных зданий, является, в целом, невысоким. Норматив по ЭРОА радона в этих зданиях может превышать при условии низкой кратности воздухообмена и высокой удельной активности Ra-226 в строительных материалах.
3. Тенденция роста облучения населения в новых зданиях вследствие внедрения строительных технологий, повышающих энергоэффективность зданий, требует внимания при реализации мероприятий по обеспечению радиационной безопасности населения России.
4. Полученные результаты могут быть использованы для планирования стратегии защиты населения России от облучения радоном в жилищах.

Авторы выражают благодарность жителям городов России, принявшим активное участие в проведении измерений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00191).

Литература

1. Лекомте Ж.-Ф., Соломон С., Такала Дж., и др. Радиологическая защита от облучения радоном. Под ред. М.В. Жуковского, И.В. Ярмошенко, С.М. Киселева / Перевод публикации 126 МКРЗ. Москва: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2015. 92 с.
2. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
3. SSG-32. Specific Safety Guide. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Vienna: IAEA, 2015. 112 p.
4. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33 (IAEA/AQ/33). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 35 p.
5. Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., и др. Сравнительный анализ способов формирования выборки жилищ для проведения радонового исследования территории // АНРИ. 2017. Т. 4, № 91. С. 36-44.
6. Cinelli G., De Cort M., Tollefsen T. et al. European Atlas of Natural Radiation. Publications Office of the European Union, Luxembourg; 2019. JRC116795.
7. Miles J.C.H., Howarth C.B., Hunter N. Seasonal variation of radon concentrations in UK homes // Journal of Radiological Protection. 2012;32: 275-287.
8. Daraktchieva Z. New Correction Factors Based on Seasonal Variability of Outdoor Temperature for Estimating Annual Radon Concentrations in UK // Radiation Protection Dosimetry. 2016;175: 65-74.
9. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия. Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
10. Кононенко Д.В. Анализ распределений значений объемной активности радона в воздухе помещений в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2019. Том 12, № 1. С. 85-103.
11. Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Ахматдинов Р.Р., и др. Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 110-119.
12. Оценка численности постоянного населения на 1 января 2020 года и в среднем за 2019 год. Росстат. URL: (<https://www.gks.ru/storage/mediabank/Popul2020.xls>) (Дата обращения: 13.03.2020).
13. Васильев А.В., Ярмошенко И.В., Жуковский М.В. Радоновая безопасность современных многоэтажных зданий различных классов энергетической эффективности // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 80-84.
14. Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., et al. Radon concentration in conventional and new energy efficient multi-storey apartment houses: results of survey in four Russian cities // Scientific Reports. 2020. Т. 10. С. 18136.
15. Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., и др. Сравнительный анализ накопления радона в зданиях различного класса энергоэффективности на примере пяти российских городов // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 2. С. 47-56.
16. Мостафа М.Ю., Жуковский М.В., Васянович М.Е. Прототип первичного эталона объемной активности радона // АНРИ. 2017. Т. 3, № 90. С. 2-15.
17. Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Роль искажающих факторов в радоновом эпидемиологическом исследовании // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 65-75.
18. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Onishchenko A. Seasonal variation of radon concentrations in Russian residential high-rise buildings // Atmosphere. 2021. No 12. P. 930.
19. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137 // Ann. ICRP. 2017. Vol. 46, No 3/4.
20. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Восстановление формы и параметров распределения объемной активности радона в жилищах России на основе данных 4-ДОЗ // АНРИ. 2015. Т. 3, № 82. С. 41-46.

Поступила: 03.08.2021 г.

Жуковский Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, директор Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук. **Адрес для переписки:** 620990, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: ivy@esko.uran.ru

Онищенко Александра Дмитриевна – кандидат биологических наук, ученый секретарь Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Малиновский Георгий Петрович – кандидат биологических наук, заместитель директора Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Васильев Алексей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий радиационной лабораторией Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Назаров Евгений Игоревич – младший научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской Академии наук, Екатеринбург, Россия

Для цитирования: Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Назаров Е.И. Оценка уровней содержания радона в многоэтажных зданиях на примере восьми крупных городов России // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 47-58. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-47-58

Assessment of radon levels in multistorey buildings on example of eight Russian cities

Mikhail V. Zhukovsky, Ilya V. Yarmoshenko, Aleksandra D. Onishchenko, Georgy P. Malinovsky, Aleksey V. Vasilyev, Evgeniy I. Nazarov

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

In this work, the results of radon concentration measurements in samples of multi-storey apartment buildings in eight large cities of Russia are analyzed. Two samples, depending on the year of construction of the building — before and after 2000, were formed in each city on the basis of a quasi-random approach. Radon concentration measurements were performed using radon radiometers equipped with the CR-39 solid-state nuclear track detector. In the flats of multi-storey buildings, two radiometers were installed and flat's average radon concentration was calculated. The exposure period for the radon radiometers was three months. To estimate the average annual radon concentration, seasonal coefficients calculated for the primary radon entry from building materials were used. In total, radon concentration measurements were carried out in 1032 flats. It was assumed that the combined sample for the cities of Ekaterinburg, Krasnodar, Nizhny Novgorod, Novosibirsk, Tyumen, and Chelyabinsk is representative for the multi-storey buildings in non-capital cities of Russia. The following arithmetic mean annual radon concentrations were obtained in samples of houses built up before and after 2000, respectively: Moscow — 17 and 21 Bq/m³; St. Petersburg — 15 and 25 Bq/m³, the group of non-capital cities — 25 and 31 Bq/m³. Taking into account the contribution of each group of buildings to the general urban housing stock, the parameters characterizing the radon concentration in multi-storey multi-apartment urban buildings in Russia were calculated as follows: arithmetic mean 25 Bq/m³; geometric mean 21 Bq/m³; the geometric standard deviation is 1.81. In general, exposure to indoor radon in multi-storey urban buildings in Russia is low both in terms of average value and range of concentrations. There is a tendency towards an increase in indoor radon exposure of the population in new buildings, which is associated with the introduction of construction technologies that increase the energy efficiency of buildings.

Key words: radon, survey, radiological protection, cities, multi-storey buildings.

References

1. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Ann. ICRP*. 2014;43(3).
2. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon. From fundamental research to the regulatory practice. Publishing of the GNC FMBC after A.I. Burnazyan: Moscow; 2016. 450 p. (In Russian).
3. SSG-32. Specific Safety Guide. Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation. Vienna: IAEA; 2015. 112 p.
4. National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings. Review of Methodology and Measurement Techniques. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33 (IAEA/AQ/33). Vienna: International Atomic Energy Agency; 2013. 35 p.
5. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Comparison of approaches to obtain a sample of dwellings for radon survey. *ANRI = ANRI*. 2017;3(91): 36-44. (In Russian)
6. Cinelli G, De Cort M, Tollefsen T, et al. European Atlas of Natural Radiation. Publications Office of the European Union, Luxembourg; 2019: JRC116795.
7. Miles JCH, Howarth CB, Hunter N. Seasonal Variation of Radon Concentrations in UK Homes. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32: 275-287.
8. Daraktchieva Z. New Correction Factors Based on Seasonal Variability of Outdoor Temperature for Estimating Annual Radon Concentrations in UK. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;175: 65-74.
9. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2018. 432 p. (In Russian).
10. Kononenko DV. Analysis of distributions of indoor radon concentrations in the regions of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 85-103 (In Russian).
11. Barkovsky AN, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Bratilova AA, Zhuravleva VE, et al. The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(4): 110-119 (In Russian).
12. Estimated resident population as of January 1, 2020 and on average for 2019. Rosstat. Available on: <https://www.gks.ru/stor-age/mediabank/Popul2020.xls> [Accessed: March 13, 2020].
13. Vasilyev AV, Yarmoshenko IV, Zhukovsky MV. Radon safety of modern multi-storey buildings with different energy efficiency classes. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 80-84 (In Russian).
14. Yarmoshenko IV, Onishchenko AD, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Nazarov EI, Zhukovsky MV. Radon Concentration in Conventional and New Energy Efficient Multi-Storey Apartment Houses: Results of Survey in Four Russian Cities. *Scientific Reports*. 2020;10: 18136.
15. Yarmoshenko IV, Onishchenko AD, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Nazarov EI, Zhukovsky MV. Comparative analysis of radon concentrations in buildings of different energy efficiency classes on example of five Russian cities. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(2): 47-56 (In Russian).
16. Mostafa YA, Zhukovsky M, Vasyanovich M. Prototype of the Primary Standard of Radon Concentration. *ANRI = ANRI*. 2017;3(90): 2-15 (In Russian).
17. Onishchenko AD, Zhukovsky MV. The role of confounding factors in a radon epidemiological study. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 65-75 (In Russian).

Ilya V. Yarmoshenko

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Address for correspondence: Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620990, Russia; E-mail: ivy@ecko.uran.ru

18. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Onishchenko A. Seasonal Variation of Radon Concentrations in Russian Residential High-Rise Buildings. *Atmosphere*. 2021;12: 930.
19. ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP*. 2017; 46(3/4).
20. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovsky M. Reconstruction of indoor radon distribution pattern and its parameters in Russia using data of 4-DOZ reports. *ANRI = ANRI*. 2015;3(82): 41-46 (In Russian).

Received: August 08, 2021

Mikhail V. Zhukovsky – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

For correspondence: Ilya V. Yarmoshenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Director, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Sofia Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620990, Russia; E-mail: ivy@ecko.uran.ru)

Aleksandra D. Onishchenko – Candidate of Biological Sciences, Scientific Secretary, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Georgy P. Malinovsky – Candidate of Biological Sciences, Deputy Director, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Aleksey V. Vasilyev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Radiation Laboratory, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Evgeniy I. Nazarov – Junior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

For citation: Zhukovsky M.V., Yarmoshenko I.V., Onishchenko A.D., Malinovsky G.P., Vasilyev A.V., Nazarov E.I. Assessment of radon levels in multistory buildings on example of eight Russian cities. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1. pp. 47-58. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-47-58

Оценка радиационного риска, обусловленного проведением медицинских исследований в Российской Федерации с учетом половозрастного состава пациентов

В.Ю. Голиков

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

Целью исследования являлась разработка методологии, позволяющей с использованием пожизненных коэффициентов риска радиогенного рака и половозрастного распределения пациентов, характерного для различных медицинских исследований, оценивать коллективный радиационный риск, обусловленный как отдельными рентгенорадиологическими исследованиями, так и медицинским облучением в целом в Российской Федерации. Методология основана на использовании коэффициентов пожизненного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни при облучении органов риска для российской и комбинированной популяции и результатах исследования типичных доз облучения пациентов, характерных для различных медицинских технологий в Российской Федерации. Показано, что оценка коллективного радиационного риска отдельных медицинских исследований, выполненная с использованием пожизненных коэффициентов риска, органных доз и распределений пациентов по возрасту и полу, может до порядка величины отличаться от оценки риска, основанной на эффективной дозе и номинальном коэффициенте риска. Разница же в оценках коллективного радиационного риска за счет медицинского облучения населения в Российской Федерации этими двумя методами в 2018 г. достигала 2,5 раз.

Ключевые слова: медицинские исследования, пациенты, радиационный риск, номинальные коэффициенты риска, эффективная доза.

Введение

До последнего времени Международная комиссия по радиологической защите¹ (МКРЗ) не рекомендовала использовать эффективную дозу для определения радиационных рисков при медицинском использовании ионизирующего излучения [1]. Применение эффективной дозы при медицинском облучении МКРЗ ограничивала сравнением доз:

- при выполнении различных диагностических исследований;
- при использовании одинаковых медицинских технологий и протоколов в различных медицинских организациях или странах;
- при использовании различных медицинских технологий и протоколов в рамках проведения одного медицинского исследования, так как для этих целей малоприменимы являются такие измеряемые дозовые параметры, как произведение дозы на площадь (рентгенография,

рентгеноскопия) или произведение дозы на длину сканирования (компьютерная томография). При таких сравнениях также предполагается, что состав выборок пациентов в отношении их возраста и пола аналогичен.

Однако в своей недавней Публикации 147 МКРЗ признала, что, учитывая неопределенности оценки риска при воздействии малых доз, эффективную дозу с учетом поправок на вариации риска в зависимости от возраста и пола пациентов можно использовать для грубой оценки (approximate indicator of possible risk) возможного радиационного риска [2]. Собственно попытка реализовать на практике этот подход для более корректной оценки коллективного радиационного риска как отдельных медицинских исследований (медицинских технологий), так и всего медицинского облучения в Российской Федерации и являлась предметом настоящего исследования. В случае медицинского облучения это тем более актуально, потому что оно является самым большим управляемым техно-

¹ Официальный сайт Международной комиссии по радиологической защите: <https://www.icrp.org> [Official website of the International Commission on Radiological Protection: <https://www.icrp.org>]

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

генным источником радиационного риска для населения Российской Федерации. Так, суммарная коллективная эффективная доза населения Российской Федерации за 1986–2019 гг. вследствие такой техногенной катастрофы, как Чернобыльская авария, оценивалась значением ~15000 чел.-Зв [3], в то время как коллективная доза от медицинского облучения только в одном 2019 г. составляла ~80000 чел.-Зв [4]. Среднее значение годовой эффективной дозы в 2019 г. в населенных пунктах Российской Федерации с поверхностной активностью цезия-137 более 37 кБк·м⁻² составило ~0,09 мЗв. Это меньше, чем эффективная доза, обусловленная рентгенографией легких (2 проекции). Всего лишь 10% снижение годовой коллективной дозы от медицинского облучения будет эквивалентно половине коллективной дозы от облучения радиоактивными выпадениями населения Российской Федерации после Чернобыльской аварии. Также понятно, что любое уточнение коллективной дозы населения от медицинского облучения имеет большое значение в системе управления радиационными рисками.

Цель исследования – оценка корректирующих факторов к значениям радиационного риска, получаемым на основе эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска, для более адекватного определения коллективных радиационных рисков как за счет отдельных медицинских исследований, так и для всего медицинского облучения населения в Российской Федерации.

Материалы и методы

Характер возрастной зависимости радиационного риска онкологической заболеваемости различен для разных органов. Так, например, для желудка и щитовидной железы наблюдается достаточно выраженный спад значений радиационного риска онкологической заболеваемости с возрастом, в то время как для красного костного мозга он менее выражен, а для легких и пищевода наблюдается максимум риска в возрасте 45 и 75 лет соответственно [5]. Отсюда следует, что для корректного расчета коллективного риска за счет выполнения тех или иных медицинских исследований нужно знать возрастной состав пациентов.

В настоящее время систематические данные о половозрастном распределении пациентов при прохождении ими медицинских исследований в Российской Федерации труднодоступны. В качестве таких данных в настоящей работе были использованы европейские статистические данные [6]. Европейский половозрастной состав пациентов использовали в соответствии со структурой медицинских исследований в Российской

Федерации, оцененной нами на основании данных статистического наблюдения за дозами облучения граждан² (далее форма 3-ДОЗ) и представленной следующими медицинскими технологиями: флюорография, рентгенография, рентгеноскопия, компьютерная томография, специальные рентгенологические исследования. Для флюорографии использовали половозрастной состав пациентов из Европы, соответствующий рентгенографии легких, с поправкой на то, что в РФ флюорографию начинают делать с 14 лет. Рентгенография была представлена исследованиями черепа, органов грудной клетки (ОГК), шейного отдела позвоночника (ШОП), грудного отдела позвоночника (ГОП), поясничного отдела позвоночника (ПОП), брюшной полости (БП) и таза; компьютерная томография – исследованиями черепа, грудной клетки и БП; рентгеноскопия (РС) – исследованиями пищевода, пищевода и желудка, кишечника; специальные исследования – интервенционными исследованиями (ИИ) сосудов сердца. Медицинские исследования указанных отделов организма в рамках каждой из рассматриваемых медицинских технологий, согласно данным формы 3-ДОЗ для РФ за 2018 г., дают вклад в коллективную дозу медицинского облучения от 52% (исследования сосудов сердца) до 96% (рентгеноскопия). На рисунках 1 и 2 в качестве примера представлены возрастные распределения пациентов, усредненные по полу, подвергающихся рентгенографическим и КТ-исследованиям различных отделов организма.

Дозиметрическая модель каждого из исследований была представлена типичным набором физико-технических и геометрических параметров, собранных нами ранее в медицинских организациях РФ [7–10] и, где это было необходимо, заимствованных из литературы [11–14]. Значения органных и эффективных доз для этих исследований были рассчитаны с использованием компьютерных программ PCXMC 2.0 [15] и EDEREX [16] для рентгенографии, рентгеноскопии и интервенционных исследований и NCICT 2.01 [17] для компьютерной томографии. Типичные значения эффективных доз, опубликованные нами ранее³, представлены в таблице 1.

Пожизненный радиационный риск смерти с учетом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания у пациента пола *G* из возрастного интервала *A* (лет) и наследственного заболевания его потомков оценивался на основе поглощенных доз в органах и тканях, обусловленных проведением медицинского исследования, и значений коэффициентов пожизненного радиационного риска при облучении отдельных органов и тканей пациента по формуле (1) («золотой стандарт»):

² Приказ Росстата от 16.10.2013 г. № 411 «Об утверждении статистического инструментария для организации Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием территорий, профессиональными заболеваниями (отравлениями), дозами облучения». [Order of Rosstat from 10/16/2013 № 411 “On approval of statistical instruments for the organization of the Federal Service for Supervision in the Sector of Consumer Rights Protection and the Welfare of the Federal Statistical Observation of the sanitary condition of territories, professional diseases (poisoning), doses of irradiation (In Russ.)]

³ МР 2.6.1.0215-20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 21.09.2020 г.). [Methodical Recommendation (MR) 2.6.1.0215-20 “Assessment of radiation risk of patients during radiological examinations”. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 21.09.2020). (In Russ.)]

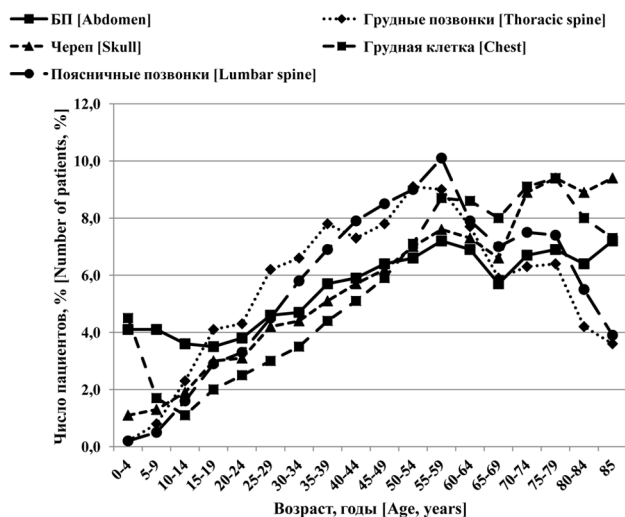


Рис. 1. Возрастные распределения пациентов при выполнении рентгенографии
[Fig. 1. Age distribution of patients undergoing plain radiography]

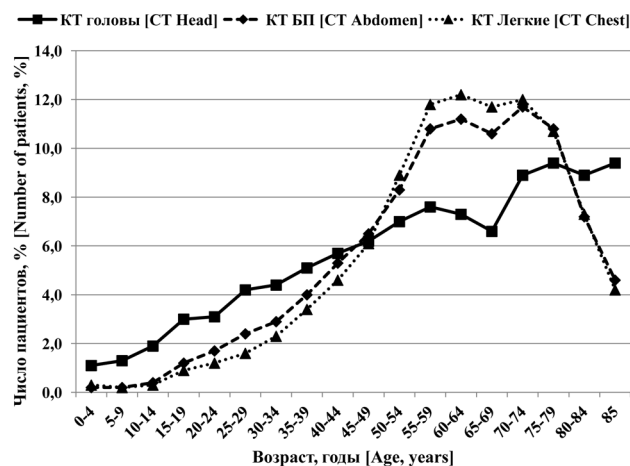


Рис. 2. Возрастные распределения пациентов при выполнении КТ-исследований
[Fig. 2. Age distribution of patients undergoing CT examinations]

Типичные значения эффективных доз (мЗв) при выполнении медицинских исследований в РФ

Таблица 1

Typical values of effective doses (mSv) for the medical examinations performing in the Russian Federation

[Table 1]

Исследование [Examination]	Возрастная категория, лет [Age, years]				
	0–4	5–9	10–14	15–19	Взрослые [Adults]
Рентгенография [Plain radiography]					
Череп [Skull]	0,04	0,04	0,03	0,05	0,07
ШОП [Cervical spine]	0,08	0,10	0,10	0,13	0,15
ГОП [Thoracic spine]	0,27	0,40	0,45	0,61	0,84
ОГК [Chest]	0,06	0,08	0,08	0,12	0,17
ПОП [Lumbar spine]	0,33	0,52	0,57	1,12	1,90
БП [Abdomen]	0,22	0,34	0,45	0,78	1,14
Таз [Pelvis]	0,21	0,43	0,52	0,61	0,79
Флюорография [Fluorography]					
Цифровая [Digital]				0,04	0,04
Пленочная [Film]				0,37	0,37
ИИ [Interventional examination]					
Исследование сосудов сердца [Cardiac angiography]	5,25	4,58	6,60	13,00	19,20
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]					
РС желудка [Ba meal]			0,98	1,29	1,84
РС пищевода [Ba follow]	0,88	0,74	1,06	3,92	8,00
РС кишечника [Ba enema]			1,00	4,72	10,40
Компьютерная томография [CT]					
КТ Голова [CT Head]	1,59	1,63	1,55	2,08	1,90
КТ ОГК [CT Chest]	2,60	2,77	3,17	4,32	5,16
КТ ОБП [CT Abdomen]	5,72	5,81	6,32	6,90	7,10

$$R_A^G = \sum_O D_A^G(O) \cdot r_A^G(O) \quad (1)$$

где: R_A^G – пожизненный радиационный риск смерти с учётом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания у пациента пола G из возрастного интервала A (лет) и наследственного заболевания его потомков вследствие проведения радиологического исследования, отн. ед.;

$D_A^G(O)$ – поглощенная доза в органе O у пациента пола G при облучении в возрастном интервале A (лет) вследствие проведения радиологического исследования, мГр;

$r_A^G(O)$ – коэффициент пожизненного радиационного риска смерти, с учётом вреда от снижения качества жизни при облучении органа O дозой 1 мГр у лица пола G из возрастного интервала A (лет), мГр⁻¹.

Для расчета рисков R_A^G по формуле (1) использовались значения поглощенных доз в органах, которые рассчитывались, как указывалось выше, с использованием компьютерных программ РСХМС 2.0, EDEREX и NCIST 2.01. Коэффициенты пожизненного радиационного риска смерти с учётом вреда от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания различных органов и тканей после их облучения дозой 1 мГр для мужчин и женщин из разных возрастных интервалов на момент облучения были заимствованы для российской популяции из МР 2.6.1.0098-15⁴, а для композитной популяции из работ [5,18]. Значения рисков R_A^G для мужчин и женщин для 30 основных медицинских исследований разных категорий приведены в МР 2.6.1.0215-20.

Расчет корректирующих факторов $K_{иссл}$ к значениям радиационного риска, полученным на основе эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска, проводился следующим образом:

Рассчитывали значения возрастных корректирующих факторов $K_A^{иссл}$, связанных с проведением рентгенологического исследования, для пациентов из всех возрастных интервалов A :

$$K_A^{иссл} = \frac{[R_A^M \cdot f_A^M + R_A^F \cdot f_A^F]}{5,7 \cdot 10^{-5} \cdot E_A \cdot [f_A^M + f_A^F]}, \text{отн.ед.} \quad (2)$$

$$\sum_A [f_A^M + f_A^F] = 1$$

где: R_A^M – пожизненный радиационный риск смерти с учётом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания у пациента мужского пола из возрастного интервала A (лет) и наследственного заболевания его потомков вследствие проведения радиологического исследования, отн. ед. (МР 2.6.1.0215-20);

R_A^F – пожизненный радиационный риск смерти с учётом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания у пациента женского пола из возрастного интервала A (лет) и наследственного заболевания его потомков вследствие проведения радиологического исследования, отн. ед. (МР

2.6.1.0215-20);

E_A – эффективная доза у пациента из возрастного интервала A (лет), мЗв;

$5,7 \cdot 10^{-5}$ мЗв⁻¹ – номинальный коэффициент риска для всего населения;

f_A^M – доля пациентов мужского пола в возрастном интервале A [6];

f_A^F – доля пациентов женского пола в возрастном интервале A [6].

Рассчитывали значение корректирующего фактора $K_{иссл}$ для данного рентгенологического исследования как средневзвешенную по доле пациентов обоих полов в возрастной группе A сумму возрастных корректирующих факторов $K_A^{иссл}$:

$$K_{иссл} = \sum_A \frac{[R_A^M \cdot f_A^M + R_A^F \cdot f_A^F]}{5,7 \cdot 10^{-5} \cdot E_A \cdot [f_A^M + f_A^F]} \cdot [f_A^M + f_A^F] =$$

$$= \sum_A \frac{[R_A^M \cdot f_A^M + R_A^F \cdot f_A^F]}{5,7 \cdot 10^{-5} \cdot E_A} \quad (3)$$

С использованием вышеописанной методологии, были рассчитаны значения корректирующих факторов, позволяющих, с учетом половозрастных распределений пациентов, оценить радиационный риск, обусловленный выполнением различных рентгенологических исследований.

Результаты и обсуждение

В качестве примера, иллюстрирующего методику расчета, определим значение корректирующего фактора при проведении КТ органов грудной клетки (ОГК). На рисунке 3 в графическом виде представлены результаты расче-

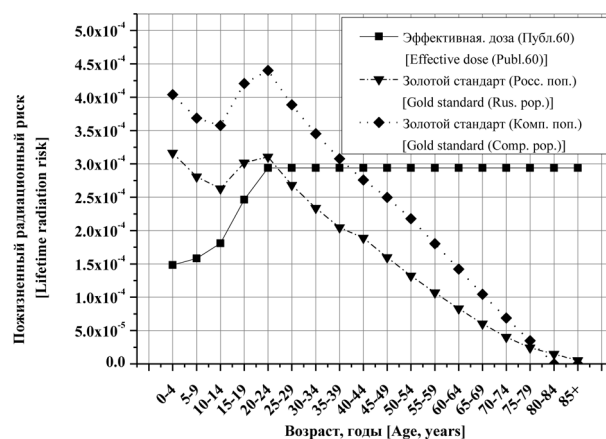


Рис. 3. Зависимость от возраста значения пожизненного радиационного риска, рассчитанного для российской и композитной популяции, согласно «золотому стандарту» и эффективной дозе с номинальным коэффициентом риска при проведении КТ ОГК

[Fig. 3. Age dependence of the lifetime radiation risk due to the Chest CT calculated for the Russian and Composition population according to the "gold standard" and effective dose]

⁴ МР 2.6.1.0098-15 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований», утвержденные Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 06.04.2015 г. [Methodical Recommendation (MR) 2.6.1.0098-15 "Assessment of radiation risk of patients during radiological examinations". Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 06.04.2015). (In Russ.)]

та зависимости от возраста пациента пожизненного радиационного риска, обусловленного проведением КТ ОГК, по формуле (1) для российской и композитной популяции («золотой стандарт») и с помощью эффективной дозы и номинального коэффициента риска. Непосредственно видно, что для российской популяции пожизненный радиационный риск, оцененный с помощью методики «золотого стандарта», превышает аналогичную величину, полученную с помощью эффективной дозы лишь для детей. У всех же взрослых пациентов это соотношение меньше единицы. Для композитной популяции это отношение больше единицы вплоть до возраста 40 лет, и далее с возрастом становится меньше единицы.

Необходимые для расчета корректирующего фактора данные и результат расчета для этого исследования представлены в таблице 2. Использовали распределение пациентов по 5-летним возрастным интервалам [6] и соответствующий каждому возрастному интервалу корректирующий фактор, рассчитанный по формуле (2) (столбцы 2 и 3 таблицы 2) для процедуры КТ ОГК. Общее значение корректирующего фактора для КТ ОГК для российской и композитной популяции рассчитывали по формуле (3).

Таким образом, коллективный радиационный риск от проведения КТ ОГК в Российской Федерации, оцененный

согласно «золотому стандарту» на основе коэффициентов риска, для российской популяции в 3 раза ниже, а на основе коэффициентов риска для композитной популяции – в 2 раза ниже, чем его оценка, выполненная на основе эффективной дозы и номинального коэффициента риска.

Окончательные результаты расчетов значений корректирующих факторов при проведении как отдельных рентгенологических исследований, так и при использовании более широких групп медицинских технологий (флюорография, рентгенография, рентгеноскопия, компьютерная томография) представлены в таблице 3. Переход от значений корректирующих факторов для отдельных рентгенологических исследований к их значениям для более широких групп медицинских технологий осуществлялся путем взвешивания корректирующих факторов отдельных исследований по доле их вклада в коллективную дозу соответствующей медицинской технологии с использованием данных формы 3-ДООЗ для России за 2018 г.

Видно, что абсолютные значения корректирующих факторов практически для всех рентгенологических исследований меньше единицы как для российской, так и для композитной популяции. Это связано, в основном, с тем, что возрастной состав пациентов смещен в сторону пожилых людей, для которых коэффициент риска меньше

Исходные данные и результаты расчета значения корректирующего фактора при проведении КТ ОГК

Таблица 2

[Table 2]

[Initial data and results of the calculation of the correction factor value for the Chest CT]

Возрастная группа (A), годы [Patient age group (A), years]	$K_A^{иссл}$, (Российская популяция) [K_A^{exam} , Russian population]	$K_A^{иссл}$, (Композитная популяция) [K_A^{exam} , Composite population]	f_A^M / f_A^F
0–4	1,77	2,38	0,002/0,001
5–9	1,78	2,33	0,001/0,001
10–14	1,26	1,80	0,002/0,001
15–19	1,18	1,66	0,005/0,004
20–24	0,99	1,44	0,007/0,005
25–29	0,87	1,29	0,009/0,007
30–34	0,78	1,16	0,012/0,011
35–39	0,68	1,04	0,018/0,016
40–44	0,64	0,94	0,023/0,023
45–49	0,54	0,84	0,032/0,029
50–54	0,44	0,72	0,050/0,039
55–59	0,35	0,59	0,069/0,049
60–64	0,27	0,46	0,073/0,049
65–69	0,20	0,34	0,068/0,049
70–74	0,13	0,23	0,070/0,050
75–79	0,08	0,12	0,059/0,048
80–84	0,05		0,037/0,036
85+	0,02		0,018/0,024
	$K^{иссл} = 0,32^*$	$K^{иссл} = 0,50^*$	

Таблица 3

Корректирующие факторы к значениям риска, рассчитанным с помощью эффективных доз и номинальных значений коэффициентов риска

[Table 3]

Correction factors to the risk values calculated using effective doses and nominal values of risk coefficients

Исследование [Examination]	Корректирующий фактор (русская популяция) [Correction factor (Russian population)]	Корректирующий фактор (композитная популяция) [Correction factor (Composite population)]
Флюорография [Fluorography]	$K^{Фл}=0,45$ [$K^{Фл}=0,45$]	$K^{Фл}=0,65$ [$K^{Фл}=0,65$]
Рентгенография [Plain radiography]	$K^{РГ}=0,38$ [$K^{РГ}=0,38$]	$K^{РГ}=0,58$ [$K^{РГ}=0,58$]
Чепен [Skull]	0,71	1,00
ОГК [Chest]	0,50	0,74
ШОП [Cervical spine]	0,35	0,44
ГОП [Thoracic spine]	0,64	0,96
ПОП [Lumbar spine]	0,32	0,50
БП [Abdomen]	0,30	0,48
Таз [Pelvis]	0,19	0,32
Интервенционные исследования [Interventional Examinations]	$K^{ИИ}=0,40$ [$K^{ИИ}=0,40$]	$K^{ИИ}=0,60$ [$K^{ИИ}=0,60$]
Коронарная ангиография [Coronary angiography]	0,40	0,60
КТ [CT]	$K^{КТ}=0,41$ [$K^{КТ}=0,41$]	$K^{КТ}=0,58$ [$K^{КТ}=0,58$]
Головы [Head]	0,77	0,93
Грудной клетки [Chest]	0,33	0,51
Брюшной полости [Abdomen]	0,29	0,46
Рентгеноскопия [Fluoroscopy]	$K^{РС}=0,20$ [$K^{РС}=0,20$]	$K^{РС}=0,31$ [$K^{РС}=0,31$]
Пищевода [Ba follow]	0,31	0,44
Пищевода и желудка [Ba meal]	0,28	0,43
Кишечника [Ba enema]	0,09	0,13

номинального, используемого в концепции эффективной дозы. Кроме того, дозы у детей при проведении многих медицинских исследований значительно ниже, чем у взрослых пациентов.

Таким образом, в отличие от оценки индивидуального риска, когда использование эффективной дозы и номинальных коэффициентов риска для молодых пациентов будет приводить к недооценке риска, при расчете коллективного риска рентгенологического исследования, с учетом половозрастного состава пациентов, использование эффективной дозы будет являться консервативной оценкой радиационного риска.

Расчет коллективного риска R у населения РФ за счет всего медицинского облучения с коррекцией на половозрастную зависимость коэффициентов риска, используя данные, содержащиеся в форме 3-ДОЗ, можно выполнить с помощью соотношений:

– при использовании коэффициентов риска для российской популяции:

$$R = 0,057 \cdot (0,45 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{Фл}} + 0,38 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{РГ}} + 0,41 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{КТ}} + 0,20 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{РС}} + 0,40 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{ИИ}}) \quad (4)$$

– при использовании коэффициентов риска для композитной популяции:

$$R = 0,057 \cdot (0,65 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{Фл}} + 0,58 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{РГ}} + 0,58 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{КТ}} + 0,31 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{РС}} + 0,60 \cdot E_{\text{колл}}^{\text{ИИ}}) \quad (5)$$

где: R – коллективный пожизненный радиационный риск смерти с учетом вреда для здоровья от снижения качества жизни по причине онкологического заболевания и наследственного заболевания потомков; $E_{\text{колл}}^{\text{Фл}}$, $E_{\text{колл}}^{\text{РГ}}$, $E_{\text{колл}}^{\text{КТ}}$, $E_{\text{колл}}^{\text{РС}}$, $E_{\text{колл}}^{\text{ИИ}}$ – коллективные эффективные дозы от использования различных медицинских технологий, чел.-Зв; $0,057 \text{ Зв}^{-1}$ – номинальный коэффициент риска для всего населения.

Используя формулы (4) и (5) и данные о коллективных эффективных дозах за счет использования отдельных медицинских технологий из формы 3-ДОЗ РФ за 2018 г., легко показать, что коллективный риск за счет выполнения медицинских исследований в РФ в 2018 г. будет в 2,5 раза меньше по сравнению с его оценкой на основании использования эффективной дозы с номинальным коэффициентом риска, если использовать коэффициенты риска для российской популяции, и в 1,7 раза меньше, если использовать коэффициенты риска для композитной популяции.

Заключение

Разработан подход, позволяющий с учетом зависимости коэффициентов риска радиогенного рака от пола и возраста пациента и половозрастного распределения пациентов для различных медицинских исследований оценивать коллективный риск от проведения как отдельных рентгенорадиологических медицинских исследований, так и медицинского облучения населения в целом в Российской Федерации.

Литература

1. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ. И.А. Гусева ; под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
2. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147 // Ann. ICRP. 2021. Vol. 50, No 1.
3. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., и др. Средние накопленные за 1986-2016 годы эффективные дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, отнесенных к зонам радиоактивного загрязнения по постановлению Правительства Российской Федерации от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении Перечня населенных пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 2. С. 57–105.
4. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р., и др. Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2019 г. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 110–119. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-110-119.
5. Wall B.F., Haylock R., Jansen J.T.M., et al. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of the Age and Sex of the Patient. Report HPA-CRCE-028. Chilton: Health Protection Agency; 2011. 66 p.
6. Medical Radiation Exposure of the European Population. Part 1/2. Radiation protection № 180. European Commission; 2014. 181 p.
7. Голиков В.Ю., Сарычева С.С., Балонов М.И., Кальницкий С.А. Оценка доз облучения пациентов при проведении интервенционных рентгенологических исследований // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 3. С. 26–31.
8. Голиков В.Ю., Балонов М.И., Кальницкий С.А., и др. Уровни облучения пациентов при проведении рентгенологических исследований в Санкт-Петербурге и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 1. С. 5–13.
9. Братилова А.А., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А. Уровни облучения пациентов при проведении рентгеновской компьютерной томографии в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 33–38.
10. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., и др. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 67–79.
11. Yakoumakis E., Dimitriadis A., Gialousis G., et al. Evaluation of organ and effective doses during paediatric barium meal examinations using PCXMC 2.0 Monte Carlo code // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 163, No 2. P. 202–209. DOI: 10.1093/rpd/ncu174.
12. Damilakis J., Stratakis J., Raissaki M., et al. Normalized dose data for upper gastrointestinal tract contrast studies performed to infants // Medical Physics. 2006. Vol. 33, No 4. P. 1033–1040. DOI: 10.1118/1.2181297.
13. Livingstone R.S., Eapen A., Chiramel G.K. Radiation dose to paediatric patients undergoing fluoroscopic examinations performed using digital imaging system // Radiography. 2008. Vol. 14, No 1. P. 17–23. DOI: 10.1016/j.radi.2006.06.004.
14. Weir K.A., McMahon, S.M., Long G., et al. Radiation doses to children during modified barium swallow studies // Pediatric Radiology Journal. 2007. Vol. 37, No 3. P. 283–290. DOI: 10.1007/s00247-006-0397-6.
15. Tapiovaara M., Siiskonen T. PCXMC. A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations (2nd Ed.). STUK-A231 Report. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 2008. 49 p.
16. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, No 2. P. 223–234. DOI: 10.1093/rpd/ncx102.
17. Lee C., Kim K.P., Bolch W.E., et al. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans // Journal of Radiological Protection. 2015. Vol. 35, No 4. P. 891–909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891.
18. Ivanov V.K., Tsyb A.F., Mettler F.A., et al. Methodology for estimating cancer risks of diagnostic medical exposure: with an example of the risks associated with computed tomography // Health Physics. 2012. Vol. 103, No 6. P. 732–739. DOI: 10.1097/HP.0b013e31825c179f.

Поступила: 28.07.2021 г.

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

Для цитирования: Голиков В.Ю. Оценка радиационного риска, обусловленного проведением медицинских исследований в Российской Федерации с учетом половозрастного состава пациентов // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 59-67. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-59-67

Evaluation of the radiation risk of medical examinations in the Russian Federation taking into account the age and sex distribution of the patients

Vladislav Yu. Golikov

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

The aim of the study was to develop a methodology that allows taking into account the age and sex dependencies of the risk of radiogenic cancer and the age and sex distribution of the patients to evaluate the collective risk due to separate X-ray examinations and medical exposure in the Russian Federation as a whole. Methodology is based on the use of lifetime risk coefficients estimated for the Russian and Composite population and the results of the study of typical doses of patients for various X-ray examinations in the Russian Federation. It is shown that the assessment of the radiation risk of separate X-ray examinations calculated using lifetime age and sex risk coefficients, organ doses and age distributions of patients may differ up to order of magnitude from the risk assessment based on effective dose and nominal risk coefficients. The difference in estimating of the collective risk of total medical exposure in the Russian Federation by these two methods reached 2.5 times in 2018.

Key words: medical examinations, patients, radiation risk, nominal risk coefficients, effective dose.

References

1. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Edited by M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian).
2. Use of dose quantities in radiological protection. ICRP Publication 147. *Ann. ICRP*; 50(1).
3. Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Vlasov AY, Gromov AV, Zhesko TV, et al. The average accumulated effective doses (1986-2016) for the population of the settlements of the Russian Federation attributed to the zones of radioactive contamination according to the Russian Federation government resolution «On the approval of the list of the settlements being in the borders of the zones of radioactive contamination due to the disaster on the Chernobyl NPP» № 1074 from 08.10.2015. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(2): 57–105. (In Russian).
4. Barkovsky AN, Akhmatdinov Ruslan R, Akhmatdinov Rustam R, Biblin AM, Bratilova AA, Zhuravleva VE, et al. The outcomes of functioning of the Unified System of Individual Dose Control of the Russian Federation citizens based on the 2019 data. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(4): 110–9. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-110-119.
5. Wall BF, Haylock R, Jansen JTM, Hillier MC, Hart D, Shrimpton PC. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of the Age and Sex of the Patient. Report HPA-CRCE-028. Chilton: Health Protection Agency; 2011. 66 p.
6. Medical Radiation Exposure of the European Population. Part 1/2. Radiation protection № 180. European Commission; 2014. 181 p.
7. Golikov VYu, Sarycheva SS, Balonov MI, Kalnitsky SA. Estimation of patients exposure under intervention radiological examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(3): 26–31. (In Russian).
8. Golikov VYu, Balonov MI, Kalnitsky SA, Bratilova AA, Sarycheva SS, Shatsky IG, et al. Exposure levels of patients during radiological examinations in St. Petersburg and the Leningrad region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(1): 5–13. (In Russian).
9. Bratilova AA, Golikov VYu, Kalnitsky SA. Exposure levels of patients during computed tomography in medical organizations of Saint-Petersburg and Leningrad region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 33–8. (In Russian).
10. Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA, Kalnitsky SA, Repin VS, Sarycheva SS, et al. Current levels of medical exposure in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 67–79. (In Russian).
11. Yakoumakis E, Dimitriadis A, Gialousis G, Makri T, Karavasilis E, Yakoumakis N, et al. Evaluation of organ and effective doses during paediatric barium meal examinations using PCXMC 2.0 Monte Carlo code. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;163(2): 202–9. DOI: 10.1093/rpd/ncu174.
12. Damilakis J, Stratakis J, Raissaki M, Perisinakis K, Kourbetis N, Gourtsoyannis N, et al. Normalized dose data for upper gastrointestinal tract contrast studies performed to infants. *Medical Physics*. 2006;33(4): 1033–40. DOI: 10.1118/1.2181297.
13. Livingstone RS, Eapen A, Chiramel GK. Radiation dose to pediatric patients undergoing fluoroscopic examinations performed using digital imaging system. *Radiography*. 2008;14(1): 17–23. DOI: 10.1016/j.radi.2006.06.004.
14. Weir KA, McMahon, SM, Long G, Bunch JA, Pandeya N, Coakley KS, et al. Radiation doses to children during modified barium swallow studies. *Pediatric Radiology Journal*. 2007;37(2): 283–90. DOI: 10.1007/s00247-006-0397-6.
15. Tapiovaara M, Siiskonen T. PCXMC. A Monte Carlo program for calculating patient doses in medical x-ray examinations (2nd Ed.). STUK-A231 Report. Helsinki: Radiation and Nuclear Safety Authority; 2008. 49 p.
16. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom ex-

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

- periments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223–34. DOI: 10.1093/rpd/ncx102.
17. Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCIC: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891–909. DOI: 10.1088/0952-4746/35/4/891.
18. Ivanov VK, Tsyb AF, Mettler FA, Menyaylo AN, Kashcheev VV. Methodology for estimating cancer risks of diagnostic medical exposure: with an example of the risks associated with computed tomography. *Health Physics*. 2012;103(6): 732–9. DOI: 10.1097/HP.0b013e31825c179f.

Received: July 28, 2021

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

For citation: Golikov V.Yu. Evaluation of the radiation risk of medical examinations in the Russian Federation taking into account the age and sex distribution of the patients. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1. P. 59-67. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-59-67

Risk assessment based on effective patient radiation doses during multislice spiral computed tomography

Damir A. Zaredinov¹, Marina V. Li²

¹ Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan

² Center for the Development of Professional Qualifications of Medical Workers of the Health Ministry, Tashkent, Republic of Uzbekistan

The scientific article is devoted to the actual problem of modern medicine – the exposure of the public during multislice spiral computed tomography in the Republic of Uzbekistan. For the period 2017–2020 the number of computed tomography procedures increased from 175000 to 375000 (by a factor of 2), there was an increase in the collective dose from computed tomography from 987,5 to 2482,6 man-Sv (2.5 times). During the study the patient effective doses were calculated and the risks were assessed. The research work was carried out in medical institutions on CT units from different vendors. The examination protocols of 1126 adult patients were analyzed. The patient effective doses during MSCT of various anatomical regions were calculated from the DLP value and their comparative assessment was carried out. The radiation risk assessment was carried out on the basis of the effective dose using the nominal ICRP risk coefficients adjusted for age-related radiosensitivity. According to the results of the studies, it was found that when examining the head area, the effective doses of patients ranged from 1.3 ± 0.3 to 1.9 ± 0.2 mSv, the neck area – from 1.3 ± 0.3 to 2.4 ± 0.3 mSv, the chest area – from 5.3 ± 0.7 to 6.6 ± 1.9 mSv, abdomen – from 7.0 ± 1.0 to 8.8 ± 1.6 mSv, small pelvis – from 7.8 ± 1.0 to 10.8 ± 2.5 mSv. The lifetime risk of long-term stochastic effects for the health of a patient from 18 to 65 years old was in the range of 10^{-4} – 10^{-3} . The results of the study showed that the effective doses differ significantly from each other depending on the anatomical area of study of the patients. A person receives the highest doses of radiation when examining the pelvic and abdominal area, and smaller ones when examining the head area. The difference in the values of effective doses in the study of the same anatomical parts of the human body mainly depended on the weight of the patients, the length of the studied anatomical area, the model of the computer tomograph.

Key words: multislice spiral computed tomography, X-ray computed tomography, medical diagnostic radiation; radiation dose of patients, effective dose.

Оценка радиационных рисков облучения пациентов при проведении мультисрезовой спиральной компьютерной томографии на основе эффективных доз

Д.А. Зарединов¹, М.В. Ли²

¹ Министерство здравоохранения Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

² Центр развития профессиональной квалификации медицинских работников Министерства здравоохранения Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

Научная статья посвящена актуальной проблеме современной медицины – оценке радиационного риска пациентов при проведении мультисрезовой спиральной компьютерной томографии в Республике Узбекистан. За период 2017–2020 гг. количество компьютерно-томографических исследований выросло с 175 000 до 375 000 (в 2 раза), выросла и коллективная доза от компьютерной томографии с 987,5 до 2482,6 чел.-Зв (в 2,5 раза). В ходе исследования были рассчитаны эффективные дозы облучения пациентов и оценены риски. Исследования проводились в медицинских учреждениях на компьютерных томографах различных моделей. Были проанализированы протоколы обследования 1126 взрослых пациентов. Эффективные дозы у пациентов мультисрезовой спиральной компьютерной томографии различных анатомических областей рассчитывались по значению

Damir A. Zaredinov

Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan

Address for correspondence: Navoi ul., 4, Shayxontoxurskiy rayon, Tashkent, Uzbekistan, 100004; E-mail: zda_medic@mail.ru

Зарединов Дамир Арифович

Министерство здравоохранения Республики Узбекистан

Адрес для переписки: 100004, Узбекистан, Ташкент, Шайхонтохурский район, ул. Навои, 4; E-mail: zda_medic@mail.ru

DLP. Затем проводилась их сравнительная оценка. Оценка радиационного риска была выполнена на основе эффективной дозы с использованием номинальных коэффициентов риска МКРЗ. По результатам исследований установлено, что при обследовании области головы эффективные дозы пациентов находились в диапазоне от $1,3 \pm 0,3$ до $1,9 \pm 0,2$ мЗв, области шеи — от $1,3 \pm 0,3$ до $2,4 \pm 0,3$ мЗв, области груди — от $5,3 \pm 0,7$ до $6,6 \pm 1,9$ мЗв, живота — от $7,0 \pm 1,0$ до $8,8 \pm 1,6$ мЗв, малого таза — от $7,8 \pm 1,0$ до $10,8 \pm 2,5$ мЗв. Радиационный риск для здоровья взрослых пациентов от КТ-сканирования находился в диапазоне 10^{-4} – 10^{-3} . Результаты исследования показали, что эффективные дозы существенно отличаются друг от друга в зависимости от анатомической области исследования пациентов. Наибольшие дозы радиации человек получает при обследовании области таза и живота, а меньшие — при обследовании области головы. Разница в значениях эффективных доз при исследовании одних и тех же анатомических частей тела человека, в основном, зависела от веса пациентов, длины исследуемой анатомической области, модели компьютерного томографа.

Ключевые слова: мультисрезовая спиральная компьютерная томография, рентгеновский компьютерный томограф, ионизирующее излучение, медицинское диагностическое облучение, доза облучения пациентов, эффективная доза.

Introduction

In Uzbekistan, there is currently a global reassessment of the role of methods of treatment and diagnosis of socially significant diseases in medicine. Diagnostic medical imaging is used in 80–90% of cases. One of the most intensively developing areas of modern health care is X-ray diagnostics, a distinctive feature of which is a high degree of technology, the introduction of digital equipment and information resources for storing and transmitting diagnostic images, as well as the widespread use of tomographic technologies with high visualization accuracy.

Computed tomography (CT) is an X-ray diagnostic technique that is more informative compared to general X-ray examinations. The relevance of this method also lies in the fact that it allows you to quickly and accurately obtain information about the status of internal organs and tissues of the human body [1,2]. In the context of a pandemic of a new coronavirus infection (COVID-19), multislice spiral computed tomography (MSCT) is one of the main methods of early, primary diagnosis of COVID-19 due to the possibility of suggesting a diagnosis of viral pneumonia, differentiating from bacterial, and quickly assessing the extent of lung tissue damage and the degree of the severity of changes [3–7].

MSCT has a number of advantages compared to step-by-step CT: improved image quality, reduced study time, increased signal-to-noise ratio, and decreased patient dose [8]. This examination is becoming more and more popular, which leads to an increase in the contribution of this method to the radiation exposure of the population of all age groups [9,10]. Thus, in the 2008 report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), it was noted that in the United States between 1980 and 2006, the annual effective dose per capita increased from 3,0 mSv to 6,2 mSv. The exposure of the population due to medical procedures has become comparable to the exposure from the natural background radiation. If by 2006 the radiation exposure per capita from medical diagnostic and therapeutic procedures averaged 3,1 mSv, then out of this dose 1,5 mSv falls on computed tomography, i.e. 47,7% [11].

In Uzbekistan, the last decade has been marked by a significant increase in funding for the procurement of medical equipment. The equipment of medical organizations has significantly increased not only quantitatively, but also qualitatively, the equipment with modern medical X-ray computed tomographs has increased. As of the beginning of 2021, 100 CT and MSCT devices are operating in medical institutions of

Введение

Сегодня в Узбекистане происходят большие изменения в практическом здравоохранении, переоцениваются методы диагностики и лечения значимых заболеваний. Медицинская визуализация с целью диагностики используется в 80–90% случаев. Лучевая диагностика является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений современного здравоохранения, её отличительные особенности – это технологичность, внедрение цифровой техники и информационных ресурсов для хранения и передачи изображений, а также широкое распространение томографических технологий с высокой точностью визуализации.

Компьютерная томография (КТ) – это диагностический метод, основанный на использовании рентгеновских лучей, но который более информативен, чем общие рентгенологические исследования. Актуальность этого метода заключается ещё и в том, что он позволяет быстро и точно получить информацию о состоянии внутренних органов и тканей организма человека [1, 2]. В условиях пандемии новой коронавирусной инфекции (COVID-19) мультисрезовая спиральная компьютерная томография (МСКТ) является одним из основных методов ранней первичной диагностики COVID-19 из-за возможности установить диагноз вирусной пневмонии, дифференцируя ее от бактериальной и быстро оценивая степень поражения легочной ткани и степень выраженности изменений [3–7].

МСКТ имеет ряд преимуществ по сравнению с пошаговой КТ: улучшенное качество изображения, сокращение времени исследования, повышенное отношение сигнал/шум и меньшая доза для пациента [8]. Этот метод исследования становится все более популярным, что приводит к увеличению вклада этого метода в дозу облучения населения всех возрастных групп [9, 10]. Так, в отчете Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации (НКДАР ООН) за 2008 г. отмечалось, что в Соединенных Штатах в период с 1980 по 2006 г. годовая эффективная доза на душу населения увеличилась с 3,0 мЗв до 6,2 мЗв. Облучение населения в результате медицинских процедур стало сопоставимым с облучением от естественного радиационного фона. Если к 2006 г. лучевая нагрузка на душу населения от лечебно-диагностических и лечебных процедур составляла в среднем 3,1 мЗв, то из этой дозы 1,5 мЗв приходилось на компьютерную томографию, то есть 47,7% [11].

the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan, of which 39 are in Tashkent. This has led to a large increase in the number of studies. Over the past 4 years, the number of computed tomography procedures has increased from 175 000 in 2017 to 375 000 in 2020 (by a factor of 2). All this has led to a significant increase in both individual and collective exposure doses to the population [12, 13]. These changes are shown in Figure 1.

The radiation doses of patients from diagnostic studies and their consequences for human health have not studied enough. However, the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and the International Atomic Energy Agency (IAEA) declare the postulate that even very small dose of radiation can lead to stochastic effects [14, 15]. Therefore, control and accounting of all radiation doses during these studies is necessary. In addition, it is necessary to calculate the reference diagnostic levels for all age groups when performing research in various medical institutions [16, 17].

Research objectives

1. Calculate effective doses of patients with weight more 50 kg and age from 18 to 65 years.
2. To assess the risks of patients when performing CT scans of various anatomical areas on multislice spiral CT scans.

Materials and methods

Research work was carried out in medical organizations of the Republic of Uzbekistan on various MSCT devices: "Brilliance iCT 256" (USA), "NeuViz 16 Essence" (China), "Optima CT 520" (USA), "Ingenity Core 128" (China), "Revolution Discovery CT" (USA). The tomographs involved in the study were produced in 2016–2020, information about them is presented in Table 1.

CTDIvol and DLP data were collected from CT protocols of various anatomical areas of the patients. In the medical institutions selected for the study, CT diagnostics were performed mainly on patients who had an average weight (50–90 kg) and age from 18 to 65 years. Therefore, at the 1st stage of the work, it was decided to limit the sample of patients with such parameters. In total, data of MSCT were collected from 1 126 adult patients in the following areas of study: head,

В Узбекистане последнее десятилетие отмечается существенный рост объема финансирования для закупок медицинского оборудования. Оснащение медицинских учреждений значительным образом выросло не только количественно, но и качественно, увеличилась оснащенность современными медицинскими рентгеновскими компьютерными томографами. По состоянию на начало 2021 г. в медицинских учреждениях системы Минздрава Республики Узбекистан (РУз) функционируют 100 аппаратов КТ и МСКТ, из них 39 – в г. Ташкенте. Это привело к резкому увеличению количества исследований. За последние 4 года количество процедур компьютерной томографии увеличилось со 175 000 в 2017 г. до 375 000 в 2020 г. (в 2 раза), и в конечном итоге все это привело к значительному увеличению как индивидуальных, так и коллективных доз облучения населения [12, 13]. Данные изменения представлены на рисунке 1.

Лучевые нагрузки от диагностических исследований находятся в пределах малых доз (до 100 мЗв), последствия которых для здоровья человека мало изучены. Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) декларирует постулат, что даже сколь угодно малая доза облучения может привести к стохастическим эффектам [14, 15]. Поэтому контроль и учет дозовых нагрузок при проведении этих исследований необходим. Кроме того, как средство оптимизации проведения радиологических исследований необходимо установление референтных диагностических уровней медицинского облучения [16, 17].

Цель исследования – рассчитать эффективные дозы облучения пациентов и оценить радиационные риски при проведении мультисрезовой спиральной компьютерной томографии в медицинских учреждениях РУз.

Задачи исследования

1. Рассчитать эффективные дозы пациентов весом более 50 кг и возраста от 18 до 65 лет.
2. Оценить риски пациентов при проведении КТ различных анатомических областей.

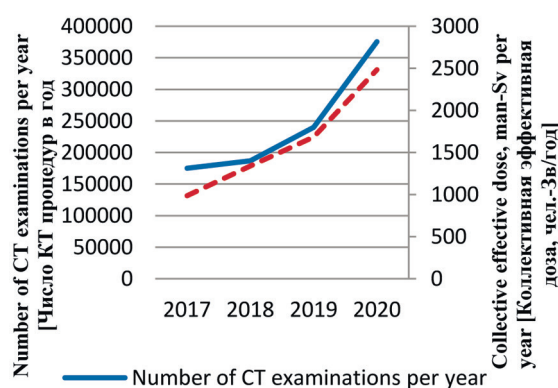


Fig. 1. The trends in number of examinations and contribution to the collective dose from computed tomography in the Republic of Uzbekistan in 2017–2020 according to reports of the Health Ministry

[Рис. 1. Динамика изменения числа процедур и изменение вклада в коллективную дозу компьютерной томографии в Республике Узбекистан за период 2017–2020 гг. согласно отчетам Минздрава]

Information about computed tomographs included in the study

Table 1

Информация о компьютерных томографах, включенных в исследование

[Таблица 1]

№	Manufacture [Производитель]	MSCT model [Модель МСКТ]	Number of slices [Количество срезов]	Year of manufacture [Год выпуска]
1	«Philips»	«Brilliance iCT 256»	256	2016
2	«Neusoft Medical System Co., Ltd»	«NeuViz 16 Essence»	128	2017
3	«General Electric»	«Optima CT 520»	128	2018
4	«Philips Medical System, Inc.»	«Ingenety Core 128»	128	2019
5	«General Electric»	«Revolution Discovery CT»	256	2020

neck, chest, abdomen, pelvis. Information on the number of patients examined with a single scan of MSCT, depending on the scan area, is given in Table 2.

To calculate the dose received by patients during MSCT, the values of specific dosimetric indicators – CTDI and DLP were used [18, 19].

For MSCT, the effective dose (ED) is a calculated indicator of the DLP value. The effective dose is calculated as follows:

$$E = DLP \times k \text{ (mSv)}, \quad (1)$$

where: k is the dose factor for a specific anatomical area, mSv/(mGy.cm), standardized for the DLP value in the standart phantom.

Since there are currently no approved such methods in the Republic of Uzbekistan, the calculation of effective doses was carried out according to the approved methods of the Russian Federation^{1,2}. The assessment of the mean (standard) effective dose for a sample of patients was carried out in accordance with ICRP Publication No. 60 [20]. The radiation risk assessment was carried out on the basis of the effective dose value in accordance with the approved guidelines of the Russian Federation³.

Материалы и методы

Научно-исследовательская работа проводилась в медицинских учреждениях РУЗ на аппаратах МСКТ моделей: «Brilliance iCT 256» (США), «NeuViz 16 Essence» (Китай), «Optima CT 520» (США), «Ingenety Core 128» (Китай), «Revolution Discovery CT» (США). Томографы, участвовавшие в исследовании, были произведены в 2016–2020 гг., информация о них представлена в таблице 1.

Из протоколов КТ-сканирований пациентов были собраны данные относительно CTDIvol и DLP. В медицинских учреждениях, выбранных для проведения исследований, КТ-диагностика проводилась, в основном, пациентам, которые имели средний вес (50–90 кг) и возраст от 18 до 65 лет. Поэтому на 1-м этапе работы было решено ограничиться выборкой пациентов с такими параметрами. Всего были собраны данные о проведении МСКТ в медицинских центрах у 1126 взрослых пациентов по следующим областям исследования: голова, шея, грудная клетка, живот, малый таз. Сведения о количестве обследованных пациентов при однократном сканировании МСКТ в зависимости от области сканирования приведены в таблице 2.

The number of adult patients examined on the MSCT selected for the study

Table 2

Количество взрослых пациентов, обследованных на МСКТ, выбранных для исследования

[Таблица 2]

№	Scan area [Область сканирования]	MSCT models [Модель МСКТ]					Total [Всего]
		«Brilliance iCT 256»	«NeuViz 16 Essence»	«Optima CT 520»	«Ingenety Core 128»	«Revolution Discovery CT»	
1	Head [Голова]	35	40	39	39	37	190
2	Neck [Шея]	25	26	33	34	37	155
3	Chest [Грудная клетка]	80	78	83	94	81	416
4	Abdomen [Живот]	44	40	38	29	37	188
5	Pelvis [Малый таз]	32	34	33	36	42	177
	Total [Всего]	216	218	226	232	234	1126

¹ MU 2.6.1.2944-11. Control of effective doses of patients for the medical X-ray examinations. Methodical instructions (in Russ.) [МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. Методические указания. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 19 июля 2011 г.]

² MU 2.6.1.3584-19. Changes in MU 2.6.1.2944-11 «Control of effective doses of patients for the medical X-ray examinations». Methodical instructions (in Russ.) [МУ 2.6.1.3584-19. Изменения в МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях». Методические указания. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 30 октября 2019 г.]

³ MR 2.6.1 0098-15. Assessment of radiation risk of patients from diagnostic X-ray examinations. Methodical guidelines (in Russ.) [MP 2.6.1 0098-15. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. Методические рекомендации. Утв. главным государственным санитарным врачом РФ 6 апреля 2015 г.]

For statistical processing of the data, the basic methods of descriptive statistics were used: measures of central tendency and measures of variability. The arithmetic mean was determined from the measures of the central tendency, and the standard deviation was determined from the measures of variability.

The distributions (samples) were checked for normality according to Kolmogorov-Smirnov and graphical analysis. The determination of significant differences between the samples was carried out using the Mann-Whitney U test. Statistical analysis was carried out using the statistical software OriginPro 8.6, SPSS Statistics 17.

Results

Based on the results of the studies, the values of CTDI and DLP were determined when conducting MSCT studies in various medical institutions of Uzbekistan for the period 2017-2021. In Uzbekistan, specialists use the protocols recommended by the equipment manufacturer. In our studies, we used low-dose scanning protocols that are acceptable for solving a specific clinical task. To examine the head area in accordance with the technical capabilities of MSCT devices, diagnostic procedures were carried out at an average anode voltage of the X-ray tube – 80 kV, current modulation -100 mAs, the neck area -100 kV, 100 mAs, the chest -100 kV, 80 mAs, the abdomen – 120 kV, 150 mAs, the pelvis – 110 kV, 200 mAs. CTDI and DLP details are presented in Table 3.

Table 4 shows the calculated average effective doses of patients with standard deviations for different scan areas, depending on the model of the MSCT apparatus.

When checking the distributions for normality according to Kolmogorov-Smirnov, the values of asymptotic significance in the samples were less than 0.05 ($p < 0.05$). These calculations allow us to conclude that the distribution of the samples under consideration is asymmetric, does not obey the normal (Gaussian) distribution law, and for the analysis it is necessary to use nonparametric statistical criteria.

In our studies, of the methods of graphical analysis for testing distributions for normality, box diagrams turned out

Для расчета полученной дозы пациентами при проведении МСКТ применялись значения специфических дозиметрических показателей – CTDI и DLP [18, 19].

Для МСКТ эффективная доза (ЭД) – это расчетный показатель от значения DLP. Эффективная доза рассчитывается следующим образом:

$$E = DLP \times k \text{ (мЗв)}, \quad (1)$$

где: k – дозовый коэффициент для определенной анатомической области, мЗв/(мГр.см), стандартизованный на значение DLP в образцовом фантоме.

Так как в РУЗ в настоящее время отсутствуют утвержденные данные методики, расчет эффективных доз проводился согласно утвержденным методикам Российской Федерации^{1,2}. Оценка средней (стандартной) эффективной дозы для выборки пациентов проводилась в соответствии с публикацией №60 МКРЗ [20]. Оценка радиационного риска проводилась на основании значения эффективной дозы в соответствии с утвержденной методикой РФЗ.

Для статистической обработки данных использовались основные методы описательной статистики: меры центральной тенденции и меры изменчивости. Из мер центральной тенденции определили среднее арифметическое, из мер вариативности – стандартное отклонение.

Распределения (выборки) на нормальность проверяли по тесту Колмогорова – Смирнова и графическому анализу. Определение значимых различий между выборками проводилось с помощью U-критерия Манна – Уитни. Статистический анализ проводился с использованием статистических программ OriginPro 8.6, SPSS Statistics 17.

Результаты

По результатам проведенных исследований были определены значения CTDI и DLP при проведении МСКТ-исследований в различных лечебно-профилактических учреждениях Узбекистана в 2017–2021 гг. В Узбекистане применяют протоколы, рекомендованные производителем оборудования. Для исследования использованы низкодозовые протоколы сканирования, допустимые

Table 3
Average values with standard deviation of specific dosimetric parameters depending on the scanning area and the MSCT model
[Таблица 3]

Средние значения специфических дозиметрических показателей со стандартными отклонениями в зависимости от области сканирования и модели МСКТ]

Scan area [Область сканирования]	«Brilliance iCT 256»		«NeuViz 16 Essence»		«Optima CT 520»		«Ingenety Core 128»		«Revolution Discovery CT»	
	CTDIvol, mGy	DLP, mGy·cm	CTDIvol, mGy	DLP, mGy·cm	CTDIvol, mGy	DLP, mGy·cm	CTDIvol, mGy	DLP, mGy·cm	CTDIvol, mGy	DLP, mGy·cm
Head [Голова]	41,0 ± 5	811,7 ±82	37,5 ±5	792,8 ±97	37,7 ±8	711,7 ±123	37,0 ±6	719,3 ±108	30,1 ±5,0	576,5 ±113
Neck [Шея]	11,1 ±2	316,7 ±55	12,2 ±1	401,0 ±56	12,3 ±2	316,7 ±58	14,2 ±2	383,3 ±88	10,5 ±2	216,7 ±71
Chest [Грудная клетка]	9,2 ±2	372,0 ±38	9,7 ±1	311,5 ±41	9,8 ±1	373,1 ±48	10,7 ±3	406,2 ±99	11,0 ±3	371,7 ±83
Abdomen [Живот]	15,6 ±3	587,9 ±108	14,5 ±2	454,8 ±65	14,4 ±2	583,8 ±86	15,0 ±2	523,5 ±78	13,4 ±2	545,5 ±74
Pelvis [Малый таз]	14,5 ±2	421,0 ±89	17,3 ±3	565,9 ±139	16,2 ±3	533,9 ±79	16,2 ±2	445,4 ±93	14,9 ±3	472,9 ±81

Table 4

Average values of effective doses of patients with standard deviation for different scanning areas, depending on the model of the MSCT apparatus

[Таблица 4]

Средние значения эффективных доз пациентов со стандартными отклонениями для различных областей сканирования в зависимости от модели аппарата МСКТ

Scan area [Область сканирования]	Effective dose (average $\pm$ standard deviation), mSv [Эффективная доза (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение), мЗв]				
	Brilliance iCT 256	NeuViz 16 Essence	Optima CT 520	Ingenety Core 128	Revolution Discovery CT
Head [Голова]	1,9 $\pm$ 0,2	1,8 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,3	1,32 $\pm$ 0,3
Neck [Шея]	1,9 $\pm$ 0,3	2,4 $\pm$ 0,3	1,9 $\pm$ 0,3	2,3 $\pm$ 0,5	1,3 $\pm$ 0,3
Chest [Грудная клетка]	6,3 $\pm$ 0,7	5,3 $\pm$ 0,7	6,3 $\pm$ 0,8	6,6 $\pm$ 1,9	6,4 $\pm$ 1,8
Abdomen [Живот]	8,8 $\pm$ 1,6	7,0 $\pm$ 1,0	8,8 $\pm$ 1,3	7,8 $\pm$ 1,0	8,0 $\pm$ 0,9
Pelvis [Малый таз]	7,8 $\pm$ 1,0	10,8 $\pm$ 2,5	10,1 $\pm$ 1,5	8,5 $\pm$ 1,9	8,9 $\pm$ 1,5

to be the most illustrative, which reject the hypothesis about the normality of distributions (samples). These effective dose distribution charts are presented in Figures 2-6. Models of devices are indicated on the horizontal axis, and the obtained values of effective doses are indicated on the vertical axis.

для решения конкретной клинической задачи. Для обследования области головы, учитывая технические возможности МСКТ-аппаратов, диагностические процедуры проводились при среднем анодном напряжении рентгеновской трубки – 80 kV, модуляции силы тока – 100 mAs,

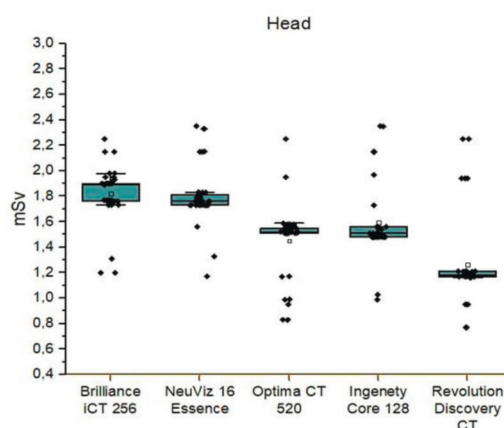


Fig. 2. Results of the distribution of effective doses received by patients when scanning the head area on various MSCT models
[Рис. 2. Результаты распределения эффективных доз, полученных пациентами при сканировании области головы на различных моделях МСКТ]

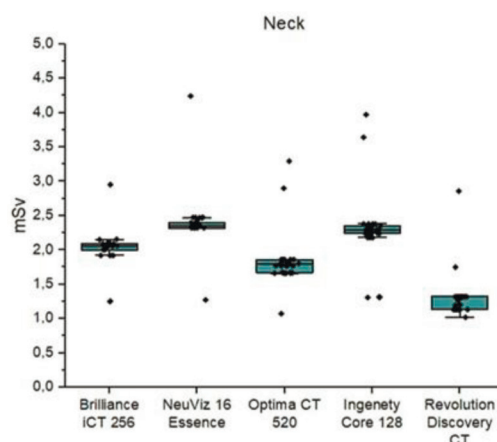


Fig. 3. Results of the distribution of effective doses received by when scanning the neck area on various models of MSCT
[Рис. 3. Результаты распределения эффективных доз, полученных пациентами при сканировании области шеи на различных моделях МСКТ]

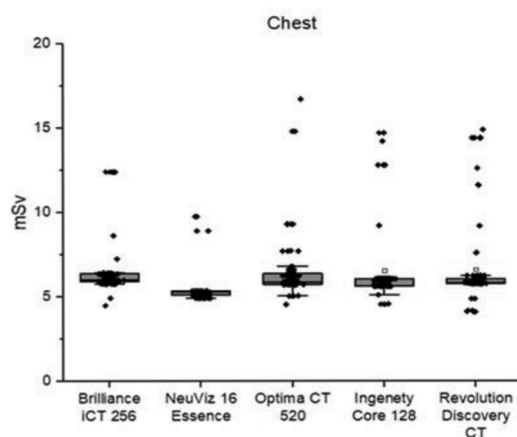


Fig. 4. Results of the distribution of effective doses received by patients when scanning the chest area on various models of MSCT
 [Рис. 4. Результаты распределения эффективных доз, полученных пациентами при сканировании области грудной клетки на различных моделях МСКТ]

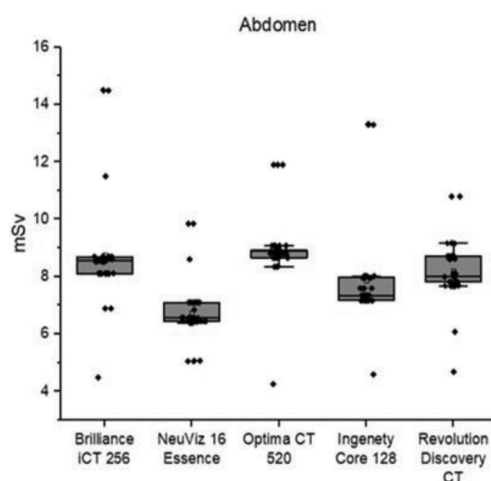


Fig. 5. Results of the distribution of effective doses received by patients when scanning the abdomen area on various models of MSCT
 [Рис. 5. Результаты распределения эффективных доз, полученных пациентами при сканировании области живота на различных моделях МСКТ]

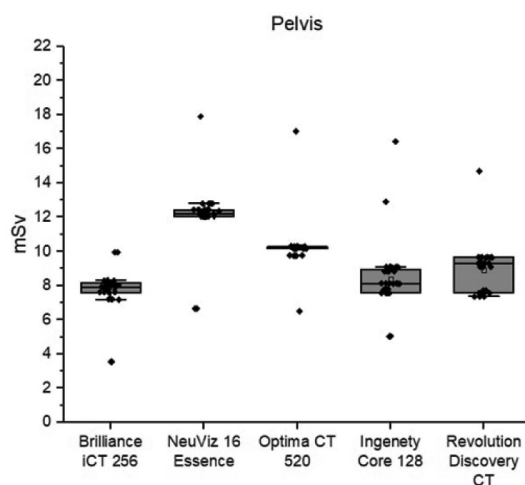


Fig. 6. Results of the distribution of effective doses received by patients when scanning the pelvis area on various models of MSCT
 [Рис. 6. Результаты распределения эффективных доз, полученных пациентами при сканировании области малого таза на различных моделях МСКТ]

The radiation risks of patients were estimated based on the values of effective doses according to MR 2.6.1.0098-15 (RF)3. The results are presented in Table 5.

Discussions

Currently, there are no typical protocols for conducting CT examinations in Uzbekistan. Specialists of medical centers use protocols recommended by manufacturers of CT devices. Table 3 presents the results of specific dosimetry indicators (CTDI and DLP), which were used to calculate the effective doses of patients when scanning various anatomical areas on multislice spiral computed tomographs using low-dose scanning protocols. Table 4 shows that when examining different areas of the body on the same tomograph, the patient receives different doses of radiation. Person receives the highest doses of radiation when examining the pelvic area. Such values were obtained on all computed tomographs participating in the research, except for the "Brilliance iCT 256" model, in which the maximum effective dose was observed during examination of the abdominal area. When examining the area of the abdomen, chest, neck, head, the radiation doses received by the patients decreased accordingly.

If we consider the radiation doses received by patients when examining the head area using various CT models, then the minimum and maximum values of effective doses were 0,9 and 2,4 mSv, neck areas – 1,0 and 4,2 mSv, chest – 4,1 and 16,1 mSv, abdomen – 4,3 and 14,5 mSv, small pelvis – 3,9 and 17,4 mSv. The values of effective doses received by patients during CT scanning of the same anatomical areas on different devices differ by 2,5 – 4,5 times.

The determination of significant differences between the samples was carried out using the nonparametric Mann-Whitney U test. The obtained values of the asymptotic significance in the samples are less than 0.05 ($p < 0.05$), which indicates significant differences between the samples.

To maintain image quality during MSCT scanning of people with a larger body weight higher values of voltage or cur-

области шеи – 100 kV, 100 mAs, грудной клетки – 100 kV, 80 mAs, живота – 120 kV, 150 mAs, малого таза – 110 kV, 200 mAs. Сведения о CTDI и DLP представлены в таблице 3.

В таблице 4 приведены рассчитанные средние эффективные дозы пациентов со стандартными отклонениями для различных областей сканирования в зависимости от модели аппарата МСКТ.

При проверке распределений на нормальность по Колмогорову – Смирнову значения асимптотической значимости в выборках получались менее 0,05 ($p < 0,05$). Данные расчеты позволяют сделать вывод о том, что распределение рассматриваемых выборок асимметричное, не подчиняется нормальному (Гауссовому) закону распределения и для анализа необходимо использовать непараметрические критерии статистики.

В наших исследованиях из методов графического анализа для проверки распределений на нормальность наиболее показательными оказались диаграммы Тьюки (Boxplot), которые опровергают гипотезу о нормальности распределений (выборок). Эти графики распределения эффективной дозы представлены на рисунках 2–6. По горизонтальной оси указаны модели устройств, по вертикальной – полученные значения эффективных доз. На основании полученных значений эффективных доз оценивали радиационные риски пациентов при однократном сканировании на компьютерном томографе согласно МР 2.6.1.0098-15 (РФ)3. Результаты представлены в таблице 5.

Обсуждение

В настоящее время в РУЗ отсутствуют типичные протоколы проведения КТ-исследований. В медицинских организациях используются протоколы, рекомендованные производителем КТ-аппаратов. В таблице 3 представлены результаты специфических дозиметрических показателей (CTDI и DLP), которые использовались для

Radiation risks of adult patients during multislice spiral computed tomography, depending on the scanning area and the computed tomograph model

Table 5

[Таблица 5]

Радиационные риски взрослых пациентов при мультисрезовой спиральной компьютерной томографии в зависимости от области сканирования и модели компьютерного томографа]

Scan area [Область сканирования]	«Brilliance iCT 256»	«NeuViz 16 Essence»	«Optima CT 520»	«Ingenety Core 128»	«Revolution Discovery CT»
Head [Голова]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]
Neck [Шея]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]	$10^{-5} - 10^{-3}$ (very low – low) [очень низкий – низкий]
Chest [Грудная клетка]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]
Abdomen [Живот]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]
Pelvis [Малый таз]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]	$10^{-4} - 10^{-3}$ (low) [низкий]

rent were used, depending on the technical capabilities of the devices, compared to patients with a lower body weight. Accordingly, this led to an increase in specific dosimetric parameters and effective dose. The X-ray capture area is larger in patients with larger body weight, so the effective dose is also higher.

Figure 7 shows the positive correlation dependence of effective doses on the patient's body weight.

One of the factors that determine the high values of radiation doses for patients is the length of the scan (the size of the anatomical region). Based on the definition of DLP, the correlation between these parameters will also be positive. At the next stages of our work, we plan to collect this data.

Figure 8 shows the results of the calculated mean effective doses for MSCT in comparison with similar values presented in the documents of the European Union (EU) [21], the National Radiation Protection Board of Great Britain (NRPB) [22] and with the proposed values of the diagnostic reference levels (RDU) St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene (NIIRG) named after Professor P.V. Ramzaev RF [23,24]. The results of the average effective doses received by patients in this work are higher than in the EU, NRPB and are comparable with the RDU RF.

The obtained values of effective doses confirm the need for measures to optimize the radiation protection system: accounting and control of patient exposure doses, control of the justification for the appointment of CT studies, informing patients about possible radiation risks, development of CT scanning protocols taking into account the specifics of the study, annual quality control of X-ray equipment, professional development of personnel.

расчета эффективных доз пациентов при сканировании различных анатомических областей на многосрезовых спиральных компьютерных томографах с использованием низкодозовых протоколов сканирования. Таблица 4 показывает, что при обследовании различных участков тела на одном томографе пациент получает разные дозы облучения. Самые высокие дозы радиации пациент получает при обследовании области малого таза.

Такие значения были получены на всех компьютерных томографах, участвовавших в исследовании, за исключением модели «Brilliance iCT 256», в которой максимальная эффективная доза наблюдалась при обследовании области живота. При обследовании области живота, груди, шеи, головы получаемые пациентами дозы облучения уменьшались.

Если рассматривать дозы облучения пациентов, полученные на различных моделях КТ при обследовании области головы, то минимальные и максимальные значения эффективных доз составили 0,9 и 2,4 мЗв, области шеи – 1,0 и 4,2 мЗв, грудной клетки – 4,1 и 16,1 мЗв, брюшной полости – 4,3 и 14,5 мЗв, малого таза – 3,9 и 17,4 мЗв. Значения эффективных доз пациентов, полученных при сканировании одних и тех же анатомических областей на разных моделях МСКТ, различаются в 2,5–4,5 раза.

Определение значимых различий между выборками проводилось с помощью непараметрического U-критерия Манна – Уитни. Полученные значения асимптотической значимости в выборках меньше 0,05 ($p < 0,05$), что свидетельствует о значимых различиях между выборками.

Для сохранения качества изображения во время МСКТ-исследования людей с большей массой тела ис-

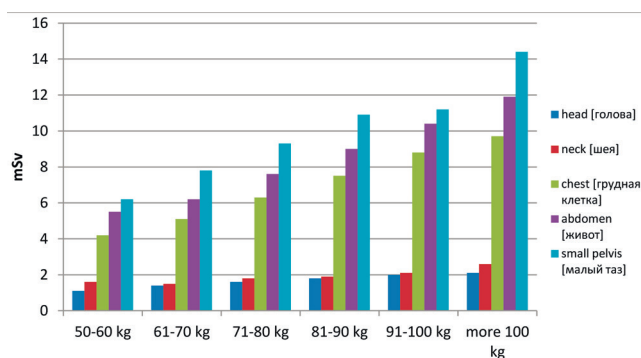


Fig. 7. An increase of the effective dose of patients radiation in depending on the increase of their weight
[Рис. 7. Увеличение эффективной дозы облучения пациентов в зависимости от увеличения их веса]

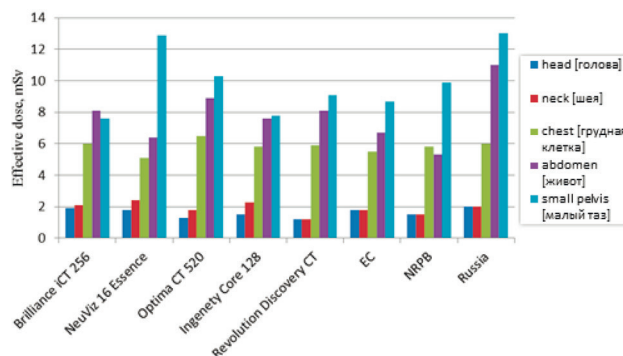


Fig. 8. Average values of effective doses during MSCT in comparison with similar data of the EU, NRPB, RF
[Рис. 8. Средние значения эффективных доз при МСКТ в сравнении с аналогичными данными ЕС, Национального совета по радиологической защите Великобритании (NRPB), РФ]

Conclusions

The results of the study showed that the effective doses differ significantly from each other depending on the anatomical area of study of the patients. A person receives the highest doses of radiation when examining the pelvic and abdominal area, and smaller ones when examining the head area.

The difference in the values of effective doses in the study of the same anatomical parts of the human body mainly depended on the weight of the patients, the length of the studied anatomical area, the model of the computer tomograph.

The lifetime risk of long-term stochastic consequences for the health of a patient from 18 to 65 years old during MSCT examination of the head and neck area is classified as very low (10⁻⁵ – 10⁻⁴), of the chest, abdomen, pelvis area – as low (10⁻⁴ – 10⁻³). These radiation risks are related to a single scan. In the case of double scans, the radiation risks become low and moderate (10⁻³ – 3.10⁻³), respectively.

References

1. Samei E, Pelc NJ. Computed Tomography: Approaches, Applications, and Operations. Springer: Switzerland; 2020. 469 p.
2. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series № 19: Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications. IAEA: Vienna; 2012. 192 p.
3. Berkovich GV, Chipiga LA, Vodovатов AV, Trufanov GYe. Comparison of the different approaches to assessing the diagnostic quality of computed tomography of the chest organs. *Radiation diagnostics and therapy*. 2020; 11(3): 44-55. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-44-55> (In Russian).
4. Berkovich GV, Chipiga LA, Vodovатов AV, Silin AYU, Karatetsky AA, Trufanov GYe. Optimization of a low-dose chest scanning protocol in the diagnosis of ground-glass lesions using iterative reconstruction algorithms. *Luchevaya diagnostika i terapiya = Radiation diagnostics and therapy*. 2019;10(4): 20-32. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32> (In Russian).
5. Kotlyarov PM, Sergeev NI, Solodkiy VA, Soldatov DG. Multislice computed tomography in early diagnosis of SARS-CoV-2 pneumonia. *Russian Pulmonology Journal*. 2020;30(5): 561-68. DOI: 10.18093/0869-0189-2020-30-5-561-568 (In Russian).
6. Kotlyarov PM. Post-processing processing of multispiral computed tomography data in the refined diagnosis of pathological changes in diffuse lung diseases. *Pulmonologiya = Pulmonology*. 2017;27(4): 472-477. DOI: 10.18093/0869-0189-2017-27-4-472-477 (In Russian).
7. Kotlyarov PM, Yudin AL, Georgiadi SG. Differential X-ray diagnostics of diffuse lung diseases. Part 2. *Медицинская визуализация = Medical imaging*. 2004; 1: 34-40 (In Russian).
8. Marusina MYa, Kaznacheeva AO. Modern types of tomography. Textbook. Saint Petersburg: St-Petersburg GU; 2006. 132 p. (In Russian).
9. European Commission. Radiation protection № 180 part, 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population. European Commission: Luxembourg; 2014. 181 p.
10. OECD Indicators. Health at a Glance 2019: OECD Indicators, OECD Publishing. Paris; 2019. 243 p.
11. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR Report. 2008;1: 32-34.
12. Golikov VYu, Chipiga LA, Vodovатов AV, Sarycheva SS. Additions and changes in the assessment of effective doses of external exposure to patients in medical research. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(43): 120-132. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-3-120-132> (In Russian).

пользовались более высокие значения напряжения или силы тока в зависимости от технических возможностей КТ-аппаратов, чем для пациентов с меньшей массой тела. Соответственно, это приводило к увеличению специфических дозиметрических показателей и эффективной дозы. Поглощенная доза полных людей выше за счет большей площади захвата рентгеновских лучей, что также влияло на увеличение эффективной дозы.

На рисунке 7 показана положительная корреляционная зависимость эффективных доз от массы тела пациента.

Одним из факторов, обуславливающих высокие значения доз облучения пациентов, является длина сканирования (размер анатомической области). Исходя из определения DLP, корреляционная зависимость между этими показателями будет также положительной. На следующих этапах работы мы планируем сбор этих данных.

На рисунке 8 приведены результаты расчета средних эффективных пациентов при проведении МСКТ в сравнении с аналогичными значениями, представленными в документах Европейского Союза (ЕС) [21], Национального совета по радиологической защите Великобритании (NRPB) [22] и с предлагаемыми значениями референтных диагностических уровней (РДУ) Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены (НИИРГ) им. профессора П.В. Рамзаева [23, 24].

Результаты средних эффективных доз, полученных пациентами в этой работе, выше, чем в ЕС, НРПБ и соизмеримы с РДУ РФ.

Полученные значения эффективных доз подтверждают необходимость проведения мероприятий по оптимизации системы радиационной защиты: учет и контроль доз облучения пациентов, контроль обоснованности назначения МСКТ-исследований, индивидуальный подход к каждому пациенту, информирование о возможных радиационных рисках, разработка протоколов КТ-сканирования с учетом специфики исследования и с меньшей дозой облучения, ежегодный контроль качества рентгеновского оборудования, повышение квалификации персонала.

Заклучение

Результаты исследования показали, что эффективные дозы существенно отличаются друг от друга в зависимости от анатомической области исследования пациентов. Наибольшие дозы облучения человек получает при обследовании области таза и живота, а меньшие – при обследовании области головы.

Разница в значениях эффективных доз при исследовании одних и тех же анатомических областей тела человека, в основном, зависела от веса пациентов, длины сканированной области, модели компьютерного томографа.

Пожизненный риск отдаленных стохастических последствий для здоровья пациента от 18 до 65 лет при МСКТ области головы и шеи классифицируется как очень низкий (10⁻⁵–10⁻⁴), грудной клетки, живота, малого таза – низкий (10⁻⁴–10⁻³). Эти радиационные риски связаны с одним сканированием. При двойном сканировании радиационные риски становятся низкими и умеренными (10⁻³–3,10⁻³) соответственно.

13. Kashcheev VV, Pryakhin YeA. Medical diagnostic exposure: the problem of radiation safety. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2018;27(4): 49–64. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-49-64 (In Russian).
14. Mattson S. Need for individual cancer risk estimates in X-ray and nuclear medicine imaging. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1): 11–16. DOI: 10.1093/rpd/ncw034
15. Golikov VYu. Assessment of the risks of medical exposure based on the data of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(4): 4–6 (In Russian).
16. Druzhinina PS, Chipiga LA, Ryzhkov SA, Vodovатов AV, Berkovich GV, et al. Modern approaches to ensuring the quality of diagnostics in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1):17–33. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33 (In Russian).
17. Chipiga LA. Comparison of calculated methods for determining effective and organ doses in patients with computed tomography studies. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 56–64. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64 (In Russian).
18. American Association of Physicists in Medicine. Performance of Evaluation of Computed Tomography Systems. The report of AAPM N233; 2019. 71 p.
19. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide №SSG-46. Vienna: IAEA; 2018. 318 p.
20. ICRP Publication №60 1990. Annals of the ICRP. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
21. EC. Radiation Protection 154. European guidance on estimating population doses from medical x-ray procedures. European Communities. Brussels, Luxembourg; 2008. P. 90–96.
22. NRPB. Shrimpton PC. Dose for computed tomography (CT). Examinations in UK – 2003 Review. Document NRPB-W67. Chilton; 2005:103–107.
23. Chipiga LA, Vodovатов AV, Golikov VYu, 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. Vienne; 2017. IAEA, book of contributions. Available on: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpopsession2.pdf> [Accessed November 08, 2021].
24. Kanal KM, Butler PF, Sengupta D, Bhargavan-Chatfield M, Coombs LP, Morin RL. U.S. Diagnostic Reference Levels and Achievable Doses for 10 Adult CT Examinations. *Radiology*. 2017;284(1): 120–133.

Received: November 08, 2021

Литература

1. Samei E., Pelc N.J. Computed Tomography: Approaches, Applications, and Operations. Springer: Switzerland, 2020. 469 p.
2. International Atomic Energy Agency. IAEA human health series № 19: Quality Assurance Programme for Computed Tomography: Diagnostic and Therapy Applications. IAEA: Vienna, 2012. 192 p.
3. 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. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2020-11-3-44-55>.
4. 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. 10, № 4. С. 20–32. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32>.
5. Котляров П.М., Сергеев Н.И., Солодкий В.А., Солдатов Д.Г. Мультиспиральная компьютерная томография вранней диагностики пневмонии, вызванной SARS-CoV-2 // Russian Pulmonology Journal. 2020. Т. 30, № 5. С. 561–568. DOI: 10.18093/0869-0189-2020-30-5-561-568
6. Котляров П.М. Постпроцессинговая обработка данных мультиспиральной компьютерной томографии в уточненной диагностике патологических изменений при диффузных заболеваниях легких // Пульмонология. 2017. Т. 27, № 4. С. 472–477. DOI: 10.18093/0869-0189-2017-27-4-472-477.
7. Котляров П.М., Юдин А.Л., Георгиади С.Г. Дифференциальная рентгенодиагностика диффузных заболеваний легких. Часть 2 // Медицинская визуализация. 2004. № 1. С. 34–40.
8. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 132 с.
9. European Commission. Radiation protection № 180 part, 1/2. Medical Radiation Exposure of the European Population. European Commission: Luxembourg, 2014. 181 p.
10. OECD Indicators. Health at a Glance 2019: OECD Indicators, OECD Publishing. Paris, 2019. 243 p.
11. Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR Report, 2008. No 1. P. 32–34.
12. Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Сарычева С.С. Дополнения и изменения в оценке эффективных доз внешнего облучения пациентов при медицинских исследованиях // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 43. С. 49–64. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-3-120-132>.
13. Кашеев В.В., Пряхин Е.А. Медицинское диагностическое облучение: проблема радиационной безопасности // Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 4. С. 49–64. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-49-64.
14. Mattson S. Need for individual cancer risk estimates in X-ray and nuclear medicine imaging // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 169, No 1. P. 11–16. DOI: 10.1093/rpd/ncw034.
15. Голиков В.Ю. Оценка рисков медицинского облучения на основе данных радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 4. С. 4–6.
16. Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжков С.А., и др. 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.
17. Чипига Л.А. Сравнение расчетных методов определения эффективной и органных доз у пациентов при компьютерно-томографических исследованиях // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 56–64. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64.

18. American Association of Physicists in Medicine. Performance of Evaluation of Computed Tomography Systems // The report of AAPM N233. 2019. 71 p.
19. International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation. Specific Safety Guide №SSG-46. Vienna: IAEA, 2018. 318 p.
20. ICRP Publication №60 1991. Annals of the ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Published for the International Commission on Radiological Protection by Elsevier.
21. EC. Radiation Protection 154. European guidance on estimating population doses from medical x-ray procedures. European Communities. Brussels, Luxembourg, 2008. P. 90-96.
22. NRPB. Shrimpton P.C. Dose for computed tomography (CT). Examinations in UK – 2003 Review. Document NRPB-W67. Chilton, 2005. P. 103-107.
23. 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. Vienne; 2017. IAEA, book of contributions. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpopsession2.pdf> (Дата обращения: 08.11.2021).
24. Kanal K.M., Butler P.F., Sengupta D., et al. U.S. Diagnostic Reference Levels and Achievable Doses for 10 Adult CT Examinations // Radiology. 2017. Vol. 284, No 1. P. 120–133.

Поступила: 08.11.2021 г.

Zaredinov Damir Arifovich – DSc, professor, Chief radiologist of the Ministry of Health of the Republic of Uzbekistan. **Address for correspondence:** Navoi ul., 4, Shayxontoxurskiy rayon, Tashkent, Uzbekistan, 100004; E-mail: zda_medic@mail.ru

Marina V. Li – PhD, head of the scientific research radiological laboratory of the Center for the development of professional qualifications of medical workers, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Адрес для переписки: Зарединов Дамир Арифович – доктор медицинских наук, профессор, главный радиолог Министерства здравоохранения Республики Узбекистан. 100004, Узбекистан, Ташкент, Шайхонтохурский район, ул. Навои, 4; E-mail: zda_medic@mail.ru

Ли Марина Владимировна – кандидат медицинских наук, руководитель научно-исследовательской радиологической лаборатории Центра развития профессиональной квалификации медицинских работников Министерства здравоохранения Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан

For citation: Zaredinov D.A., Li M.V. Risk assessment based on effective patient radiation doses during multislice spiral computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 68-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-68-79

Для цитирования: Зарединов Д.А., Ли М.В. Оценка радиационных рисков облучения пациентов при проведении мультисрезовой спиральной компьютерной томографии на основе эффективных доз // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 68-79. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-68-79

Оценка радиоактивного загрязнения лекарственных растений луговых экосистем поймы реки Сож спустя 30 лет после катастрофы на Чернобыльской атомной станции

Н.М. Дайнеко, С.Ф. Тимофеев

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины Министерства образования Республики Беларусь, Гомель, Республика Беларусь

*Цель исследования — выполнить оценку радиоактивного загрязнения лекарственных растений хозяйственных типов луговых экосистем поймы реки Сож. Объектами исследований являлись лекарственные растения поймы реки Сож. В границах выделенных хозяйственных типов лугов проводили отбор почвенных и растительных проб для последующего проведения радиологических анализов. Определение содержания ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах производили на гамма-спектрометрическом комплексе Tennelec. В каждом хозяйственном типе луга выделяли и анализировали 12 видов лекарственных растений. В почве крупноосокового типа луга удельная активность ^{137}Cs составила в 2015 г. 1600 Бк/кг, а в 2020 г. — 1380 Бк/кг. Радиологический анализ удельной активности ^{137}Cs в надземной фитомассе в 2015 г. и 2020 г. показал, что для всех образцов растительности данный показатель не превышал республиканский допустимый уровень содержания радионуклида в лекарственно-техническом сырье — 370 Бк/кг, за исключением чистеца болотного (*Stachys palustris*), для которого было обнаружено превышение допустимого уровня содержания ^{137}Cs в лекарственно-техническом сырье. В почве дернистоощуцкого типа луга удельная активность ^{137}Cs в 2015 г. была 1116 Бк/кг, а в 2020 г. — 970 Бк/кг. В растительных пробах не было выявлено превышения допустимого уровня по содержанию ^{137}Cs . В почве крупнозлакового типа луга удельная активность ^{137}Cs в 2015 г. составила 1380 Бк/кг, а в 2020 г. — 1150 Бк/кг. В 2015 г. и в 2020 г. в большинстве растительных проб содержание радионуклида соответствовало нормативам, только в надземной фитомассе лисохвоста лугового (*Alopecurus palustris*) в 2015 г. удельная активность ^{137}Cs на 155 Бк/кг превышала допустимый уровень. В почвенном покрове мелкозлакового типа луга удельная активность ^{137}Cs в 2015 г. составила 962 Бк/кг, а в 2020 г. — 704 Бк/кг. Как в 2015 г., так и в 2020 г. удельная активность ^{137}Cs во всех растительных образцах была ниже допустимого уровня. Сравнительный анализ удельной активности ^{137}Cs в лекарственных растениях изучаемых хозяйственных типов лугов показал, что в 2020 г. по сравнению с 2015 г. она уменьшилась в среднем в 1,3–1,4 раза. Наибольшая удельная активность ^{137}Cs в растительных пробах за годы наблюдений отмечалась на территории крупноосокового типа луга, что в 4 раза больше, чем для растительности мелкозлакового луга. Уменьшение радиоактивного загрязнения лекарственных растений происходило по мере снижения плотности радиоактивного загрязнения почвы.*

Ключевые слова: ^{137}Cs , радиоактивное загрязнение, удельная активность, лекарственные растения, хозяйственные типы лугов, радиологический анализ.

Введение

Глобальная техногенная экологическая катастрофа XX в. — катастрофа на Чернобыльской АЭС — привела к радиоактивному загрязнению почти 30% территории Республики Беларусь. Основные площади радиоактивного загрязнения приходятся на ряд районов Гомельской области, приграничных с районами Брянской области [1].

Вопросу радиоактивного загрязнения лекарственных трав уделяется большое внимание: так, в работе [2] отмечается, что удельная активность ^{137}Cs в дикорастущих лекарственных растениях естественных лесных экосистем Украинского Полесья во многом зависит от типа

фитоценоза, условий обитания и плотности загрязнения территории.

Концентрация ^{137}Cs зависит от места сбора сырья и коррелирует с загрязнением почв этих регионов [3].

Исследования [4] показали, что растения черники продолжают содержать ^{137}Cs в течение продолжительного периода после первичного радиоактивного загрязнения. Массовые концентрации ^{137}Cs в исследованных плодах, стеблях и листьях не представляют опасности для здоровья человека и окружающей среды.

В работе [5] отмечается, что для оценки радиозологической ситуации на загрязненных территориях реко-

Дайнеко Николай Михайлович

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

Адрес для переписки: 246028, Республика Беларусь, Гомель, ул. Советская, д. 104; E-mail: dajneko@gsu.by

мендуется определять концентрацию радионуклидов в сельскохозяйственных культурах.

Радиоактивное загрязнение лекарственных растений Гомельской области изучали [6].

В статье представлены результаты изучения радиоактивного загрязнения лекарственных растений луговых экосистем поймы реки Сож на территории Чечерского района спустя более чем 30 лет после катастрофы на Чернобыльской АЭС.

По ландшафтному районированию территория Чечерского района относится к подзоне подтаежных (смешаннолесных) ландшафтов, Предполесской провинции вторичных водно-ледниковых ландшафтов, Бобрыйско-Рогачевскому району вторичных и водно-ледниковых и вторично-маренных лесов с сосняками и широколиственно-еловыми лесами [7].

Согласно почвенно-географическому районированию [8], территория Чечерского района входит в состав Центральной (Белорусской) провинции, Восточного округа, Рогачевско-Славгородского-Климовичского района дерново-подзолистых, местами заболоченных почв, развивающихся на водно-ледниковых песчанисто-пылеватых и лесовидных (пылеватых) суглинках.

По геоботаническому районированию [9] территория Чечерского района относится к подзоне грабово-дубово-темнохвойных лесов, Березинско-Предполесскому геоботаническому округу, Чечерско-Преднепровскому геоботаническому району.

Цель исследования – дать оценку радиоактивного загрязнения лекарственных растений хозяйственных типов лугов поймы реки Сож Чечерского района спустя более 30 лет после катастрофы на Чернобыльской атомной электростанции.

Задачи исследования

1. Проанализировать видовое разнообразие лекарственных растений в изучаемых хозяйственных типах луговых экосистем поймы реки Сож.
2. Определить уровни радиоактивного загрязнения лекарственных растений и коэффициент накопления ^{137}Cs в зависимости от хозяйственных типов лугов.

Материалы и методы

Объектом исследований были лекарственные растения хозяйственных типов лугов поймы реки Сож Чечерского района Гомельской области.

Отбор растительных и почвенных проб для определения содержания ^{137}Cs в вегетационный период 2015 г. и 2020 г. проводили по общепринятым методикам [10–13]. Выделение хозяйственных типов лугов осуществляли согласно [14]. При определении видового состава лекарственных растений использовали определитель растений [15].

Определение содержания ^{137}Cs в почвенных пробах и растительных образцах производили на гамма-спектрометрическом комплексе Теннелес по МВИ. МН 3421-2010 «Методика выполнения измерений объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами» [«Technique for measuring the volumetric and specific activity of gamma-emitting radionuclides on gamma spectrometers with semiconductor detectors» (In Russ.)].

Оценку радиоактивного загрязнения растений и возможности их безопасного использования выявляли путем сопоставления полученных результатов с нормативным показателем Республиканского допустимого уровня содержания ^{137}Cs в лекарственно-техническом сырье (РДУ/ЛТС-2004) [Republican permissible level of cesium-137 content in medicinal and technical raw materials (In Russ.)], равным 370 Бк/кг.

Удельная активность – это содержание радионуклида в единице массы, Бк/кг; коэффициент накопления (КН) характеризует отношение содержания радионуклида в единице массы растения к содержанию радионуклида в единице массы почвы, Бк/кг: Бк/кг.

Результаты и обсуждение

Научно-исследовательские работы проводили на 4 хозяйственных типах лугов. Основой для описания типа луга является выделение ассоциации, союза, порядка, класса. Кроме того, были использованы такие показатели, как аспект, высота, состав травостоя, а также проективное покрытие. Все это позволило выделить и охарактеризовать изучаемые хозяйственные типы лугов:

1. Крупноостроосочниковые луга отнесены к одной ассоциации *Caricetum gracilis* Almquist (Almquist 1929) R.Tx.1937, союза *Caricion gracilis* (Neuhaus 1959) Bab.-Tul. 1963, порядка *Magnocaricetalia Piga*. 1953, класса *Phragmito-Magnocaricetea* Klika in Klika et Novak 1941. Аспект травостоя зеленый. Проективное покрытие 95%. Доминант травостоя осока острая. Высота травостоя 60 (130) см. В составе травостоя отмечены следующие виды:

Птармика обыкновенная (*Achillea ptarmica*), вейник седеющий (*Calamagrostis canescens*), калужница болотная (*Caltha palustris*), подмаренник болотный (*Galium palustre*), осока лисья (*Carex vulpina*), авран лекарственный (*Gratiola officinalis*), ситник черный (*Juncus atratus*), кадения сомнительная (*Kadenia dubia*), мята полевая (*Mentha arvensis*), горец земноводный (*Persicaria hydropiper*), незабудка болотная (*Myosotis palustris*), мятлик болотный (*Poa palustris*), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*), лютик жгучий (*Ranunculus flammula*), лютик ползучий (*Ranunculus repens*), поручейник широколистный (*Sium latifolium*), чистец болотный (*Stachys palustris*), окопник лекарственный (*Symphytum officinale*), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia*), вероника щитковая (*Veronica scutellata*), горошек мышиный (*Vicia cracca*).

2. В состав лугов дернистошучкового типа входит ассоциация *Deschampsietum cespitosae*, где доминантом является *Deschampsia cespitosa*. Также в состав ассоциации могут входить виды: тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), василек луговой (*Centaurea jacea*), кадения сомнительная (*Kadenia dubia*), жгун-корень (*Cnidium dubium*), кукушкин цвет (*Coronaria flos-cuculi*), подмаренник болотный (*Gallium palustre*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris*), лютик едкий (*Ranunculus acris*), лютик жгучий (*Ranunculus flammula*), щавель курчавый (*Rumex crispus*), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia*).

3. В крупнотравяной тип может входить ассоциация *Poa palustris-Alopecuretum pratensis* Shelyag, Sipajlova, Mirkin, Sheluag et V.Solomakha 1985, союз *Alopecurion pratensis* Passarge 1914, порядок *Molinietalia* W.Koch 126, класс *Molinio-Arrhenatheretea* R. Tx. 1937. Проективное по-

крытие 85%, высота 45 (80) см. Доминантом травостоя являются мятлик болотный и лисохвост луговой. В травостое отмечены следующие виды растений: лук угловатый (*Alium angulosum*), лисохвост луговой (*Alopecurus palustris*), бекмания обыкновенная (*Beckmannia eruciformis*), осока заячья (*Carex leporina*), осока лисья (*Carex vulpina*), болотница яйцевидная (*Eleocharis ovata*), авран лекарственный (*Gratiola officinalis*), девясил британский (*Inula britannica*), ситник черный (*Juncus atratus*), дербенник прутовидный (*Lythrum virgatum*), мята полевая (*Mentha arvensis*), незабудка болотная (*Myosotis palustris*), горец земноводный (*Polygonum hydropiper*), мятлик болотный (*Poo palustris*), птармика обыкновенная (*Ptarmica vulgaris*), лютик жгучий (*Ranunculus flammula*), звездчатка болотная (*Stellaria palustris*), вероника щитковая (*Veronica scutellata*).

4. К мелкозлаковому типу относится ассоциация *Poo angustifoliae-Festucetum valesiacae Sapegin et al.* 2009, союз *Agrostion vinealis Sipajlova et al.* 1985, порядок *Galietales veri Mirk. Et Naum.* 1986, класс *Molinio-Arrhenatheretea R.Tx.* 1937. Аспект травостоя светло-коричневый. Проектное покрытие 85%, высота 40 (60) см. В составе травостоя отмечены следующие виды: полевика тонкая (*Agrostis tenuis*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), полевика виноградниковая (*Agrostis vinealis*), костер мягкий (*Bromus mollis*), василек луговой (*Centaurea jacea*), раббитник русский (*Chamaecytisus ruthenicus*), гвоздика травянка (*Dianthus deltoides*), молочай прутьевидный (*Euphorbia virgate*), овсяница красная (*Festuca rubra*), подмаренник настоящий (*Galium verum*), плевел многолетний (*Lolium perenne*), подорожник ланцетолистный (*Plantago lanceolata*), мятлик узко-

лиственный (*Poo angustifolia*), лапчатка серебристая (*Potentilla argentea*), щавель кислый (*Rumex acetosella*), очиток едкий (*Sedum acre*), дивала многолетняя (*Scleranthus perennis*), вероника колосистая (*Veronica spicata*).

В результате проведенных исследований установлены параметры видового разнообразия растений. На крупноостроосочниковом типе луга выделен 21 вид растений, на дернистошучковом – 12 видов, на крупнозлаковом и мелкозлаковом – по 18 видов растений.

Анализ видового состава показал доминирование растений из группы разнотравья. Растения этой группы от общего количества выделенных видов составляли по типам лугов 71,4; 91,7; 55,6 и 61,1% соответственно. Максимальное количество разнотравья выявлено на луге дернистошучкового типа, значительно меньшее – на луге крупнозлакового типа. По распространенности на второе место можно поставить лекарственные растения группы злаковых. Их количество составляло от 8 до 39%. Наибольшим разнообразием видов лекарственных растений отличается крупноостроосочниковый тип луга, наименьшим – луга мелкозлакового типа.

Анализ растительности крупноосокового типа луга в 2015 г. выявил, что в данных границах произрастало 12 видов лекарственных растений, относящихся к 11 родам и 8 семействам.

Удельная активность ^{137}Cs в почвах этого типа луга в 2015 г. составила 1600 Бк/кг. Для проведения анализа по величине удельной активности ^{137}Cs в наземной фитомассе лекарственных растения анализировали в порядке уменьшения параметра (табл.).

Аккумуляция ^{137}Cs лекарственными растениями пойменного луга реки Сож

Таблица

[Table

Accumulation of ^{137}Cs by medicinal plants of the floodplain meadow of the Sozh River]

Хозяйственный тип луга, вид растения [Economic type of meadow, plant species]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Activity concentration of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation factor, Bq/kg:Bq/kg]	
	2015 г. [2015 year]	2020 г. [2020 year]	2015 г. [2015 year]	2020 г. [2020 year]
Объект 1. Крупноостроосочниковый тип луга [Object 1. Caricetum gracilis meadow]				
Чистец болотный – <i>Stachys palustris</i>	380±27	310±38	0,24	0,22
Авран лекарственный – <i>Gratiola officinalis</i>	370±26	300±36	0,23	0,21
Подмаренник болотный – <i>Galium palustre</i>	362±29	228±34	0,22	0,20
Горец перечный – <i>Persicaria hydropiper</i>	348±24	270±30	0,21	0,19
Поручейник широколистный – <i>Sium latifolium</i>	335±21	260±29	0,20	0,19
Лютик ползучий – <i>Ranunculus repens</i>	280±22	220±20	0,17	0,16
Лютик жгучий – <i>Ranunculus flammula</i>	265±18	200±22	0,16	0,14
Мята полевая – <i>Mentha arvensis</i>	240±19	180±20	0,15	0,12
Незабудка болотная – <i>Myosotis palustris</i>	212±15	150±19	0,13	0,10
Окопник лекарственный – <i>Symphytum officinale</i>	205±14	130±14	0,12	0,09
Птармика обыкновенная – <i>Ptarmica vulgaris</i>	184±13	130±13	0,11	0,07
Калужница болотная – <i>Caltha palustris</i>	171±14	80±10	0,10	0,05
Среднее значение [Mean]	279±20	205±24	0,17	0,15

Хозяйственный тип луга, вид растения [Economic type of meadow, plant species]	Удельная активность ¹³⁷ Cs в растениях, Бк/кг [Activity concentration of ¹³⁷ Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation factor, Bq/kg:Bq/kg]	
	2015 г. [2015 year]	2020 г. [2020 year]	2015 г. [2015 year]	2020 г. [2020 year]
Объект 2. Дернистощучковый тип луга [Object 2. Deschampsietum cespitosae meadow]				
Тысячелистник обыкновенный – <i>Achillea millefolium</i>	365±29	290±34,8	0,31	0,29
Черноголовка обыкновенная – <i>Prunella vulgaris</i>	360±32	285±34	0,31	0,29
Лютик едкий – <i>Ranunculus acris</i>	330±23	270±32	0,28	0,27
Кадения сомнительная – <i>Cnidium dubium</i>	320±32	260±31	0,27	0,26
Горицвет кукушкин – <i>Coronaria flos-cuculi</i>	302±24	220±29	0,26	0,22
Вероника длиннолистная – <i>Veronica longifolia</i>	282±23	200±26	0,24	0,20
Мятлик луговой – <i>Poa pratensis</i>	254±23	180±20	0,21	0,18
Василек луговой – <i>Centaurea jacea</i>	210±17	130±14	0,18	0,13
Подмаренник болотный – <i>Gallium palustre</i>	184±13	100±10	0,15	0,10
Щавель курчавый – <i>Rumex crispus</i>	156±12	90±8	0,13	0,09
Лапчатка гусиная – <i>Potentilla anserina</i>	135±8	80±9	0,11	0,08
Лютик жгучий – <i>Ranunculus flammula</i>	110±10	70±6	0,09	0,07
Среднее значение [Mean]	251±17	181±21	0,21	0,18
Объект 3. Крупнозлаковый тип луга [Object 3. Poa palustris-Alopecuretum pratensis meadow]				
Листохвост луговой – <i>Alopecurus palustris</i>	385±42	300±39	0,27	0,26
Ситник черный – <i>Juncus atratus</i>	342±35	290±38	0,24	0,25
Авран лекарственный – <i>Gratiola officinalis</i>	315±28	260±34	0,23	0,22
Птармика обыкновенная – <i>Ptar mica vulgaris</i>	305±37	250±30	0,22	0,21
Лук угловатый – <i>Alium angulosum</i>	290±20	230±28	0,21	0,20
Мята полевая – <i>Mentha arvensis</i>	273±22	210±25	0,20	0,18
Звездчатка болотная – <i>Stellaria palustris</i>	260±23	200±24	0,19	0,17
Незабудка болотная – <i>Myosotis palustris</i>	250±18	180±20	0,18	0,16
Девясил британский – <i>Inula britannica</i>	190±17	140±16	0,13	0,12
Лютик жгучий – <i>Ranunculus flammula</i>	172±21	120±11	0,12	0,10
Дербенник прутьевидный – <i>Lythrum virgatum</i>	90±10	70±6	0,06	0,06
Горец перечный – <i>Polygonum hydropiper</i>	65±5	30±2	0,05	0,03
Среднее значение [Mean]	245±23	190±21	0,18	0,16
Объект 4. Мелкозлаковый тип луга [Object 4. Poa angustifoliae-Festucetum valesiacae meadow]				
Гвоздика травянка – <i>Dianthus deltoides</i> ,	150±11	110±12	0,15	0,14
Тысячелистник обыкновенный – <i>Achillea millifolium</i>	115±12	80±7	0,11	0,10
Вероника колосистая – <i>Veronica spicata</i>	105±7	70±6	0,10	0,09
Молочай лозный – <i>Euphorbia virgate</i>	95±9	60±5	0,09	0,08
Щавель малый – <i>Rumex acetosella</i>	87±7	50±4	0,09	0,07
Подорожник ланцетолистный – <i>Plantago lanceolata</i>	72±7	50±4	0,07	0,7
Подмаренник настоящий – <i>Galium verum</i>	65±6	40±3	0,06	0,05
Лапчатка серебристая – <i>Potentilla argentea</i>	64±7	40±3	0,06	0,05

Хозяйственный тип луга, вид растения [Economic type of meadow, plant species]	Удельная активность ^{137}Cs в растениях, Бк/кг [Activity concentration of ^{137}Cs in plants, Bq/kg]		Коэффициент накопления, Бк/кг:Бк/кг [Accumulation factor, Bq/kg:Bq/kg]	
	2015 г. [2015 year]	2020 г. [2020 year]	2015 г. [2015 year]	2020 г. [2020 year]
Очиток едкий – <i>Sedum acre</i>	60±5	40±3	0,06	0,05
Дивала многолетняя – <i>Sclerantus perennis</i>	55±4	30±2	0,05	0,04
Василек луговой – <i>Centaurea jacea</i>	50±5	30±2	0,05	0,04
Ракитник русский – <i>Chamarcytisus ruthenicus</i>	50±5	30±2	0,05	0,04
Среднее значение [Mean]	81±7	53±5	0,08	0,12

Анализ содержания ^{137}Cs в надземной фитомассе обследованных территорий позволил выделить две группы видов растений. Первая группа – это чистец болотный (*Stachyis palustris*), авран лекарственный (*Gratiola officinalis*), подмаренник болотный (*Galium palustre*) и горец перечный (*Persicaria hydropiper*). Удельная активность радионуклида для этих видов может превышать допустимые уровни РДУ/ЛТС-2004.

Для остальных видов удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе соответствовала требованиям РДУ/ЛТС-2004. Минимальной способностью накапливать ^{137}Cs характеризовалась калужница болотная (*Caltha palustris*), коэффициент накопления радионуклида для которой в 2,4 раза меньше, чем для чистеца болотного (*Stachyis palustris*).

Проведенный радиологический анализ удельной активности ^{137}Cs в надземной фитомассе этих же лекарственных растений в 2020 г. показал, что для исследуемых видов произошло уменьшение удельной активности радионуклида в среднем на 60–90 Бк/кг в зависимости от вида растения по сравнению с 2015 г.

Для данного хозяйственного типа луга отмечается и видовая специфичность аккумуляций ^{137}Cs лекарственными растениями. Так, более высокая удельная активность радионуклида отмечалась у чистеца болотного (*Stachyis palustris*), аврана лекарственного (*Gratiola officinalis*), подмаренника болотного (*Galium palustre*), меньшая удельная активность зафиксирована у окопника лекарственного (*Symphytum officinale*), птармики обыкновенной (*Ptarmica vulgaris*), калужницы обыкновенной (*Caltha palustris*). Максимальная удельная активность ^{137}Cs , выявленная в пробах чистеца болотного (*Stachyis palustris*), оказалась выше в 3,9 раза по сравнению с удельной активностью данного радионуклида в пробах калужницы болотной (*Caltha palustris*), для которой наблюдалась минимальная удельная активность радионуклида в надземной фитомассе.

Анализ полученных коэффициентов накопления (КН) в исследованиях как 2015 г., так и 2020 г. показал биологические различия растений по способности аккумулировать радионуклид.

Следует отметить, что все изучаемые растительные образцы соответствовали требованиям РДУ/ЛТС-2004.

Удельная активность ^{137}Cs в почве уменьшилась в 2020 г. по сравнению с 2015 г. на 220 Бк/кг.

В растительности дернистошучкового типа луга в 2015 г. выделили и проанализировали 12 видов лекарственных растений, относящихся к 11 родам и 10 семействам (см. табл.).

Удельная активность ^{137}Cs в почве в 2015 г. составила 1160 Бк/кг. Наибольшая удельная активность радионуклида в надземной фитомассе отмечена для тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium*), а наименьшая – для лютика жгучего (*Ranunculus flammula*), что в 3,3 раза меньше, чем для тысячелистника (см. табл.).

Также относительно высокой удельной активностью ^{137}Cs в фитомассе характеризовались черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris*) и лютик едкий (*Ranunculus acris*). В растительности дернистошучкового типа луга в 2015 г. удельная активность радионуклида в надземной фитомассе лекарственных растений не превышала РДУ/ЛТС-2004.

Для оценки радиоактивного загрязнения надземной фитомассы дернистошучкового типа луга в 2020 г. произвели оценку содержания радионуклида также в 12 видах лекарственных растений (см. табл.). Удельная активность ^{137}Cs в почве составила 970 Бк/кг, по сравнению с 2015 г. она уменьшилась на 190 Бк/кг. Удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе лекарственных растений уменьшилась в среднем на 40–84 Бк/кг.

Наибольшая удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе, как и в 2015 г., зафиксирована для тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium*), а минимальная – также для лютика жгучего (*Ranunculus flammula*), что в 3,2 раза меньше, чем для тысячелистника обыкновенного. Коэффициент накопления как в 2015 г., так и в 2020 г. отражал значительные различия по способности к аккумуляции радионуклида растениями. В 2020 г. удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе для всех видов не превышала РДУ/ЛТС-2004.

В растительном покрове крупнозлакового типа луга в 2015 г. было отобрано и проанализировано 12 видов лекарственных растений, которые относились к 12 родам и семействам (см. табл.).

Удельная активность ^{137}Cs в почве составила 1380 Бк/кг. Наибольшая удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе выявлена для лисохвоста лугового (*Alopecurus palustris*), а наименьшая – для горца перечного (*Polygonum hydropiper*), что в 5,9 раза меньше, чем для лисохвоста лугового (см. табл.).

Также высокая удельная активность радионуклида наблюдалась для фитомассы ситника черного (*Juncus atratus*) и аврана лекарственного (*Gratiola officinalis*). Среди 12 анализируемых видов растений только у лисохвоста лугового удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе на 155 Бк/кг превышала РДУ/ЛТС-2004, для остальных видов не выявлено превышения РДУ/ЛТС-2004.

В 2020 г. было проведено повторное радиологическое исследование 12 лекарственных растений крупнозлакового типа луга (см. табл.). Удельная активность ^{137}Cs в почве в 2020 г. была 1150 Бк/кг, что на 230 Бк/кг меньше, чем в 2015 г. Как и в 2015 г., наибольшая удельная активность ^{137}Cs отмечена для надземной фитомассы лисохвоста лугового (*Alopecurus palustris*), ситника черного (*Juncus atratus*), аврана лекарственного (*Gratiola officinalis*). Минимальная удельная активность радионуклида зафиксирована для фитомассы горца перечного (*Polygonum hydropiper*), что в 10 раз меньше, чем для лисохвоста лугового.

По сравнению с 2015 г. удельная активность ^{137}Cs в растениях в 2020 г. уменьшилась в среднем на 20–85 Бк/кг в зависимости от вида лекарственного растения. В 2020 г. удельная активность ^{137}Cs в фитомассе всех 12 видов лекарственных растений не превышала РДУ/ЛТС-2004. Коэффициенты накопления радионуклида, определенные в 2020 г., также отражали выявленные различия в способности аккумуляции радиоцезия растениями (см. табл.).

Аналогично предыдущим исследованиям, в 2015 г. было проведено определение содержания радиоцезия в надземной фитомассе в 12 видах растительного покрова мелкозлакового типа луга (см. табл.).

Удельная активность ^{137}Cs в почве данного типа луга в 2015 г. составила 962 Бк/кг. Наибольшая удельная активность радионуклида в надземной фитомассе отмечена для гвоздики травянки (*Dianthus deltoides*), а наименьшая – для ракитника русского (*Chamaecytisus ruthenicus*). Различия по данному параметру для них составили трехкратную величину. Для всех исследуемых проб не выявлено превышения РДУ/ЛТС-2004 (см. табл.).

Результаты радиологического анализа в 2020 г. показали, что произошло уменьшение удельной активности ^{137}Cs в почве на 202 Бк/кг, по сравнению с 2015 г., а в надземной фитомассе в среднем на 20–40 Бк/кг в зависимости от вида растений (см. табл.).

В 2020 г. для всех растений не наблюдалось превышения РДУ/ЛТС-2004.

Анализ величин коэффициентов накопления подтвердил наличие различий между растениями по способности аккумулировать ^{137}Cs .

Результаты исследований по оценке удельной активности ^{137}Cs в надземной фитомассе растений луговых экосистем в условиях 2015 г. показали, что наибольшие значения данного показателя характерны для крупнозлакового типа луга. Для растительности мелкозлакового типа луга значения анализируемого параметра значительно меньше. Различия в полученных значениях составили 3,5 раза.

Удельные активности ^{137}Cs в фитомассе дернисто-щучкового типа луга и в растительности крупнозлакового типа практически не отличались между собой.

Анализ средней удельной активности ^{137}Cs в фитомассе лекарственных растений в 2020 г. показал, что наибольшая удельная активность радионуклида также характерна для растительности крупнозлакового типа луга, а наименьшая, как и в 2015 г., отмечена для растительного покрова мелкозлакового типа луга (см. табл.).

Также незначительные различия выявлены для значений удельной активности ^{137}Cs в надземной фитомассе для дернисто-щучкового и крупнозлакового типов луга.

Заключение

Таким образом, радиологический анализ надземной фитомассы изучаемых лекарственных растений хозяйственных типов лугов показал, что в 2015 г. еще встречались виды растений (чистец болотный, лисохвост луговой), для которых удельная активность ^{137}Cs превышала РДУ/ЛТС-2004, тогда как в 2020 г. все лекарственные растения соответствовали допустимому уровню.

Установлено, что даже в условиях одного хозяйственного типа луга произрастают виды лекарственных растений с существенными различиями по содержанию ^{137}Cs .

Различия по удельной активности ^{137}Cs в анализируемых видах растений составляли до 5,9 раза.

Удельная активность ^{137}Cs в надземной фитомассе растений в 2020 г. по сравнению с 2015 г. для всех хозяйственных типов лугов уменьшилась в среднем на 20–90 Бк/кг.

Анализ коэффициентов накопления позволил выявить биологические особенности растений по способности аккумулировать радионуклид в фитомассе в зависимости от совокупности факторов. Проведенный анализ коэффициентов накопления радионуклида в растениях на видовом уровне и уровне семейства свидетельствует о том, что радиоактивное загрязнение фитомассы определяется не столько биологическими особенностями вида или семейства, а совокупностью факторов, которые формируют растительные ассоциации и, естественно, типы лугов.

Один и тот же вид растения в условиях различных типов луга может характеризоваться резкими отличиями по содержанию радионуклида.

Сравнительный анализ средней удельной активности ^{137}Cs в надземной фитомассе лекарственных растений показал, что в травостое изучаемых хозяйственных типов лугов наибольшая удельная активность радионуклида выявлена для крупнозлакового типа луга, которая в 4 раза больше, чем для мелкозлакового типа луга.

Литература

- Голиков Ю.Н., Дацкевич П.И., Долгов В.М. Радиоактивная загрязненность и радиационная обстановка ландшафтных комплексов Гомельской и Могилевской областей. Респ. науч.-практ. конф. по радиобиологии и радиоэкологии: тез. докл., Минск, 20–21 декабря 1990 г. Акад. наук БССР, Ин-т радиобиологии АН БССР. Минск, 1990. 55 с.
- Davydova A., Panasiuk A., Melnyk V., Davydova L. ^{137}Cs contaminations in wild-growing medicinal plants of Zhytomyr polissya forests: A 34 years after Chernobyl accident // Ukrainian Journal of Ecology. 2020. Vol. 10, No. 3. P. 208–215.
- Marek W., Wroczynski P. Measurement of the radioactivity of ^{137}Cs in materials of plant origin with potential radioactive contamination // Acta Poloniae Pharmaceutica – Drug research. 2014. Vol. 71, No. 6. P. 1114 – 1118.
- Benova K., Gasparenkova I., Dvorak P. Contamination of Slovak bilberry with radiocaesium, ^{137}Cs in select Slovak location // Folia veterinaria. 2021. No. 65. P. 112 – 115.

5. Pouriani R., Noori M., Madadi M. Radioactivity Concentration in Eight Medicinal and Edible Plant Species from Shazand, Iran // International Journal of Ecosystem. 2015. Vol. 5, No.1. P. 22 – 29.
6. Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Радиоактивное загрязнение лекарственных растений некоторых районов Гомельской области, приграничных с территорией Брянской области России // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 9. С. 57 – 63.
7. Природа Белоруссии: Попул. Энцикл. / Ред. кол.: И.П. Шамякин (гл.ред.) и др. 2-е изд. Минск: БелСЭ, 1989. 328 с.
8. Почвы Белорусской ССР / Под ред. Г.Н. Кулаковской, П.П. Рогового, Н.И. Смеяна. Минск: Урожай, 1974. 328 с.
9. Юркевич И.Д., Гельтман В.С. Районирование лесной растительности БССР // Ботанический журнал. 1960. Т. 45, №8. С. 1132 – 1146.
10. Методика полевых геоботанических исследований. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1938. 215 с.
11. Программа и методика биогеоценологических исследований. М.: Наука, 1974. 404 с.
12. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС). Мн., 1995. 582 с.
13. Сапегин Л.М., Дайнеко Н.М. Хозяйственная типология пойменных лугов Белорусского Полесья // Изучение и сохранение пойменных лугов: материалы Международного совещания, Калуга, 26 – 28 июня 2013 года. Калуга: ООО «Ноосфера», 2013. С. 53 – 58.
14. Определитель высших растений Беларуси / Под ред. В.И. Парфенова. Минск: Дизайн ПРО, 1999. 472 с.
15. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных угодий Беларуси. Методические указания. Науч. ред. академик ААНРБ И.М. Богдевич. Мн.: Бел. изд. Тов-во «Хата», 2001. 60 с.

Поступила: 11.01.2022 г.

Дайнеко Николай Михайлович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой ботаники и физиологии растений Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины Министерства образования Республики Беларусь. **Адрес для переписки:** 246028, Республика Беларусь, Гомель, ул. Советская, д. 104; E-mail: dajneko@gsu.by

Тимофеев Сергей Федорович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры ботаники и физиологии Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины Министерства образования Республики Беларусь, Гомель, Республика Беларусь

Для цитирования: Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф. Оценка радиоактивного загрязнения лекарственных растений луговых экосистем поймы реки Сож спустя 30 лет после катастрофы на Чернобыльской атомной станции // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 80-87. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-80-87

Assessment of radioactive contamination of medicinal plants of meadow ecosystems of the Sozh River floodplain 30 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant

Nikolay M. Daineko, Sergey F. Timofeev

Francisk Skorina Gomel State University of the Ministry of Education of the Republic of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

*The aim of the study is to assess the radioactive contamination of medicinal plants of economic types of meadow ecosystems of the Sozh River floodplain. The objects of the study were medicinal plants of the floodplain of the Sozh River. Soil samples and plant samples were taken for radiological analysis within the boundaries of the selected economic types of meadows. Determination of ^{137}Cs content in soil and plant samples was carried out on the Tennelec. Characteristics of the selected economic types of meadows. 12 species of medicinal plants were analyzed on each type of meadow. In the meadow large-sedimented type, the specific activity of soils in 2015 amounted to 1600 Bq/kg, and in 2020 – 1380 Bq/kg. Radiological analysis of the specific activity of aboveground phytomass in 2015 and 2020 showed that all plant samples did not exceed the republican permissible level of ^{137}Cs content in medicinal technical raw materials – 370 Bq/kg, with the exception of the pure *Stachys palustris* swamp, the permissible level of which was 10 Bq/kg higher. In the turf type of meadows, the specific activity of soils in 2015 was 116 Bq/kg, and in 2020 – 970 Bq/kg. In this type*

Nikolay M. Daineko

Francisk Skorina Gomel State University

Address for correspondence: 104 ul. Sovetskaya, Gomel, 246028, Republic of Belarus; E-mail: dajneko@gsu.by

of meadow, all plant samples did not exceed the permissible level of ^{137}Cs . In the meadow coarse-grained type, the specific activity of soils in 2015 was 1380 Bq/kg, and in 2020 – 1150 Bq/kg. In 2015 and in 2020 all plant samples corresponded to the permissible level of ^{137}Cs content, only in the meadow foxtail in 2015 the specific activity exceeded the permissible level by 155 Bq/kg. In the fine-grained type of meadows, the specific activity of soils in 2015 was 962 Bq/kg, and in 2020 – 704 Bq/kg. Both in 2015 and in 2020, the specific activity of all plant samples was below the permissible level. A comparative analysis of the specific activity of medicinal plants of the studied economic types of meadows shows that in 2020, compared to 2015, has decreased by an average of 1,3 – 1,4 times, the greatest specific activity of plant samples over the years of observation was observed in the meadow type with large leaves, which is 4 times more than in a fine-grained meadow. The decrease in radioactive contamination of medicinal plants occurred with a simultaneous decrease in the density of radioactive contamination of the soil.

Key words: ^{137}Cs , radioactive contamination, specific activity, medicinal plants, economic types of meadows, radiological analysis.

References

1. Golikov Yu.N., Datskevich P.I., Dolgov V.M. Radioactive contamination and radiation conditions of landscape complexes of the Gomel and Mogilev regions. Rep. scientific-practical conf. on radiobiology and radioecology: abstracts. reports, Minsk, December 20 – 21, 1990. Acad. Sciences of the BSSR, Institute of Radiobiology of the Academy of Sciences of the BSSR. Minsk; 1990. 55 p. (In Russian).
2. Davydova A., Panasjuk A., Melnyk V., Davydova L. ^{137}Cs contaminations in wild-growing medicinal plants of Zhytomyr polissya forests: A 34 years after Chernobyl accident. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020;10(3): 208 – 215.
3. Marek W., Wroczynski P. Measurement of the radioactivity of ^{137}Cs in materials of plant origin with potential radioactive contamination. *Acta Polonica Pharmaceutica – Drug research*. 2014;71(6): 1114 – 1118.
4. Benova K., Gasparenkova I., Dvorak P. Contamination of Slovak bilberry with radiocaesium, ^{137}Cs in select Slovak location. *Folia veterinaria*. 2021;65: 112 – 115.
5. Pouriani R., Noori M., Madadi M. Radioactivity Concentration in Eight Medicinal and Edible Plant Species from Shazand, Iran. *International Journal of Ecosystem*. 2015;5(1): 22 – 29.
6. Daineko N.M., Timofeev S.F. Radioactive contamination of medicinal plants in some areas of the Gomel region bordering the territory of the Bryansk region of Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(9): 57 – 63. (In Russian).
7. The nature of Belarus: Popul. Encyclopedia. Ed. number: I.P. Shamyakin (chief editor) et al. 2nd ed. Minsk: BelSE; 1989. 328 p. (In Russian).
8. Soils of the Belarusian USSR. Ed. G.N., Kulakovskaya, P.P. Rogovoy, N.I. Laughing. Minsk: Harvest; 1974. 328 p. (In Russian).
9. Yurkevich I.D., Geltman V.S. Zoning of forest vegetation of the BSSR. *Botanicheskiy zhurnal = Botanic Journal*. 1960;45(8): 1132 – 1146. (In Russian).
10. Field geobotanical research technique. Moscow, Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR; 1938. 215 p. (In Russian).
11. Program and methodology for biogeocenological research. Moscow: Nauka; 1974. 404 p. (In Russian).
12. Radioactive contamination of vegetation in Belarus (in connection with the accident at the Chernobyl nuclear power plant). Minsk; 1995. 582 p. (In Russian).
13. Sapegin L.M., Daineko N.M. Economic typology of floodplain meadows of the Belarusian Polesye. Study and conservation of floodplain meadows: materials of the international meeting, Kaluga, June 26 – 28, 2013. Kaluga: OOO Noosfera; 2013. P. 53 – 58. (In Russian).
14. Keys to higher plants of Belarus. Ed. V.I. Parfenova. Minsk: Design PRO; 1999. 472 p. (In Russian).
15. Large-scale agrochemical and radiological survey of agricultural soils in Belarus. Methodical instructions. Sci. Ed. Academician AANRB I.M. Bogdevich. Minsk: Bel. ed. Tov-in "Khata"; 2001. 60 p. (In Russian).

Received: January 11, 2022

For correspondence: Nikolay M. Daineko – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Botany and Plant Physiology of the Francisk Skorina Gomel State University of the Ministry of Education of the Republic of Belarus (104 ul. Sovetskaya, Gomel, 246028, Republic of Belarus; E-mail: dajneko@gsu.by)

Sergey F. Timofeev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Botany and Physiology, Francisk Skorina Gomel State University of the Ministry of Education of the Republic of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

For citation: Daineko N.M., Timofeev S.F. Assessment of radioactive contamination of medicinal plants of meadow ecosystems of the Sozh River floodplain 30 years after the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 80-87. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-80-87

К проблеме совершенствования законодательного и нормативного обеспечения радиационной безопасности населения

И.К. Романович¹, А.В. Водоватов^{1,2}, А.М. Библин¹, Т.А. Кормановская¹

¹ 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

² Санкт-Петербургский государственный медицинский педиатрический университет, Санкт-Петербург, Россия

С выходом в свет Публикации 103 МКРЗ 2007 г. и стандарта безопасности МАГАТЭ «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, часть 3» 2014 г. в Российской Федерации проводится планомерная работа по гармонизации НРБ и ОСПОРБ с современными международными рекомендациями и стандартами МАГАТЭ. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации № 585 от 13 октября 2018 г. об утверждении «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» и Плана реализации «Основ государственной политики...», утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 02.02.2019 г. № 139-р., начата работа по внесению изменений и дополнений в Федеральные законы № 170-ФЗ от 21 ноября 1995 г. «Об использовании атомной энергии» и № 3-ФЗ от 09.01.1996 г. «О радиационной безопасности населения». Для успешного выполнения поставленных задач необходимо создать межведомственные взаимосвязанные рабочие группы и одновременно приступить к разработке предложений по внесению изменений и дополнений в № 170-ФЗ, № 3-ФЗ, НРБ и ОСПОРБ.

Ключевые слова: № 170-ФЗ, № 3-ФЗ, НРБ, ОСПОРБ, объекты использования атомной энергии, радиационная защита, дозы облучения, нормирование.

После выхода в свет 103 Публикации МКРЗ 2007 г. [1] и особенно после утверждения МАГАТЭ стандарта «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, часть 3» [2] назрела необходимость гармонизации российских нормативно-методических документов с указанными рекомендациями и стандартами. 103 Публикация МКРЗ 2007 г. является дальнейшим развитием системы и философии, изложенной в Публикации 60, и вводит некоторые новые принципы и подходы к обеспечению радиационной безопасности (ситуации планируемого, аварийного и существующего облучения, граничные дозы и референтные уровни), ужесточен предел эквивалентной дозы для хрусталика глаза с 150 мЗв/год до 20 мЗв/год, значительно понижены критерии содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий [1, 3, 4]. В 2014 г. МАГАТЭ выпускает стандарт безопасности под названием «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, часть 3» [2], в которых подтверждает преемственность 103 Публикации МКРЗ и рекомендует странам-участницам МАГАТЭ переход на новые стандарты.

Кроме того, 103 Публикацией комиссия рекомендовала использовать термин «Тканевые реакции» совместно с термином «Детерминированный эффект» [1]. Таким образом, МКРЗ в 103 Публикации обозначила следующие наиболее серьезные биологические эффекты радиационного воздействия на человека:

- детерминированные эффекты (вредные тканевые реакции), по большей части связанные с гибелью или мальфункцией клеток при больших дозах излучения;
- стохастические эффекты.

Детерминированные эффекты (вредные тканевые реакции) возникают после радиационного воздействия на организм сверх определенной дозы облучения, то есть после преодоления некоторой пороговой дозы. Оценки пороговых доз для системы органов (гематопоезическая, иммунная, репродуктивная системы, система кровообращения, дыхательная, костно-мышечная, эндокринная и нервная системы, желудочно-кишечный и мочевыделительный тракты, кожа и глаза) представлены в Публикации 118 МКРЗ [5].

Стохастические эффекты (рак у облученных индивидуумов и наследуемый рак у потомства облученных;

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

наследуемые заболевания; биологические радиационные эффекты у зародыша и плода, не раковые заболевания) имеют вероятностную природу и являются беспороговыми, увеличение частоты их возникновения прямо пропорционально приросту дозы излучения [1, 5].

Кроме выпуска стандарта «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, часть 3» [2], МАГАТЭ за последние полтора десятка лет выпустила около 30 общих и частных стандартов, основные из которых приведены в таблице.

Как уже указывалось выше, 103 Публикация МКРЗ 2007 г. и вышедшие затем стандарты МАГАТЭ являются дальнейшим развитием системы и философии, изложенной в Публикации 60 МКРЗ. Революционных изме-

нений в системе радиационной защиты они не вносят. Следовательно, не требуется коренная, или революционная переработка № 3-ФЗ и НРБ-99/2009, которые надежно обеспечивают радиационную безопасность персонала и населения Российской Федерации, а требуется лишь гармонизация с новыми положениями международных рекомендаций и стандартов.

Первая попытка подготовить гармонизированный со 103 Публикацией МКРЗ и современными стандартами МАГАТЭ проект НРБ-2019 была сделана в 2018 г. межведомственной рабочей группой, созданной приказом руководителя Роспотребнадзора. Разработанный проект НРБ-2019 был доложен руководителем рабочей группы, директором Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева)

Основные стандарты и руководства МАГАТЭ по радиационной защите, выпущенных в последние 15 лет

Таблица

Table

IAEA Basic standards and guides on the radiation safety published in the last 15 years

Год издания [Year]	Наименование документа на английском [Name in English]	Наименование документа на русском [Translation into Russian]
2016	Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety General Safety Requirements GSR Part 1 (Rev. 1)	Государственная, правовая и регулирующая основа обеспечения безопасности. Общие требования безопасности, часть 1 (Rev. 1)
2016	Leadership and Management for Safety No. GSR Part 2	Лидерство и менеджмент для обеспечения безопасности. Общие требования безопасности, часть 2
2016	Safety Assessment for Facilities and Activities: General Safety Requirements No. GSR Part 4 (Rev. 1)	Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности, часть 4 (Rev. 1)
2009	Predisposal Management of Radioactive Waste: General Safety Requirements No. GSR Part 5	Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением. Общие требования безопасности, часть 5
2014	Decommissioning of Facilities: General Safety Requirements No. GSR Part 6	Вывод из эксплуатации установок. Общие требования безопасности, часть 6
2015	Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency: General Safety Requirements No. GSR Part 7	Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Общие требования безопасности, часть 7
2018	Occupational Radiation Protection: General Safety Guide No. GSG-7	Радиационная защита при профессиональном облучении. Общее руководство по безопасности № GSG-7
2018	Radiation Protection of the Public and the Environment: General Safety Guide No. GSG-8	Радиационная защита населения и окружающей среды. Общее руководство по безопасности № GSG-8
2018	Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities: General Safety Guide No. GSG-10	Перспективная оценка радиационного воздействия на окружающую среду для объектов и деятельности. Общее руководство по безопасности № GSG-10
2018	Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation: Specific Safety Guide No. SSG-46	Радиационная защита при медицинском использовании ионизирующего излучения. Специальное руководство по безопасности № SSG-46
2015	Protection of the Public against Exposure Indoors due to Radon and Other Natural Sources of Radiation: Specific Safety Guide No. SSG-32	Защита населения в помещениях от воздействия радона и других природных источников ионизирующего излучения. Специальное руководство по безопасности № SSG-32
2018	Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment: General Safety Guide No. GSG-9	Регулирующий контроль радиоактивных выбросов в окружающую среду. Общее руководство по безопасности № GSG-9
2021	Management of Residues Containing Naturally Occurring Radioactive Material from Uranium Production and Other Activities: Specific Safety Guide No. SSG-60	Обращение с отходами, содержащими радиоактивные материалы естественного происхождения от производства урана и других видов деятельности. Специальное руководство по безопасности № SSG-60

на НТС-10 «Экологическая, ядерная и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом». В заключении НТС-10 отмечено, что проект НРБ-2019 не соответствует существующей законодательной базе и Госкорпорация «Росатом» не готова к внедрению новых положений проекта НРБ-2019.

На основании решения НТС-10 и письма генерального директора Госкорпорации «Росатом» руководителем Роспотребнадзора принято решение о продлении на 5 лет действующих НРБ-99/2009 и о продолжении плановой работы над перспективным проектом НРБ [6]. Руководителем рабочей группы было предложено проводить работу одновременно над 3 документами: над предложениями по внесению изменений в № 3 ФЗ «О радиационной безопасности» и проектами гармонизированных НРБ и ОСПОРБ.

В мае 2019 г. на заседании Российской научной комиссии по радиологической защите (РНКРЗ) был рассмотрен вопрос «Проект НРБ-2019: достигнутые результаты, проблемы гармонизации, перспективы внедрения новых международных подходов в отечественное нормирование» [6]. РНКРЗ поддержала решение руководителя Роспотребнадзора о продлении на 5 лет актуализированных НРБ-99/2009 и о продолжении плановой работы над гармонизированным с международными рекомендациями проектом НРБ. РНКРЗ также посчитала целесообразным вести разработку гармонизированных с международными рекомендациями проектов НРБ и ОСПОРБ одновременно. На основе проектов, гармонизированных с международными рекомендациями НРБ и ОСПОРБ, РНКРЗ решила предложить соответствующие изменения в профильные законы Российской Федерации [6].

Ситуация значительно изменилась после выхода Указа Президента Российской Федерации № 585 от 13 октября 2018 г., которым утверждены «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу». План мероприятий по реализации «Основ государственной политики...» утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 02.02.2019 г. № 139-р. Данным Планом предусмотрено в том числе внесение изменений и дополнений в Федеральные законы № 170-ФЗ от 21 ноября 1995 г. «Об использовании атомной энергии» и № 3-ФЗ от 09.01.1996 г. «О радиационной безопасности населения», а также гармонизация российских нормативно-методических документов по обеспечению радиационной безопасности с международными рекомендациями. Ответственным за внесение изменений в № 3-ФЗ, а также по гармонизации российских нормативно-методических документов по обеспечению радиационной безопасности с международными рекомендациями, а это прежде всего НРБ и ОСПОРБ, в плане правительства определен Роспотребнадзор.

По распоряжению руководителя Роспотребнадзора в начале 2020 г. специалистами ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева были подготовлены первые предложения по внесению изменений в № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения», которые и были опубликованы в начале мая 2020 г. на сайте regulation.gov.ru (ID проекта – 02/04/05-20/00101773) для широкого обсуждения. К сожалению, к маю 2020 г. межведомственная рабочая груп-

па по разработке предложений по внесению изменений в № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» сформирована не была.

На представленные материалы поступило значительное количество отзывов, в том числе в открытой печати [7, 8]. В препринте ИБРАЭ РАН № IBRAE-2020-03 [7] делается вывод об оторванности № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» от законодательства Российской Федерации в области использования атомной энергии. Специалисты ИБРАЭ РАН ставят вопрос, «что первично: радиационная безопасность или безопасность объектов атомной энергетики и промышленности». И ответ для них очевиден: «Заслуги медицины, в том числе радиационной гигиены, безмерны. Но в настоящий период развития атомной науки и техники в рассматриваемой области более важным становится не что нужно достигать в смысле снижения доз, а нужно ли бороться за это снижение или нет...». В данном контексте не стоит вопрос гармонизации российского законодательства и нормативных документов с международными рекомендациями и стандартами. Вопрос в том, чтобы на пути дальнейшего развития объектов атомной энергетики и промышленности не стояли гигиенисты со своими требованиями по обеспечению радиационной безопасности.

И еще раз обращаем внимание, что в Публикации 103 МКРЗ [1] и Международных основных нормах безопасности, часть 3 [2] ужесточен только предел эквивалентной дозы для хрусталика глаза с 150 мЗв/год до 20 мЗв/год, других изменений дозовых пределов не вводится международными рекомендациями и российскими нормативными документами. В этой связи посыл специалистов ИБРАЭ РАН к грядущему снижению доз не правомерен.

Следует отметить, что попытки отмены № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» предпринимались неоднократно. Так, в 2001 г. была создана рабочая группа в Комиссии по подготовке предложений о разграничении предметов ведения и полномочий между федеральными органами государственной власти, органами государственной власти субъектов Российской Федерации и органами местного самоуправления, созданной в соответствии с Указом Президента Российской Федерации [9]. Рабочей группой был сделан вывод: «В этой ситуации наиболее эффективным решением является отказ от Закона «О радиационной безопасности населения», учет отдельных специальных требований по обеспечению радиационной безопасности в действующих законах РФ путем внесения в них сравнительно небольших изменений и дополнений и перенос акцентов в законодательной базе обеспечения радиационной безопасности на подзаконные акты». Среди мотивов приводились и такие, что ни один другой вредный фактор не имеет своего закона, а только радиационный фактор, и что ни в одном другом законе не приводятся конкретные нормативы, только в Законе «О радиационной безопасности населения». И после 2001 г. еще не раз предпринимались попытки отменить закон или изъять из него допустимые дозовые пределы для персонала и населения. И только бескомпромиссная позиция заместителя министра здравоохранения – Главного государственного санитарного врача Российской Федерации, а с 2003 г. по 2013 г. – руководителя Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, академика

РАН Г.Г. Онищенко позволила сохранить Закон «О радиационной безопасности населения».

Следующим шагом в разработке предложений по внесению изменений в № 3-ФЗ от 09.01.1996 г. «О радиационной безопасности населения» стало обсуждение 6 октября 2021 г. данной темы на НТС-10 Госкорпорации «Росатом». В решении предложено отказаться от внесения изменений в № 3-ФЗ от 09.01.1996 г. «О радиационной безопасности населения» и подготовить новый законодательный акт «О радиационной безопасности в Российской Федерации». В представленных основных элементах нового законодательного акта «О радиационной безопасности в Российской Федерации» человек выпал как таковой. В качестве основных элементов нового законодательного акта «О радиационной безопасности в Российской Федерации» в решении НТС-10 предложено:

- установление обязательных требований в области обеспечения радиационной безопасности ИИИ;
- производственный контроль за обеспечением радиационной безопасности;
- оценка воздействия на окружающую среду и государственная экологическая экспертиза.

Но нет оценки воздействия на человека, нет упоминаний о радиационных рисках и, конечно же, нет упоминаний о санитарно-эпидемиологической экспертизе.

№ 3-ФЗ декларирует, что радиационная безопасность населения (далее – радиационная безопасность) – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения. Что же тогда, по мнению оппонентов, означает «установление обязательных требований в области обеспечения радиационной безопасности ИИИ», как ИИИ будут защищать от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения? До настоящего времени считалось, что обязательные требования в области обеспечения радиационной безопасности объектов использования атомной энергии, куда входят и ИИИ, регулирует № 170-ФЗ. Еще раз отмечаем, что № 3-ФЗ устанавливает требования, нормы и принципы обеспечения радиационной безопасности населения от всех источников ионизирующего излучения (техногенных, природных, медицинских), а не только техногенных, как предлагается в проекте нового законодательного акта.

На практике подразумевалось, что № 170-ФЗ регулирует техническую сторону объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Когда же речь идет о радиационной безопасности объектов использования атомной энергии, то подразумевается, что проектирование, строительство, эксплуатация, вывод из эксплуатации ОИАЭ, с технической и организационной точек зрения, будет безопасно для окружающей среды и человека. № 170-ФЗ не регулирует облучение природными источниками излучения, особенно что касается коммунальных условий, не регулирует процессы оптимизации (недопущения необоснованного облучения) в медицине. Т.е. он не охватывает весь спектр проблем предотвращения облучения человека. Это всегда была прерогатива № 3-ФЗ.

Следовательно, правомочно ставить вопрос, не что первично: радиационная безопасность или безопасность объектов атомной энергетики и промышленности, а какой закон является более всеобъемлющим, отражающим все вопросы обеспечения радиационной безопасности насе-

ления страны, а какой закон – частный, решающий только вопросы обеспечения безопасной эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Наглядным примером значимости источников ионизирующего излучения служит структура доз облучения населения Российской Федерации [10, 11]. Так, в 2019 г. основной вклад в структуру коллективной дозы внесли природные и медицинские источники ионизирующего излучения (84,7% и 15,07% соответственно). Вклад техногенного фона и облучения, обусловленного эксплуатацией источников ионизирующего излучения, был пренебрежимо мал (0,17% и 0,05% соответственно). По данным радиационно-гигиенической паспортизации в 2020 г., в связи с пандемией новой коронавирусной инфекции COVID-19 вклад медицинских источников в структуру доз облучения населения вырос до 20,1%, т.е. рост составил 5%. Следует отметить, что приrost коллективной дозы от медицинского облучения в 2020 г. на 27 тыс. чел.-Зв соизмерим с коллективной дозой населения загрязненных территорий Белоруссии, России и Украины от Чернобыльской аварии за 20 лет (59 тыс. чел.-Зв. за период 1986–2005 гг.) [12].

Таким образом, при разработке и актуализации нормативно-правовых актов в Российской Федерации приоритетным является обеспечение радиационной защиты населения от природных и медицинских источников ионизирующего излучения. Предложенная версия законодательного акта «О радиационной безопасности в Российской Федерации» данному условию, к сожалению, не соответствует.

Вызывает озабоченность и самоустранение РНКРЗ от продуктивной работы по вопросам обоснований необходимости и реализации в российском законодательстве и нормативных документах новых положений международных рекомендаций и стандартов. К сожалению, в последние годы РНКРЗ по данным вопросам проводила только заслушивания о ходе подготовки проектов новых документов.

Публикация 103 МКРЗ 2007 г. [1] и стандарт безопасности МАГАТЭ «Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности, часть 3» [2], хотя и не являются революционными, однако вносят некоторые новшества в принципы и подходы радиационной защиты, а именно: взамен облучения техногенными, медицинскими и природными источниками и аварийного облучения вводятся понятия 3 ситуаций облучения – планируемого, аварийного и существующего; новые термины – граничные дозы и референтные уровни; рекомендуется новый предел эквивалентной дозы для хрусталика глаза в 20 мЗв/год; понижаются критерии содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий.

В связи с различными подходами к нормированию и критериями в России и предложенными в рекомендациях необходимо найти подходы к отнесению облучения от природных источников облучения к планируемому и существующему облучению, а также переходу от аварийного облучения к существующему облучению.

Введенные новые термины «Граничные дозы» и «Референтные уровни» – не обязательные к исполнению требования, а ориентиры. Граничные дозы играют важную роль в новой системе радиационной защиты для

принятия решений о необходимости оптимизации защиты и безопасности в отношении профессионального облучения и облучения населения в ситуациях планируемого облучения. Референтные уровни используются для оптимизации защиты и безопасности в ситуациях аварийного облучения и ситуациях существующего облучения. Основной проблемой их внедрения в российские нормативные документы является то, что ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ устанавливает гигиенические нормативы (ПДК, ПД), обязательные к исполнению. Для применения данных понятий в НРБ и ОСПОРБ необходима их имплементация в законодательство Российской Федерации.

Для введения нового предела эквивалентной дозы для хрусталика глаза в 20 мЗв/год требуется проведение научных исследований по установлению профессий, видов работ, источников излучения, при которых может быть превышен предел эквивалентной дозы для хрусталика глаза 20 мЗв/год и установлению категорий лиц, для которых должен быть установлен обязательный индивидуальный дозиметрический контроль облучения хрусталиков глаз. До настоящего времени считалось, что при допустимой дозе облучения всего тела в 20 мЗв/год, в 99,9% не будет превышен предел эквивалентной дозы для хрусталика глаза в 150 мЗв/год. В итоге в стране, как и за рубежом, практически не проводится индивидуальный дозовый контроль облучения хрусталиков глаз. Обязательное введение индивидуального дозового контроля облучения хрусталика глаз всего персонала, работающего с ИИИ, в ближайшее десятилетие на практике не выполнимо.

В 2010 г. на основе анализа новых эпидемиологических данных и с учетом повышения примерно в 2 раза номинального коэффициента риска МКРЗ в Публикации 103 [1] и МАГАТЭ в GSR Part 3 [2] рекомендуют для жилых помещений установить в качестве референтного уровня объемной активности (ОА) радона значение, равное 300 Бк/м³. В РФ содержание радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий нормируется значением эквивалентной равновесной объемной активности изотопов радона (ЭРОА радона). Соотношение между ОА радона и ЭРОА радона – 0,4. Следовательно, рекомендуемый МАГАТЭ уровень в 300 Бк/м³ по АО будет равняться 120 Бк/м³ ЭРОА радона.

При гармонизации НРБ и ОСПОРБ с указанными международными документами необходимо решить сразу две задачи:

- достигим ли в Российской Федерации гигиенический норматив или референтный уровень по содержанию радона в помещениях жилых и общественных зданий на уровне 120 Бк/м³ ЭРОА радона;
- целесообразен ли переход в российских нормативных документах от единиц измерения в ЭРОА радона на единицы АО радона.

В этой связи следует отметить, что 6 субъектов Российской Федерации (Республика Бурятия, Республика Алтай, Республика Тыва, Ставропольский край, Забайкальский край и Еврейская АО) относятся к регионам с повышенными дозами природного облучения населения. Основным дозообразующим фактором во всех случаях является высокое содержание радона в воз-

духе помещений. Доля помещений, не соответствующих действующим требованиям нормативных документов (200 Бк/м³ ЭРОА радона), в этих регионах составляет от 2,2 до 15%. Снижение гигиенического норматива ЭРОА радона до 120 Бк/м³ увеличит долю помещений, не соответствующих требованиям безопасности для каждого региона в диапазоне от 4,7 до 24%. К примеру: установление гигиенического норматива ЭРОА радона в 120 Бк/м³ повлечет за собой необходимость проведения мероприятий по снижению содержания радона в воздухе каждого четвертого помещения в Республике Алтай. Бесспорно, что на этих территориях ужесточение нормативов приведет к ситуации невозможности их исполнения и, как следствие, к негативным социальным последствиям (к закрытию детских образовательных учреждений и социальных объектов) [13, 14].

Кроме указанных вопросов, требуют решения и множество других, таких, например, как внедрение новых подходов в аварийном реагировании, практической реализации принципов обоснования и оптимизации радиационной защиты при использовании природных и медицинских источников ионизирующего излучения. Для их решения требуется системный подход и участие всех ведущих специалистов-практиков и ученых, работающих в области обеспечения радиационной безопасности.

Заключение

Нет сомнений в необходимости дальнейшей гармонизации отечественного законодательства и нормативных документов по обеспечению радиационной безопасности с международными рекомендациями и стандартами. Однако гармонизация не должна быть самоцелью или формальностью. Требуется тщательная проработка всех вносимых изменений и дополнений в плане сохранения достигнутых успехов в обеспечении радиационной безопасности населения страны, практической реализации, экономического обоснования.

Для качественной работы по гармонизации законодательства и нормативных документов по обеспечению радиационной безопасности (НРБ и ОСПОРБ) в Российской Федерации необходимо создать межведомственные взаимосвязанные рабочие группы и одновременно приступить к разработке предложений по внесению изменений и дополнений в №170-ФЗ, № 3-ФЗ, НРБ и ОСПОРБ. Только в этом случае возможно устранение дублирования, гармонизации понятий и терминологии не только с международными рекомендациями и стандартами, но и между национальными законами, нормами и правилами.

Необходимо активизировать работу РНКРЗ, из членов РНКРЗ создать рабочие группы по изучению, научному анализу, экономическому обоснованию и дальнейшему вынесению на обсуждение комиссии отдельных наиболее важных предложений по внесению изменений в законы и нормативные документы.

Литература

1. ICRP. The 2007 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. 2007.
2. МАГАТЭ. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ. 2014. 477 с.
3. Романович И.К., Репин В.С. О новых Рекомендациях

- МКРЗ. Часть 1: Основы обеспечения радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 1. С. 47-52.
4. Репин В.С., Романович И.К., Вишнякова Н.М. О новых Рекомендациях МКРЗ. Часть 2: Применение рекомендаций // Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 2. С. 54-60.
 5. Стюарт Ф.А., Аклев А.В., Хауэр-Дженсен М. Труды МКРЗ. Публикация 118. Отчет МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдаленным эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты / под ред.: Аклева А.В., Киселева М.Ф.; пер. с англ.: Е.М. Жидкова, Н.С. Котова. Челябинск, 2012. 384 с.
 6. Заключение Российской научной комиссии по радиологической защите по результатам заседания 13 мая 2019 г. // Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 2. С. 2-7.
 7. Ведерникова М.В., Линге И.И., Панченко С.В., и др. Актуальные вопросы внесения изменений в Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». (Препринт / Ин-т проблем безопасности развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2020-03). М.: ИБРАЭ РАН, 2020. 22 с.
 8. Шинкарев С.М., Кочетков О.А., Ключков В.Н., Барчуков В.Г. К дискуссии о внесении изменений в федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 3. С. 77-78.
 9. Указ Президента Российской Федерации от 21 июня 2001 года № 741 «О Комиссии при Президенте Российской Федерации по подготовке предложений о разграничении предметов ведения и полномочий между федеральными органами государственной власти, органами государственной власти субъектов Российской Федерации и органами местного самоуправления».
 10. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 год (радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2020.
 11. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год (радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021.
 12. НКДАР ООН. Последствия облучения для здоровья человека в результате чернобыльской аварии: научное приложение к докладу НКДАР ООН 2008 года на Генеральной Ассамблее. ООН: Нью Йорк, 2012. 182 с.
 13. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., и др. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия; под ред. акад. РАН Онищенко Г.Г. и проф. Поповой А.Ю. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
 14. Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. К обоснованию изменений в нормировании содержания радона в воздухе помещений // Здоровье населения и среда обитания. 2019. № 6 (315). С. 42-48.

Поступила: 22.11.2021 г.

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

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

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

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

Для цитирования: Романович И.К., Водоватов А.В., Библин А.М., Кормановская Т.А. К проблеме совершенствования законодательного и нормативного обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 88-95. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-88-95

On the issue of the development of legislative and regulatory provision of the radiation safety of the public

Ivan K. Romanovich¹, Aleksandr V. Vodovatov^{1,2}, Artem M. Biblin¹, Tatyana A. Kormanovskaya¹

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

After the publication of ICRP Publication 103 in 2007 and IAEA Basic Safety Standard "Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General safety requirements Part 3" in 2014, there is an ongoing process in the Russian Federation on the harmonization of the norms of the radiation safety and basic rules on the provision of the radiation safety with the international requirements. According to the Decree of the President of the Russian Federation № 585 "On the establishment of the basis of the governmental policy in the field of the provision of nuclear and radiation safety in the Russian Federation in the period up to 2025 and the future perspective" and the Plan of the execution of the "basis of the governmental policy...", approved by the Decree of the Government of the Russian Federation № 139-р, 02.02.2019, a work has been initiated on the development of the changes and additions into the Federal State Laws № 170-FZ "On the use of the nuclear energy" and № 3-FZ "On the radiation safety of the public". For the successful execution of the mission it is necessary to develop joint inter-agency workgroups with the parallel development of the changes and additions to the № 170-FZ, №3-FZ, NRB and OSPORB.

Key words: № 170-FZ, №3-FZ, NRB, OSPORB, facilities of the use of atomic energy, radiation safety, doses form ionizing exposure, regulation.

References

- ICRP. The 2007 Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 103. 2007.
- 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, 2014, GSR Part 3, 477 p. (in Russian).
- Романович Romanovich IK, Repin VS. On new recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP) Part 1: Radiation Safety Basis. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 47-52. (In Russian).
- Repin VS, Romanovich IK, Vishnyakova NM. On new ICRP recommendations. Part 2: Application of the Recommendations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(2):54-60. (In Russian).
- Annals of ICRP. Publication 118. ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs – Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. Ed. by Akleev A.V., Kiselev M.F.; translation from English by E.M. Zhidkov, N.S. Kotov. Chelyabinsk; 2012. 384 p. (In Russian).
- Summary of the Russian scientific commission on the radiological protection based on the results of the meeting 13.05.2019. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2019;28(2): 2-7. (In Russian).
- Vedernikova MV, Linge II, Panchenko SV, Strizhova SV, Supotaeva OA, Utkin SS. On the issue of amendments to the Federal Law of January 9, 1996 No.3-FZ "On radiation safety of population". (Preprint / Nuclear Safety Institute RAS, № IBRAE-2020-03). Moscow: Nuclear Safety Institute RAS; 2020. 22 p. (In Russian).
- Shinkarev SM, Kochetkov OA, Klochkov VN, Barchukov VG. On the discussion on the issue of amendments to the Federal Law of January 9, 1996 No.3-FZ "On radiation safety of population". *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2020;65(3): 77-78. (In Russian).
- Decree of the President of the Russian Federation № 741, 21.06.2001 "On the commission at the President of the Russian Federation on the development of the proposals on the division of the roles and responsibilities between the federal governmental entities, governmental entities of the subjects of the Russian Federation and local government" (In Russian).
- Results of the radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation in 2019 (radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor; 2020 (In Russian).
- Results of the radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation in 2020 (radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor; 2021 (In Russian).
- UNSCEAR. Health effects due to radiation from the Chernobyl accident: Scientific annexes C, D and E. UN, New York; 2012. 182 p. (In Russian).
- Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, et al. Natural sources of ionizing exposure: doses, radiation risks, prophylactic measures; ed. by academician of RAS Onischenko G.G. and prof Popova A. Yu." FBUN NIIRG after prof. P.V. Ramzaev; 2018. 432 p. (In Russian).
- Romanovich IK, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. On the justification of the changes in the regulation of the radon concentration in the air of the premises. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Health of the public and environment*. 2019;6(315): 42-48. (In Russian).

Received: November 22, 2021

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

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)

Aleksandr V. Vodovotov – 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

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

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

For citation: Romanovich I.K., Vodovotov A.V., Biblin A.M., Kormanovskaya T.A. On the issue of the development of legislative and regulatory provision of the radiation safety of the public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1. P. 88-95. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-88-95

Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения

А.М. Маренный¹, С.Ю. Антропов¹, Л.Э. Карл^{1,2}, Д.В. Щитов³, П.А. Сидякин³, М.А. Мурзабеков³

¹ Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

² Российский университет Дружбы народов, Москва, Россия

³ Северо-Кавказский федеральный университет, Пятигорск, Россия

Разработана система мотивированного сбора информации о содержании радона в воздухе помещений. Система базируется на передаче владельцу помещения приборов для интегральных и/или квазиинтегральных измерений объемной активности радона и обмене необходимой информацией об условиях и результатах измерения между ним и измерительной лабораторией с помощью современной онлайн-технологии. Реализованная на сайте система информационной поддержки и использование технологий мобильной связи призваны привлечь дополнительных участников измерений и расширить круг доступных для обследований объектов. При этом убираются посредники между измерительной лабораторией и владельцем помещения. Применение облачных технологий позволяет оптимизировать обмен информацией между участниками, а использование QR-кодов на детекторах — исключить ошибки, связанные с идентификацией детектора и его координатной привязкой к месту обследования. Примененные в системе программные модули автоматизируют процесс ввода этой информации. В системе мотивированного сбора информации применяются приборы на основе пассивных методов измерения. Предполагается, что в качестве основных будут использоваться приборы с трековым детектором. Также возможно применение угольно-адсорбционных пробоотборников, но только для измерений в населенных пунктах, из которых возможна доставка в обрабатывающую лабораторию в течение не более 1 суток. Проведено тестирование возможности практического использования системы лицами, не являющимися специалистами в области радиационного контроля, на примере малого и крупного населенного пункта (станция Кочубеевская и город Пятигорск, Ставропольский край). В целом, тестирование показало работоспособность системы. По результатам в систему были внесены изменения: увеличен размер QR-кодов и изменена их цветовая палитра, а справочная система дополнена информацией о способах входа в режим редактирования без QR-кода. С социальной точки зрения, система мотивированного сбора информации обеспечивает оказание экономически доступной для большинства граждан услуги по определению уровня облучения радоном в воздухе помещений принадлежащих им зданий и помещений. При этом в перспективе достигается значительная экономия бюджетных ассигнований, требуемых для создания карты потенциальной радоноопасности территории страны.

Ключевые слова: радон, обследования, объемная активность радона, ЭРОА радона, доза, помещения, жилые и общественные здания, система мотивированного сбора.

Введение

Наибольший вклад в суммарную дозу облучения населения создает ингаляция короткоживущих дочерних продуктов распада радона, находящихся в воздухе помещений и атмосферном воздухе [1].

Согласно рекомендациям международных организаций в области радиационной безопасности населения, концентрация радона¹ в помещениях различного назначения не должна превышать определенного значения или быть как можно меньше [2–4]. В соответствии с дей-

¹ Количественно оценивается величинами «Объемная активность радона, Бк/м³» (ОА радона) и/или «Эквивалентная равновесная объемная активность радона, Бк/м³» (ЭРОА радона).

Маренный Альберт Михайлович

Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены

Адрес для переписки: 123182, Москва, ул. Щукинская, д. 40; E-mail: amarennyy@yandex.ru

ствующими российскими нормативными документами^{2,3} суммарное среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона ($\text{ЭРОА}_{\text{Рн}} + 4,6 \cdot \text{ЭРОА}_{\text{Пн}}$) в помещениях эксплуатируемых жилых и общественных зданий не должно превышать 200 Бк/м^3 , а во вновь построенных (реконструированных) – 100 Бк/м^3 .

Для определения значений ОА и ЭРОА радона в помещениях используют различные методы, отличающиеся длительностью и процедурой измерения, а также используемыми средствами измерений [5, 6]:

- мгновенные измерения ОА и/или ЭРОА радона – длительность измерения от минут до часа;
- квазиинтегральные измерения – методы, длительность непрерывного измерения которых составляет от нескольких часов до 4–5 суток.
- интегральные методы – методы, обеспечивающие длительность непрерывного измерения ОА радона от нескольких суток до полугода – года.

Результатом интегральных или квазиинтегральных методов является средняя за период измерения ОА радона, результатом мгновенных методов – мгновенная ОА или ЭРОА радона.

Организация радоновых обследований зданий

Широкое распространение для проведения масштабных обследований содержания радона в зданиях в мировой практике получили позволяющие проводить интегральные измерения пассивные экспозиметры с твердотельными диэлектрическими трековыми детекторами (ДТД), помещенными в пробоотборную камеру [5]. Эти приборы просты, дешевы, не требуют энергоснабжения и обслуживания в процессе экспонирования. Именно на основании результатов интегральных измерений содержания радона в воздухе помещений, как правило, делается вывод о превышении установленных санитарными нормами допустимых уровней и принимается решение о необходимости проведения радонозащитных мероприятий в здании.

Угольно-адсорбционный метод, относящийся к квазиинтегральным методам, сочетает в себе экспрессность измерений, с одной стороны, и их усредненность, с другой. Это позволяет успешно использовать такие камеры для полуконтактного обследования помещений, приемки в эксплуатацию вновь построенных зданий, а также, при условии многократного экспонирования в одном

и том же помещении, для обследования помещений в существующих зданиях с целью предварительного выявления радоноопасных объектов. Этот метод позволяет относительно быстро получить оценочные данные по содержанию радона в зданиях с разумной достоверностью при наименьших затратах.

В мировой практике измерения с помощью пассивных трековых камер и угольно-адсорбционных пробоотборников являются основными методами масштабных мониторинговых радоновых обследований (см., например, [3, 5, 6]).

Оценка уровней радиационного воздействия природных источников ионизирующих излучений на население возможна только на основе многолетних, территориально масштабных обследований с аккумуляцией результатов в информационно-аналитических ресурсах. В нашей стране такими ресурсами являются Федеральный банк данных по индивидуальным дозам облучения граждан, создаваемым естественным радиационным и техногенно измененным радиационным фоном (ФБДОПИ), базирующийся в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева⁴, ведомственный банк данных в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна (сведения по закрытым административным территориальным образованиям – ЗАТО) и база данных информационно-аналитической системы по природным источникам ионизирующих излучений (ИАС ПИИИ) ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России [7].

Важной особенностью банков данных ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (сведения по всем субъектам Российской Федерации) и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна является постоянное пополнение данных. В этот процесс вовлечены лаборатории радиационного контроля Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора в субъектах РФ, ФМБА России, других ведомств, а также большое количество аккредитованных на соответствующие виды измерений лабораторий различных форм собственности, не имеющих ведомственной принадлежности и не финансируемых из бюджета.

Основной объем результатов измерений ОА и ЭРОА радона получен с использованием мгновенных или квазиинтегральных методов, каждый из которых в отдельности не может быть основой дозиметрических оценок на длительных интервалах времени, однако статистическая обработка столь значительных объемов данных (несколько сотен тысяч записей) позволяет получить для всех субъ-

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.)]

³ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 г. № 40. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115. [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18155. (In Russ.)].

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 16.06.1997 № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан». [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 718 of 16.06.1997 "On the procedure for establishing a unified state system for monitoring and recording individual doses to citizens". (In Russ.)]

ектов РФ средние значения ОА и ЭРОА радона [8], на основе чего могут быть выявлены наиболее радоноопасные субъекты.

База данных ИАС ПИИИ, в отличие от названных банков данных, содержит, в основном, результаты интегральных измерений концентрации радона в помещениях населенных пунктов субъектов РФ и ЗАТО [7], полученные сотрудниками НТЦ РХБГ в рамках выборочных обследований населенных пунктов. Объем базы данных составляет более 23 000 результатов измерений ОА радона. Результаты интегральных измерений позволяют производить дозиметрические оценки на основании существенно меньших объемов данных и адресно выявлять радоноопасные объекты в масштабе отдельных участков местности и зданий.

Формирование выборок для проведения интегральных измерений возможно на основании следующих подходов [5]:

- предварительный случайный выбор объектов измерений с использованием математического аппарата по МР 11-2/206-09⁵;
- случайный выбор объектов, учитывающий возможность последующего привлечения персонала учреждений и предприятий к проведению обследований.

Второй подход применяется в НТЦ РХБГ уже около 15 лет, так как во многих ситуациях только так можно провести выборочное радоновое обследование населенного пункта. Это обусловлено тем, что доступ во многие здания, выбранные случайным образом, ограничен. Известно, что при применении средств интегральных измерений (пассивных экспозиметров) отсутствует необходимость личного присутствия на объектах обследования квалифицированного оператора, установка и сбор детекторов может осуществляться владельцами помещений на основании понятной для них инструкции.

Суть подхода к выбору объекта обследования состоит в следующем [5]: «Совместно с территориальным ЦГиЭ ФМБА России намечается сеть базовых организаций, относительно равномерно размещенных по территории населенного пункта (школы, детские сады, другие учебные заведения, предприятия обслуживания и т.п.) с относительно большим количеством работников (сотрудники медицинских и санитарно-гигиенических органов, учителя и учащиеся образовательных учреждений и т.д.).

При выборе организаций учитываются как рекомендации МР 11-2/206-09, так и возможность доступа в здание. Экспозиметры передаются уполномоченным лицам организаций. Часть экспозиметров размещается для измерений в служебных зданиях, а основное количество (вместе с инструкцией и опросной формой с указанием места, периода и адреса экспонирования) передается сотрудникам, учащимся и т.д. для самостоятельной установки по месту жительства. Продолжительность экс-

понижения в помещениях составляет обычно от 2 до 4 месяцев. Экспозиметры размещаются на всех этажах зданий в жилых и общественных помещениях, преимущественно отдаётся первым этажам и помещениям с наиболее длительным пребыванием населения, часть экспозиметров размещается в подвалах. После окончания экспонирования приборы возвращаются ответственному лицу по месту работы или учёбы для пересылки в лабораторию, осуществляющую «обработку результатов измерений».

Очевидно, что результаты обследований с участием владельцев помещений приводят к отклонениям от результатов представительной случайной выборки, и это необходимо учитывать при обработке результатов обследования. Тем не менее, обработка полученных результатов измерений на первых и более высоких этажах при учете демографии, строительных характеристик зданий и т.д. даёт оценку среднегодовых значений ЭРОА и доз облучения радоном для населения данного населенного пункта⁶, а обработка результатов измерений в подвалах и на первых этажах зданий без подвалов позволяет выделить зоны разной потенциальной радоноопасности на территории города. Кроме того, вне зависимости от объема выборки, выявляются попавшие в неё отдельные объекты, нуждающиеся в противорадионных мероприятиях.

К сожалению, объем финансируемых из бюджета радоновых обследований с учетом количества населенных пунктов и эксплуатируемых зданий в стране крайне мал⁶. В связи с этим представляется актуальным снижение стоимости обследований за счет дальнейшего развития практики привлечения к измерениям радона непосредственно работников или жильцов обследуемых объектов.

Авторами был намечен и частично реализован комплекс технических и организационных мероприятий, названных «системой мотивированного сбора», целями которых являются:

- развитие заинтересованности в выполнении измерений ОА радона или в участии в таких измерениях со стороны населения;
- разработка технических и программных средств, упрощающих процесс участия в обследованиях, как населения, так и сотрудников лабораторий;
- организационные меры, обеспечивающие возможность взаимодействия населения с НТЦ РХБГ, как через посредничество измерительных лабораторий, так и напрямую с помощью сайта ИАС ПИИИ.

В данной статье представлена концепция, методические и программные особенности системы мотивированного сбора информации (СМС), а также предварительная информация о проведенном тестировании системы в «натурных» условиях.

⁵ Выборочное обследование жилых зданий для оценки доз облучения населения: Методические рекомендации МР 11-2/206-09. Утверждены заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 29.08.2000 г. [Sample survey of residential buildings for assessment of the radiation doses to the population. Guidelines MR 11-2/206-09. Approved by the Deputy Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 29.08.2000. (In Russ.)].

⁶ Общее количество помещений в России, обследованных интегральным методом, не превышает даже количества помещений, обследованных в рамках поддерживаемых государством программ в ряде европейских стран, в частности, в существенно меньшей по территории и численности населения Норвегии (29 тысяч жилищ уже к 2003 г.) [6, раздел 7.1.2]

Концепция СМС

Основной отличительной чертой предложенной системы мотивированного сбора «радоновой» информации является то, что из цепочки «лаборатория – уполномоченная организация – сотрудники организации» возможно убрать посредника – уполномоченную организацию. Однако для реализации такого подхода потребовалась разработка простой (для пользователя) процедуры проведения измерений, при использовании которой, тем не менее, достигается высокая достоверность получаемых результатов. Это обеспечивается тем, что в основе предлагаемой СМС лежит процедура строгой идентификации и учета средств измерений (СИ), преимущественно пробоотборных камер (экспозиметров), передаваемых непрофессиональным участникам измерений.

Описываемая система мотивированного сбора данных использует ресурсы ИАС ПИИИ, разработанной и функционирующей во НТЦ РХБГ. ИАС ПИИИ представляет собой базу данных с результатами измерений радиационных характеристик ПИИИ, набор сетевых сервисов для обмена данными с системой, информационный сайт⁷, включающий в себя, в частности, картографическое отображение результатов измерений и набор вспомогательных сервисов и программ для автоматизации процесса измерений ОА радона трековыми детекторами.

Технические и программные средства, упрощающие процесс измерения, разрабатывались как дополнение к ИАС ПИИИ. Благодаря этому она представляет собой облачный сервис, доступный из любой точки на территории России, охваченной сетью Интернет и мобильной связью.

Сайт ИАС содержит интерактивную карту с отображаемыми на ней результатами измерений. Само по себе наличие публичной карты и возможности увидеть на ней собственные результаты измерений является одним из мотивирующих стимулов для участия в измерениях.

Перенос функций принятия решения о месте экспонирования детектора и ввода справочной информации об исследуемом объекте с сотрудника специализированной лаборатории на неспециалиста требует обеспечения его со стороны системы:

- информационной поддержкой, обеспечивающей правильный выбор места и установку детектора;
- ограниченным доступом к базе данных, позволяющим, с одной стороны, редактировать информацию об условиях экспонирования собственных детекторов, а с другой – обеспечивающим защиту от доступа к данным, введенным другими пользователями.

Для обеспечения информационной поддержки была разработана инструкция по размещению и экспонированию трековых детекторов, которая размещена на сайте ИАС ПИИИ. Также на сайте представлены справочные информационные ресурсы, касающиеся воздействия радона на человека и методов его измерений.

Для организации ограниченного доступа к базе данных используются QR-коды. Сканирование QR-кода,

расположенного на детекторе, камерой мобильного телефона загружает форму для редактирования информации о месте его расположения и условиях экспонирования. В случае наличия соответствующих разрешений со стороны владельца телефона программное обеспечение считывает координаты установки детектора с GPS-приемника телефона.

Выпуск трековых детекторов осуществляется партиями. Для каждой партии определяется чувствительность детекторов, которая определяется на основании экспериментов в радоновой камере. Детекторы размещаются внутри контейнеров-экспозиметров с нанесенными на них номерами и QR-кодами. Информация о партии детекторов и соответствии их номеров QR-кодам и номерам на корпусе экспозиметров заносится в отдельную, локальную базу данных, не связанную с общим банком результатов измерений НТЦ РХБГ. При сканировании QR-кода пользователю предоставляется доступ к редактированию информации о детекторе. Дата первого считывания QR-кода автоматически предлагается как дата начала измерения, даты последующих считываний – как дата окончания измерений. Редактирование всей ранее введенной информации возможно после любого считывания QR-кода.

Оператор в НТЦ РХБГ имеет доступ ко всем записям партии детекторов и может контролировать процесс измерений и ввода информации. По окончании измерений детекторы пересылаются в лабораторию, где происходит их вскрытие, травление и подсчет треков. Результаты измерений заносятся в базу данных, где идентифицируются с записями партии детекторов. Полученная таблица проходит верификацию – проверку адресов и их коррекцию в соответствии с классификатором КЛАДР⁸, проверку введенной справочной информации сотрудником НТЦ РХБГ на основании открытых источников данных, а затем загружается в банк результатов измерений, который отображается на сайте.

Предусматривается, что заказчик измерения в переданном ему отчетном документе сможет, помимо полученных результатов измерений, ознакомиться и с краткой информацией о радоне, а также рекомендацией о дальнейших действиях (ничего дополнительно не делать, проветривание помещений, дополнительные измерения и т.д.).

Тестирование СМС

Тестирование возможности практического использования системы лицами, не являющимися специалистами в области радиационного контроля, проводилось с участием учащихся средней школы в станице Кочубеевская (Ставропольский край).

В целом, тестирование показало работоспособность системы. Выявленные недостатки были связаны с невозможностью сканирования QR-кодов отдельными телефонами школьников. По результатам в систему были внесены изменения: увеличен размер QR-кодов и изменена их цветовая палитра, а справочная система дополнена

⁷ В настоящее время сайт находится в режиме опытной эксплуатации. После решения некоторых организационных вопросов, в том числе полного соответствия помещенной на нём информации законодательству РФ, предполагается публикация статьи о сайте с указанием его общедоступного адреса.

⁸ Рассматривается возможность перехода на Федеральную информационную адресную систему (ФИАС).

информацией о способах входа в режим редактирования без QR-кода.

Привлечение энтузиастов и заинтересованных в обследовании собственного жилища жителей не может являться самодостаточной основой выборочного обследования. Очевидно, что набор точек обследования в полученном массиве данных (наличие тех или иных типов зданий или помещений, их доля в общем количестве обследуемых объектов и др.) должен корректироваться для получения «правильной» выборки с участием специалиста. Это может быть сделано за счет дополнительных обследований, проводимых уже централизованно с участием лабораторий, специализирующихся на подобных измерениях. Разработанные технические и программные средства должны при этом упрощать процесс обследований и уменьшать вероятность ошибок при вводе и передаче информации.

Тестирование возможности использования новых наборов детекторов с QR-кодами специализированной лабораторией проводилось в лаборатории Северо-Кавказского федерального университета в г. Пятигорске. В течение весны и лета 2021 г. лабораторией были проведены измерения с новыми наборами детекторов, охватившие около 400 помещений в детских садах, школах и в жилых помещениях. Выбор мест размещения, установку и снятие детекторов производили, в основном, студенты и аспиранты университета, сотрудники лаборатории. Проблем со считыванием QR-кодов и с правильным заполнением опросных форм сотрудниками не возникло. Использование мобильного телефона, автоматически привязывающего номер детектора к координате, считываемой по GPS-приемнику в момент сканирования, позволило исключить возможные ошибки, возникающие при фиксации и передаче этой информации через бумажный носитель.

По результатам тестирования были высказаны пожелания о модернизации системы. В частности, наличие в каждом наборе детекторов карточки с дополнительным QR-кодом, сканирование которой открывало бы доступ ко всем записям набора детекторов. В этом случае оператор может быстро расположить все детекторы по помещениям здания, фиксируя по их QR-кодам только соответствие номера детектора и координаты. Затем, уже работая с конструкторской документацией здания, можно открыть при помощи дополнительной карточки весь список детекторов и дополнить его информацией о каждом помещении, используя при этом возможности быстрого копирования повторяющейся информации для соседних помещений. Реализовать такую возможность планируется в последующих выпусках комплектов детекторов.

На основе результатов тестирования дополнительно были предприняты организационные меры, обеспечивающие возможность взаимодействия заинтересованных в измерениях частных лиц с НТЦ РХБГ:

- сайт ИАС ПИИИ был дополнен модулями обратной связи для подачи заявки на участие в обследованиях;
- разработана транспортная упаковка для детекторов, исключая воздействие радона на детектор в процессе его перевозки «Почтой России» или другими транспортными организациями;
- предусмотрено наличие резерва готовых к измерениям детекторов в НТЦ РХБГ.

Заключение

Доступ в обследуемые помещения невозможен без согласия или привлечения к измерениям собственников или уполномоченных ими лиц. Создание мотивирующих стимулов, поиск заинтересованных лиц и их привлечение к измерениям является неотъемлемой частью процесса обследований населенных пунктов. Реализованная на сайте система информационной поддержки и использование технологий мобильной связи призваны привлечь дополнительных участников измерений и расширить круг доступных для обследований объектов.

Трековый метод измерений ОА радона предполагает наличие разделенных в пространстве и времени нескольких участников измерительного процесса – сотрудников лаборатории, выпускающей детектор, сотрудников, осуществляющих его установку и экспонирование, и непосредственно измерительной лаборатории, осуществляющей подсчет треков и расчет ОА. Применение облачных технологий позволяет оптимизировать обмен информацией между участниками, а использование QR-кодов на детекторах – исключить ошибки, связанные с идентификацией детектора и его координатной привязкой к месту обследования.

Реализованный на сайте ИАС ПИИИ публичный доступ к результатам обследований с отображением информации на карте способствует популяризации измерений радона и является одним из мотивирующих стимулов для участия в исследованиях.

Для последующего формирования соответствующих структуре общества выборок данных, их статистического анализа и выполнения дозиметрических оценок необходима фиксация справочной информации об измерении. Примененные в системе программные модули автоматизируют процесс ввода этой информации.

Организация СМС на основе других типов детекторов, например, угольно-адсорбционных пробоотборников, которые должны быть доставлены в лабораторию для измерения в течение суток после окончания экспонирования, представляется реальным в масштабе страны только для населенных пунктов, из которых возможна оперативная доставка детекторов в лабораторию, подключенную к СМС.

Дальнейшее развитие системы должно происходить по пути децентрализации процесса сбора и обработки экспонированных детекторов, развития на базе лабораторий ФМБА измерительных центров и пунктов сбора детекторов, а также создания заинтересованности лабораторий в использовании инструментов системы при проведении собственных работ и обследований.

С социальной точки зрения, СМС обеспечивает оказание экономически доступной для большинства граждан услуги по определению уровня облучения радоном в воздухе помещений принадлежащих им зданий и помещений. При этом в перспективе достигается значительная экономия бюджетных ассигнований, требуемых для создания карты потенциальной радоноопасности территории страны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФМБА России в рамках реализации ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года», а также при

финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90291.

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, описанную в этой статье.

Авторы благодарны администрациям ФМБА России, РУДН и а СКФУ за поддержку на всех стадиях выполнения данной работы. Авторы признательны Андрею Анатольевичу Цапалову за весьма полезное сотрудничество на стадии разработки концептуальных подходов к СМС.

Литература

1. 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.
2. Радиологическая защита от облучения радоном. 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.
3. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press, 2009. 110 p.
4. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2015. 90 p.
5. Маренный А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом // АНРИ. 2012. № 4 (71). С. 13–20.
6. Киселев С.М., Жуковский М.В., Стамат И.П., Ярмошенко И.В. Радон: От фундаментальных исследований к практике регулирования. М.: Изд-во «ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 2016. 432 с.
7. Маренный А.М., Киселёв С.М., Семёнов С.Ю. О проблеме обеспечения защиты населения России от природных источников ионизирующего излучения. Часть 2. Развитие подходов и практические мероприятия // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 4. С. 527–539.
8. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.

Поступила: 09.11.2021 г.

Маренный Альберт Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России. Адрес для переписки: 123182, Москва, ул. Щукинская, д. 40; E-mail: amarennyu@yandex.ru ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6142-0234>

Антропов Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Карл Лидия Эдуардовна – научный сотрудник лаборатории природных источников ионизирующих излучений Научно-технического центра радиационно-химической безопасности и гигиены Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Щитов Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства Пятигорского института (филиала) Северо-Кавказского федерального университета, Пятигорск, Россия

Сидякин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительства Пятигорского института (филиала) Северо-Кавказского федерального университета, Пятигорск, Россия

Мурзабеков Мурат Ануарович – старший преподаватель кафедры строительства Пятигорского института (филиала) Северо-Кавказского федерального университета, Пятигорск, Россия

Для цитирования: Маренный А.М., Антропов С.Ю., Карл Л.Э., Щитов Д.В., Сидякин П.А., Мурзабеков М.А. Система мотивированного сбора информации о содержании радона в помещениях с участием населения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 96–103. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-96-103

The system of acquisition of information on indoor radon concentration with the motivated participation of the population

Albert M. Marennyy¹, Sergey Yu. Antropov¹, Lidiya E. Karl^{1,2}, Dmitry V. Shchitov³, Pavel A. Sidyakin³,
Murat A. Murzabekov³

¹ Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

² People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

³ North Caucasus Federal University, Pyatigorsk, Russia

A system of acquisition of information on indoor radon concentration was developed. The system is based on the transfer of devices for integral and/or quasi-integral measurements of radon concentration to the owner of the premises and the exchange of necessary information about the conditions and measurement results between the owner and the measuring laboratory using modern online technology. The information support system implemented on the website and the use of mobile communication technologies are designed to attract additional measurement participants and expand the range of objects available for surveys. At the same time, intermediaries between the measuring laboratory and the owner of the premises are excluded. The use of cloud technologies makes it possible to optimize the exchange of information between participants, and the use of QR codes on detectors eliminates errors associated with the identification of the detector and its coordinate reference to the measurement point. The software modules used in the system automate the process of entering this information. It is assumed that devices with a track detector will be used as the main ones. It is also possible to use carbon-adsorption samplers, but only for measurements in settlements, from which delivery to the processing laboratory is possible within no more than one day. Testing of the possibility of practical use of the system by persons who are not specialists in the field of radiation control was carried out on examples of a small and large settlement (the village of Kochubeyevskaya and the city of Pyatigorsk, Stavropol Krai). In general, the testing showed the operability of the system. As a result, changes were made to the system: the size of QR codes was increased and their color palette was changed, and the supporting system was supplemented with information on entering the editing mode without a QR code. From a social point of view, the system provides economically affordable services for most citizens to determine the level of radon exposure in the air of residential, public and other buildings. At the same time, in the future, significant savings are achieved in budget allocations required to create a potential radon risk map of the country.

Key words: radon, survey, radon concentration, radon equilibrium equivalent concentration, dose, premises, residential and public buildings, motivational collection system.

References

1. 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.
2. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. Ann. ICRP. 2014;43(3): 73. (In Russian).
3. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press; 2009. 110 p.
4. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Safety Standards Series No. SSG-32. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2015. 90 p.
5. Marennyy AM. Methodical aspects of measurements average indoor radon volume activity using the integral track method. ANRI=ANRI. 2012;4(71): 13–20. (In Russian).
6. Kiselev SM, Zhukovsky MV, Stamat IP, Yarmoshenko IV. Radon: From fundamental research to regulatory practice. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical-Biological Agency; 2016. 432 p. (In Russian).
7. Marennyy AM, Kiselev SM, Semenov SYu. On the problem of protection of the Russian population from natural sources of ionizing radiation. Part 2. The development of approaches and practical activities. Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Extreme Medicine. 2019;21(4): 527–539. (In Russian).
8. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2018. 432 p. (In Russian).

Received: November 09, 2021

Albert M. Marennyy

Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene

Address for correspondence: Shchukinskaya Str., 40, Moscow, 123182, Russia; E-mail: amarennyy@yandex.ru

For correspondence: Albert M. Marennyy – PhD, Head of Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical and Hygiene of the Federal Medical-Biological Agency of Russia (Shchukinskaya Str., 40, Moscow, 123182, Russia; E-mail: amarennyy@yandex.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6142-0234>

Sergey Yu. Antropov – PhD, Senior researcher of Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical and Hygiene of the Federal Medical-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Lidiya E. Karl – The researcher of Laboratory of Natural Sources of Ionizing Radiation, Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical and Hygiene of the Federal Medical-Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

Dmitry V. Shchitov – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Construction of Pyatigorsk Institute (branch) of North Caucasian Federal University, Pyatigorsk, Russia

Pavel A. Sidyakin – PhD, Associate Professor, Professor of the Department of Construction of Pyatigorsk Institute (branch) of North Caucasian Federal University, Pyatigorsk, Russia

Murat A. Murzabekov – Senior Lecturer of the Construction Department of Pyatigorsk Institute (branch) of North Caucasian Federal University, Pyatigorsk, Russia

For citation: Marennyy A.M., Antropov S.Yu., Karl L.E., Shchitov D.V., Sidyakin P.A., Murzabekov M.A. The system of acquisition of information on indoor radon concentration with the motivated participation of the population. *Radiatsionnaya Gygiena* = *Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 96-103. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-96-103

Опыт использования систем радиационного контроля в России во время проведения Чемпионата мира по футболу 2018

К.А. Сапрыкин

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

На прошедшем в России Чемпионате мира по футболу ФИФА 2018 было уделено большое внимание обеспечению радиационной безопасности. При проведении массовых мероприятий существуют риски террористических атак, которые необходимо учитывать. Поэтому использование систем радиационного контроля в этот период направлено, в первую очередь, на противодействие радиационному терроризму. В данной статье рассмотрены оснащённость и кадровый состав лабораторий радиационного контроля Роспотребнадзора в субъектах Российской Федерации, участвовавших в проведении Чемпионата мира по футболу 2018, на предмет готовности к выполнению задачи по реагированию на случаи срабатывания систем радиационного контроля. Помимо этого, дана сравнительная характеристика использовавшихся во время проведения Чемпионата мира по футболу ФИФА 2018 систем радиационного контроля и опыт их эксплуатации на пешеходных пунктах досмотра, расположенных на границе периметра безопасности стадионов.

Ключевые слова: радиационная безопасность, радиационный контроль, радиационный терроризм, массовое мероприятие, ядерный и радиоактивный материал, реагирование.

Введение

В настоящее время при организации безопасности массовых мероприятий, помимо обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, необходимо учитывать и меры противодействия возможности использования в террористических целях источников ионизирующего излучения – ядерных и радиоактивных материалов. В связи с принятием Поправки (вступила в силу для Российской Федерации 08.05.2016 г.) к Конвенции о физической защите ядерного материала от 26.10.1979 г.¹, ранее действовавшей только в отношении ядерного материала и только в процессе международной транспортировки, теперь режим физической защиты распространяется на ядерный материал и ядерные установки внутри государства. Принятая Поправка существенно усиливает режим ядерной безопасности, но сама по себе, конечно, не исключает возможность использования ядерных и радиоактивных материалов в террористических целях. Таким образом, противодействие радиационному терроризму в рамках компетенции Роспотребнадзора является очень важным направлени-

ем в обеспечении безопасности во время организации массовых мероприятий.

В период проведения Чемпионата мира по футболу ФИФА 2018 (ЧМ по футболу 2018) главными средствами контроля текущей радиационной обстановки являлись стационарные системы радиационного контроля (СРК), размещённые на объектах проведения футбольного первенства – пешеходных контрольно-пропускных пунктах (КПП), а также на удалённых пунктах досмотра грузов (в основном, питьевая вода и продукты питания) транспортных КПП [5–8]. Помимо этого, непрерывный радиационный контроль с помощью СРК на постоянной основе проводился в аэропортах, таможенных пунктах, через которые проходило большое количество людей (гости, участники), прибывших (в том числе из-за рубежа) на матчи чемпионата [1].

Критерием к срабатыванию СРК являлось превышение скорости счета импульсов над установленным порогом за вычетом фонового значения, что указывало на наличие радионуклидного гамма-излучающего источника ионизирующего излучения (ИИИ) и выражалось в световой и звуковой сигнализации СРК.

¹ Конвенция о физической защите ядерного материала и ядерных установок (принята 8 июля 2005 г., вступила в силу для Российской Федерации 8 мая 2016 г., на основании Федерального закона от 22.07.2008 г. № 130-ФЗ). [Convention on the Physical Protection of Nuclear Material (CPPNM) and its Amendment (adopted 28.07.2005, entered into force for the Russian Federation 08.05.2016, on the basis of Federal Law 22.07.2008 № 130-FZ) (In Russ.)]

Сапрыкин Кирилл Александрович

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

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

Срабатывание СРК во время процедуры контроля указывало на потенциальную угрозу радиационной безопасности, требующую соответствующего реагирования. Каждый факт срабатывания СРК был расследован с целью правильной оценки радиационной обстановки и последующего принятия управленческого решения о необходимых действиях [6–8]. Таким образом, одним из направлений деятельности Роспотребнадзора в обеспечении радиационной безопасности ЧМ по футболу 2018 являлось реагирование на срабатывание СРК, а именно идентификация радионуклидного гамма-излучающего ИИИ и разработка для персонала КПП рекомендаций по дальнейшим действиям.

Период подготовки к ЧМ по футболу 2018

При разработке стратегии обеспечения радиационной безопасности, в том числе для реализации указанного выше направления деятельности, была проведена оценка кадрового потенциала на наличие специалистов по радиационной гигиене и оценка материально-технического потенциала лабораторий радиационного контроля (далее – ЛРК) Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора в тех субъектах РФ, где должны были проводиться матчи футбольного первенства [5, 6, 7, 8].

В 2017 г. и повторно в 2018 г. ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в соответствии с приказами Роспотребнадзора №109 от 02.03.2017 г. и № 23 от 24.01.2018 г., провёл проверки ЛРК Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора в городах, принимающих матчи ЧМ по футболу 2018. По итогам проверок было установлено, что из 11 ЛРК Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора 7 располагают соответствующими специалистами и средствами для обнаружения и идентификации радионуклидных гамма-излучающих ИИИ (Москва, Санкт-Петербург, Нижегородская область, Республика Татарстан, Ростовская область, Самарская область, Сочинский филиал Краснодарского края), в том числе и на колесной базе в виде передвижных радиологических лабораторий (Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород и Ростов-на-Дону). В ЛРК Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора 4 субъектов (Волгоградская область, Калининградская область, Республика Мордовия, Свердловская область) портативные спектрометры для идентификации радионуклидных гамма-излучающих ИИИ отсутствовали. Поэтому руководителям Центров гигиены и эпидемиологии в соответствующих субъектах было рекомендовано дооснастить ЛРК аппаратурой для проведения идентификации радионуклидных гамма-излучающих ИИИ [5–7].

Согласно опубликованным данным [6, 7], повышение уровня компетентности сотрудников Управлений Роспотребнадзора и Центров гигиены и эпидемиологии, курирующих вопросы обеспечения радиационной безопасности, обеспечивалось путём организации Центральным аппаратом Роспотребнадзора учебных се-

минаров по вопросам обеспечения радиационной безопасности в период проведения ЧМ по футболу 2018. С марта по май 2018 г., в соответствии с указанными выше приказами Роспотребнадзора, было проведено 5 семинаров и 1 вебинар.

Выполнение мероприятий, связанных с дооснащением ЛРК Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора спектрометрами-идентификаторами, связано с необходимостью реагирования в случае срабатывания СРК, размещённых в целях противодействия радиационному терроризму на объектах проведения ЧМ по футболу 2018.

В настоящее время в период подготовки и проведения любого массового мероприятия используются СРК. На таможенных пунктах и пунктах перехода государственной границы РФ и в аэропортах СРК размещены на постоянной основе с целью предотвращения незаконного оборота ядерных и радиоактивных материалов [1, 2]. СРК в зависимости от модели оборудованы одним или несколькими детекторами гамма-излучения, в некоторых исполнениях совместно с одним или несколькими нейтронными детекторами.

Использование сцинтилляционных детекторов немедленного действия в составе СРК имеет большое значение для оперативного получения первичной информации о радиационной обстановке. Сцинтилляционный метод регистрации заряженных частиц имеет ряд достоинств в сравнении с другими методами:

- высокая эффективность регистрации гамма-излучения (в сравнении с ионизационными камерами и газонаполненными счетчиками);
- высокое временное разрешение (малое мертвое время).

Рассматривая сценарии использования радионуклидных гамма-излучающих ИИИ в террористических целях, наиболее вероятным является применение тех радиоактивных материалов, которые используются в промышленности, науке, медицине. Это связано с тем, что степень физической защиты и контроль за обращением радиоактивных материалов несопоставимо ниже, в сравнении с ядерными материалами, хищение и использование которых является самым маловероятным вариантом [2, 3].

Радионуклидные источники ИИИ, используемые в медицине, науке и промышленности (^{99}Mo , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{137}Cs и др.), имеют более жесткое гамма-излучение в сравнении с ядерными материалами (уран-плутоний), поэтому для их детектирования наибольшее значение имеет объём детектора, в то время как для ядерных материалов целесообразнее использовать плоские детекторы [4]. Сравнение технических характеристик СРК (табл. 1), использовавшихся на ЧМ по футболу 2018, показало, что эффективность регистрации гамма-излучающих радионуклидов детектором объёмом 4,6 л (АО НПЦ Аспект)² в 3 раза выше, чем таковая у детектора объёмом 0,8 л (ФГУП ВНИИА)³. Если СРК оборудована двумя детекто-

² Научно-производственный центр Аспект. Монитор радиационный ядерных и радиоактивных материалов «РМ-1С». Паспорт ДЦКИ.412159.018-07ПС. [Aspect Research and Production Center. Radiation monitor of nuclear and radioactive materials «RM-1C». Passport DCKI.412159.018-07PS (In Russ.)]

³ Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова. Аппаратура обнаружения ядерных материалов и радиоактивных веществ. [N.L. Dukhov All-Russian Research Institute of Automation. Equipment for detecting nuclear materials and radioactive substances (In Russ.)]

Таблица 1

Сравнительная характеристика систем радиационного контроля

[Table 1]

Comparative characteristics of radiation monitoring systems]

Радиационный монитор ЯНТАРЬ-2ПЗ ⁴ [Radiation monitor YANTAR-2P3]	Монитор радиационный ядерных и радиоактивных материалов РМ-1С ² [Radiation monitor of nuclear and radioactive materials RM-1C]	Система радиационного мониторинга ТСПМ82М ³ [Radiation monitoring system TCRM82M]
Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения (кэВ): [The range of recorded gamma radiation energies (keV):] 50 – 3000;	Диапазон регистрируемых энергий гамма- излучения (кэВ): [The range of recorded gamma radiation ener- gies (keV):] 50 – 3000;	Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения (кэВ): [The range of recorded gamma radiation energies (keV):] 40 – 3000;
Объём гамма-детектора: 4,6 л. [Gamma detector volume: 4.6 l.] Количество гамма-детекторов: 2 [Number of gamma detectors: 2]	Объём гамма-детектора: 4,6 л. [Gamma detector volume: 4.6 l.] Количество гамма-детекторов: 1 [Number of gamma detectors: 1]	Объём гамма-детектора: 0,8 л. [Gamma detector volume: 0.8 l.] Количество гамма-детекторов: 1 [Number of gamma detectors: 1]
Порог обнаружения ядерных и радиоактивных материалов при ширине зоны контроля 0,7 м: [Threshold for detection of nuclear and radioactive materials with a control zone width of 0.7 m:] ¹³⁷ Cs – 11 кБк / [kBq] ⁶⁰ Co – 7 кБк / [kBq] ¹³³ Ba – 11 кБк / [kBq] при ширине зоны контроля 1,5 м: [with a control zone width of 1.5 m:] Pu – 0,3 г / [g]	Порог обнаружения ядерных и радиоактивных материалов при ширине зоны контроля 0,8 м: [Threshold for detection of nuclear and radioac- tive materials with a control zone width of 0.8 m:] ¹³⁷ Cs – 54 кБк / [kBq] ⁶⁰ Co – 27 кБк / [kBq] ¹³³ Ba – 45 кБк / [kBq] Pu – 0,3 г / [g]	Порог обнаружения ядерных и радиоактивных материалов при ширине зоны контроля 0,8 м: [Threshold for detection of nuclear and radioactive materials with a control zone width of 0.8 m:] ¹³⁷ Cs – 170 кБк / [kBq] ⁶⁰ Co – 85 кБк / [kBq] ¹³³ Ba – 140 кБк / [kBq] Pu – 1 г / [g]
Частота ложных срабатываний: [False trip rate:] не более 1/1000 [no more than 1/1000] Интенсивность фона: [Background intensity:] не более 20 мкР/ч [no more than 20 µR/h]	Частота ложных срабатываний: [False trip rate:] не более 1/1000 [no more than 1/1000] Интенсивность фона: [Background intensity:] не более 25 мкР/ч [no more than 25 µR/h]	Частота ложных срабатываний: [False trip rate:] не более 1/1000 [no more than 1/1000] Интенсивность фона: [Background intensity:] не более 25 мкР/ч [no more than 25 µR/h]

рами (из одного материала) (ЯНТАРЬ-2ПЗ)⁴, то возможности регистрации гамма-излучающих радиоактивных материалов в сравнении с СРК, оборудованной одним детектором объемом 0,8 л (ТСПМ82М), возрастают в 12–15 раз. Следовательно, объём детектора как одна из составляющих эффективности регистрации СРК имеет очень большое значение [4].

Период проведения ЧМ по футболу 2018

На время проведения ЧМ по футболу 2018, в соответствии с приказом Роспотребнадзора № 411 от 01.06.2018 г., с целью оказания практической и методической помощи, а также для участия в проведении санитарно-противоэпидемических мероприятий при выявлении ИИИ, предметов и лиц с повышенным радиационным фоном, регистрации очагов радиоактивного загрязне-

ния, в Управления Роспотребнадзора городов Самары, Волгограда, Калининграда и Саранска были направлены специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Согласно полученным данным из Центров гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора субъектов, принимавших футбольное первенство (письмо-запрос ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева № 540 от 17.07.2018 г.), всего за время проведения ЧМ по футболу 2018 с 14.06. по 15.07.2018 г. было зафиксировано 17 срабатываний СРК, в том числе за время нахождения специалистов ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в указанных выше городах, в период с 14.06. по 07.07.2018 г. было зафиксировано 5 срабатываний СРК (табл. 2). В 4 случаях объектом контроля были люди и в 1 случае – ручная кладь с находящимся в ней авиационным прибором с нанесённым на циферблат радиевым светосоставом [6–8].

⁴ Описание типа средств измерений. Приложение к свидетельству № 41377 об утверждении типа средств измерений. Системы обнаружения делящихся и радиоактивных материалов стационарные таможенные «Янтарь». [Description of the type of measuring instruments. Attachment to certificate No. 41377 on type approval of measuring instruments. Systems for detecting fissile and radioactive materials stationary customs «Yantar» (In Russ.)]

Таблица 2

Реагирования на срабатывание СРК во время проведения Чемпионата мира по футболу 2018 в период с 14.06.2018 по 07.07.2018 г.

[Table 2]

Response to the triggering of radiation monitoring systems (RMS) during the 2018 FIFA World Cup in the period from 14.06.2018 to 07.07.2018]

№	Дата реагирования [Response date]	Место размещения СРК [Location of the RMS*]	Объект срабатывания [Trigger object]	Спектрометр [Spectrometer]	Результат [Result]
1	14.06.18	Аэропорт, г. Самара [Airport, Samara]	Человек [Human]	МКГ-АТ1321 [MKG-AT1321]	¹³¹ I в организме человека [¹³¹ I in the human body]
2	18.06.18	Аэропорт, г. Самара [Airport, Samara]	Ручная кладь [Hand luggage]	МКГ-АТ1321 [MKG-AT1321]	²²⁶ Ra в авиационном приборе [²²⁶ Ra in an aviation device]
3	25.06.18	Аэропорт, г. Самара [Airport, Samara]	Человек [Human]	МКГ-АТ1321 [MKG-AT1321]	¹³¹ I в организме человека [¹³¹ I in the human body]
4	28.06.18	Стадион Самара-Арена [Samara-Arena Stadium]	Человек [Human]	МКГ-АТ1321 [MKG-AT1321]	¹³¹ I в организме человека [¹³¹ I in the human body]
5	16.06.18	Госграница, таможенный переход в Калининградской области [State border, customs crossing in the Kaliningrad region]	Человек [Human]	—	¹³¹ I в организме человека (согласно медицинской справке из лечебного учреждения) [¹³¹ I in the human body (according to a medical certificate from a medical institution)]

* RMS – radiation monitoring system

По результатам реагирования было установлено, что объектом срабатывания в большинстве случаев (10) являются люди, в 5 случаях объектом срабатывания являлась продукция. Еще 2 срабатывания были ложными (без объекта контроля). Во всех тех случаях срабатывания СРК, когда объектом контроля был человек, использованные для идентификации спектрометры уверенно определяли медицинские радионуклиды, введенные с лечебной (¹³¹I – у 9 человек) или с диагностической (⁹⁹Tc – у 1 человека) целями. Продукция, на которую приходилось 5 срабатываний, представляла собой керамическую плитку (1 срабатывание), авиационный прибор (1 срабатывание), керамическую посуду (2 срабатывания) и почтовое отправление в логистическом почтовом центре (1 срабатывание). Во всех случаях в указанной продукции были уверенно идентифицированы природные радионуклиды ⁴⁰K, ²²⁶Ra и ²³²Th. В 2 случаях произошли ложные срабатывания СРК без объекта контроля (на КПП периметра безопасности стадионов в Волгограде и Казани) [6–8].

Учитывая масштаб турнира (согласно годовому отчету ФИФА матчи футбольного первенства посетило свыше 3 млн чел.), количество срабатываний СРК было совсем невелико. 16.06.2018 г. при переходе иностранным гражданином государственной границы РФ на таможенном переходе в Калининградской области произошло срабатывание СРК. При этом измеренная представителями таможенной службы РФ мощность дозы гамма-излучения на расстоянии 1,0 м от гражданина составила 10,22 мкЗв/ч (согласно табл. 5.1. НРБ-99/2009, разрешается вы-

пуска пациентов с мощностью дозы гамма-излучения 20 мкЗв/ч). Гражданин представил справку о том, что в его организм был введен ¹³¹I с лечебной целью, после чего он получил допуск на территорию РФ. Однако во время прохождения зоны досмотра на пешеходном пункте пропуска «Стадион Калининград» СРК (модели ТСПМ82М, производства ВНИИА, которыми были оснащены все пешеходные пункты пропуска на стадион) не сработал. Это было достоверно установлено службой безопасности стадиона, которая была проинформирована о данном гражданине. В этой связи 19.06.2018 г. Региональным операционным центром было инициировано проведение на пунктах пропуска «Стадион Калининград» мероприятия по контролю за функционированием СРК на пешеходных пунктах пропуска стадиона с привлечением специалистов службы безопасности, Управления Роспотребнадзора и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Калининградской области, Калининградской областной таможни и представителя ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. В ходе проверки установлено, что СРК (ТСПМ82М), размещенные на пешеходных пунктах пропуска стадиона, находятся в рабочем состоянии. Однако выяснилось, что порог срабатывания СРК существенно завышен: при попытке пронести радионуклидный ИИИ, мощность дозы гамма-излучения от которого на расстоянии 10 см составляла 2 мкЗв/ч, через СРК они не срабатывали. Срабатывание происходило только при поднесении радионуклидного ИИИ вплотную к поверхности СРК. Таким образом, можно предположить, что возникновение данной ситуации связано со спец-

ификой расположения детекторов СРК в зоне контроля пешеходных пунктов досмотра. Радиационные мониторы ТСРМ82М на указанных пунктах пропуска были расположены над входом, что существенно отдаляло их детекторы от объекта контроля, тем самым снижая геометрическую эффективность. Это, в свою очередь, сводило к минимуму эффективность регистрации.

Заключение

К настоящему времени в России уже накоплен достаточно большой опыт в проведении различных массовых мероприятий с международным участием, к которым можно отнести летние Олимпийские игры в Москве в 1980 г., чемпионаты мира и Европы, кубки мира по отдельным видам спорта, общественно-политические форумы и пр. Безопасность этих мероприятий была организована на высоком уровне, а специалисты различных служб и ведомств, участвовавшие в этом, приобрели определенный опыт [1].

Вопрос обеспечения радиационной безопасности при проведении массовых мероприятий в РФ стал наиболее актуальным в последнее десятилетие. Это связано как с широким внедрением ИИИ во многих областях хозяйственной деятельности человека, что требует соблюдения соответствующих норм и правил при обращении с ними, так и с активным участием нашей страны на международной арене как организатора массовых мероприятий. С другой стороны, возросшая доступность ИИИ может стать причиной для их противоправного использования, что, в свою очередь, требует разработки и применения комплекса мер, направленных на противодействие подобным сценариям [1–3].

СРК являются не только средством контроля текущей радиационной обстановки, но и сигнальной системой в случае возникновения угрозы для неё. Поэтому при размещении СРК необходимо учитывать такие компоненты эффективности регистрации, как геометрическая эффективность детекторов (расстояние до ИИИ) и объём детекторов, исходя из возможных сценариев угрозы радиационной обстановки.

При размещении СРК также необходимо учитывать недопущение детектирования рассеянного излучения от работающих лучевых досмотровых установок, которыми также оснащены пункты пропуска, во избежание ложных срабатываний. Размещение СРК над дверным проёмом решает эту проблему, однако значительно отдаляет детектор от объекта контроля, что в сочетании с небольшим объёмом самого детектора не позволяет эффективно реагировать на изменение радиационной обстановки, что и было установлено в г. Калининграде. Поскольку пешеходные КПП периметра безопасности стадионов были спроектированы однотипно для всех вновь строящихся и реконструируемых стадионов, то не исключено, что и в остальных субъектах была похожая ситуация.

Благодарности

Автор выражает благодарность:

- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в городе Москве» А.И. Румянцевой;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в городе Санкт-Петербурге» А.В. Ерёмину;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Волгоградской области» И.В. Камышниковой;

- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Свердловской области» О.С. Филипповой;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Республике Татарстан» А.Л. Шарифудиновой;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Калининградской области» А.С. Девятайкину;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Нижегородской области» Г.А. Чеховой;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Ростовской области» В.А. Поливенко;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Самарской области» О.П. Матвеевой;
- заведующему отделением ФБУЗ «ЦГиЭ в Республике Мордовия» М.Ф. Мартыновой;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Краснодарском крае» А.О. Вечернему;
- заведующему отделением РГ Сочинского филиала ФБУЗ «ЦГиЭ» А.Ю. Грибанову и химику-эксперту Т.В. Бузмаковой;
- заведующему отделением РГ ФБУЗ «ЦГиЭ в Московской области» Е.Г. Аветисовой;
- заведующему санитарно-гигиенической лабораторией ФБУЗ «ЦГиЭ в Ленинградской области» М.Г. Яманкиной и врачу по общей гигиене Е.А. Пономаренко,
- за представленные данные по кадровому составу и оснащённости средствами измерений ЛРК, использованные при написании данной статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

Литература

1. Романович И.К., Барковский А.Н., Титов Н.В., Шевченко Г.Т. Обеспечение радиационной безопасности и противодействие радиационному терроризму при проведении массовых спортивных мероприятий / Под ред. Г.Г. Онищенко, А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2016. 364 с.
2. Системы и меры физической ядерной безопасности при проведении крупных общественных мероприятий. Практическое руководство // Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности № 18. Вена: МАГАТЭ, 2014. 83 с.
3. Грачев М.И., Ильин Л.А., Квачева Ю.Е., и др. Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму / Под общ. ред. Л.А. Ильина. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2018. 392 с.
4. Бойко В.И., Жерин И.И., Каратаев В.Д., и др. Методы и приборы для измерения ядерных и других радиоактивных материалов. Под общей редакцией В.И. Бойко, М.Е. Силаева. Томск: ТПУ, 2011. 355 с.
5. Сапрыкин К.А. О ходе подготовки учреждений Роспотребнадзора к обеспечению радиационной безопасности при проведении Чемпионата мира по футболу 2018 // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 98–104.
6. Сапрыкин К.А., Громов А.В., Иванов С.А. Обеспечение радиационной безопасности при проведении Чемпионата мира по футболу 2018 // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 106–112.

7. Попова А.Ю., Смоленский В.Ю., Брагина И.В., и др. Чемпионат мира по футболу 2018 года в России: обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия / Под ред. д.м.н., проф. А.Ю. Поповой, акад. РАН, д.м.н., проф. В.В. Кутырева. Саратов: ФКУЗ «Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб» Роспотребнадзора, 2019. 536 с.
8. Сапрыкин К.А., Барковский А.Н., Романович И.К. Опыт использования систем радиационного контроля для

обеспечения радиационной безопасности при проведении чемпионата мира по футболу 2018 // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы международной научно-практической конференции. СПб, 2018. С. 243-245.

Поступила: 03.09.2021 г.

Сапрыкин Кирилл Александрович – заведующий лабораторией дозиметрии природных источников, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: k.saprykin@niirg.ru

Для цитирования: Сапрыкин К.А. Опыт использования систем радиационного контроля в России во время проведения Чемпионата мира по футболу 2018 // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 104-110. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-104-110

Experience of using radiation monitoring systems in Russia during the 2018 FIFA World Cup

Kirill A. Saprykin

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

At the 2018 FIFA World Cup held in our country, great attention was paid to ensuring radiation safety. When holding mass events, there are risks of terrorist attacks that need to be taken into account. Therefore, the use of radiation monitoring systems during this period is primarily aimed at countering radiation terrorism. This article reviews the equipment and personnel of the Rospotrebnadzor radiation control laboratories in the regions of the Russian Federation that participated in the 2018 FIFA World Cup for readiness to perform the task of responding to cases of activation of radiation control systems. In addition, a comparative description of the radiation monitoring systems used during the 2018 FIFA World Cup and the experience of their operation at pedestrian inspection points located on the border of the security perimeter of stadiums are provided.

Key words: radiation safety, radiation control, radiation control systems, countering radiation terrorism, mass event, nuclear and radioactive material, responding to a threat to radiation safety.

References

1. Romanovich IK, Barkovsky AN, Titov NV, Shevchenko GT. Ensuring radiation safety and countering radiation terrorism during mass sports events. Ed. G.G. Onischenko, A.Yu. Popova. St-Petersburg: NIIRG after Professor P.V. Ramzaev; 2016. 364 p. (In Russian).
2. Nuclear security systems and measures for major public events: implementing guide. IAEA nuclear security series, no. 18. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2012. 56 p.
3. Grachev MI, Ilyin LA, Kvacheva YuE, et al. Medical aspects of countering radiological and nuclear terrorism. Moscow: Russian State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical-Biological Agency; 2018. 392 p. (In Russian).
4. Boyko VI, Zherin II, Karataev VD, Nedbaylo YuV, Silaev ME. Methods and devices for measuring nuclear and other radioactive materials. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2011. 355 p. (In Russian).
5. Saprykin KA. The current state of preparedness of the Rospotrebnadzor institutions for provision of the radiation safety for the 2018 World Football Championship. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2):98-104. (In Russian).
6. Saprykin KA, Gromov AV, Ivanov SA. Ensuring radiation safety at the FIFA World Cup 2018. *Radiatsionnaya*

Kirill A. Saprykin

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

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

- Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3):106-113. (In Russian).
7. Popova AYu, Smolensky VYu, Bragina IV, Kuzkin BP, Ezhlova EB, Demina YuV, et al. 2018 FIFA World Cup in Russia: ensuring sanitary and epidemiological well-being. Ed. A.Yu. Popova, V.V. Kutyrev. Saratov: Russian Research Anti-Plague Institute Microbe; 2019. 536 p. (In Russian).
8. Saprykin KA, Barkovsky AN, Romanovich IK. Experience in using radiation monitoring systems to ensure radiation safety during the 2018 FIFA World Cup. In: Proceedings of the international scientific and practical conference "Pressing issues of radiation hygiene". St-Petersburg; 2018. P. 243–245. (In Russian).

Received: September 03, 2021

For correspondence: Kirill A. Saprykin – Senior researcher, Head of the Laboratory for dosimetry of natural sources of radiation, 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 k.saprykin@niirg.ru)

For citation: Saprykin K.A. Experience of using radiation monitoring systems in Russia during the 2018 FIFA World Cup. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 104-110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-104-110

Актуальные проблемы обеспечения радиационной безопасности при проведении рентгеностоматологических исследований

Т.Б. Балтрукова¹, С.В. Воронкова², А.В. Водоватов^{3,4}

¹ Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

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

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

В рамках мероприятий административной реформы в России и применения механизма «регуляторной гильотины» в 2020–2021 гг. произошло изменение государственного регулирования нескольких направлений, связанных с оказанием стоматологической помощи: введена новая редакция Порядка оказания стоматологической помощи и оснащения государственных стоматологических организаций, с целью повышения качества оказания медицинских услуг, утверждены Правила проведения рентгенологических исследований, существенно изменились санитарно-эпидемиологические требования к медицинским организациям. Тем временем требования к обеспечению радиационной безопасности в рентгеновских стоматологических кабинетах сохранились в неизменном виде. Отсутствие согласования новых документов Минздрава с Роспотребнадзором привело к тому, что при сохранении всего комплекса существующих проблем с использованием рентгеновской техники в стоматологии (например, с размещением рентгеностоматологических аппаратов в жилых и общественных зданиях) появился целый ряд новых (например, отсутствие требований к наличию лицензии на выполнение работ (услуг) по рентгенологии у стоматологов). В статье представлен анализ вопросов нормативно-правового регулирования обеспечения радиационной безопасности при оказании стоматологической помощи населению Российской Федерации. Выполнен обзор действующих нормативно-методических документов Минздрава и Роспотребнадзора, регулирующих размещение рентгеностоматологических аппаратов и проведение рентгеностоматологических исследований. Выделены основные проблемы обеспечения радиационной безопасности при проведении рентгеностоматологических исследований. Результаты анализа показывают, что введенные в 2020–2021 гг. изменения в нормативно-методические документы Минздрава противоречат действующим требованиям по обеспечению радиационной безопасности. Необходимо дальнейшее совершенствование правовой базы организации работы стоматологических клиник и рентгеностоматологической службы, в частности, гармонизация действующих требований к оснащению стоматологических кабинетов, порядкам и стандартам стоматологической помощи, квалификации персонала, обеспечивающие оказание качественной стоматологической помощи и обеспечение радиационной безопасности.

Ключевые слова: радиационная безопасность, «регуляторная гильотина», стоматологическая помощь, рентгеностоматологические исследования.

В настоящее время в медицине, в том числе в стоматологической практике, широко распространено использование рентгеновских методов лучевой диагностики [1, 2]. Наиболее часто применяются панорамная и прицельная рентгенографии, ортопантомография; в течение последнего десятилетия активно внедряется в практику конусно-лучевая компьютерная томография

(КЛКТ). Данный метод получил широкое распространение в стоматологии, челюстно-лицевой хирургии и оториноларингологии, ежегодно в Российскую Федерацию поставляется до 1000 КЛКТ различных производителей. Без применения вышеуказанных рентгеновских методов практически невозможна работа медицинских организаций стоматологического профиля. Применение совре-

Балтрукова Татьяна Борисовна

Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова

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

менного рентгеновского оборудования открыло возможности для повышения точности диагностики, улучшения качества изображений, сокращения времени проведения исследований [3] и, как следствие, снижения доз облучения пациентов (для традиционных видов исследований).

Выполнение рентгенологических исследований в стоматологии может проводиться как в условиях выделенного рентгеновского кабинета (отделения), так и в условиях стоматологического кабинета, в случае его соответствия требованиям радиационной безопасности. Такое нововведение привело к применению нового устоявшегося термина – «рентгеностоматологический кабинет».

Рентгеностоматологические исследования являются одними из наиболее распространенных рентгенологических исследований. Так, по данным формы государственного статистического наблюдения №3-ДОЗ системы ЕСКИД¹ в 2020 г., даже в условиях пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 данные исследования в Российской Федерации составили около 15% от всех рентгенографических исследований и 3% от компьютерно-томографических исследований. Это соответствует вкладу в 13% в общее число диагностических рентгенорадиологических исследований.

Рентгеностоматологические исследования ассоциированы со сравнительно невысокими дозами облучения пациентов. По данным собственных исследований ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, средние эффективные дозы за один прицельный снимок составляют 3–8 мкЗв и 1–3 мкЗв для аналоговых и цифровых аппаратов соответственно; за одну панорамную рентгенографию – 30 мкЗв. Исключением являются КЛКТ: средняя эффективная доза за 1 КЛКТ составляет около 0,5 мЗв и может достигать до 1 мЗв [4].

Несмотря на низкие уровни облучения пациентов и персонала при проведении рентгеностоматологических исследований [5], соблюдение требований по обеспече-

нию радиационной безопасности в полном объеме является обязательным условием в работе медицинской организации стоматологического профиля.

Для обеспечения радиационной безопасности в стоматологических кабинетах большое внимание уделяется разработке и выполнению комплекса мер организационного, правового, инженерно-технического, санитарно-гигиенического, медико-профилактического характера при их проектировании и эксплуатации [6–12].

Организация работы рентгеновских кабинетов (отделений) и обеспечение в них радиационной безопасности имеют много особенностей, которые изложены в различных нормативно-правовых документах, иногда противоречащих друг другу, что создает проблемы в правоприменительной практике со стороны администрации и персонала медицинской организации.

В период 2020–2021 гг. в рамках «регуляторной гильотины» нормативная база, устанавливающая обязательные требования к порядку и стандартам оказания стоматологической помощи, в том числе и санитарно-эпидемиологические, претерпела значительные изменения.

Так, например, утратили силу ранее действовавшие санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность², отменены нормы по организации и оснащению службы лучевой диагностики³, пересмотрены перечни вредных и (или) опасных производственных факторов и порядки оказания обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров⁴. Новые правила для медицинских организаций включены в общие санитарно-эпидемиологические требования к эксплуатации помещений, зданий, сооружений, оборудования и транспорта, а также условиям деятельности хозяйствующих субъектов, осуществляющих продажу товаров, выполнение работ или оказание услуг⁵. Министерством здравоохранения РФ утвержде-

¹ ЕСКИД – Единая система контроля индивидуальных доз облучения граждан в России [USMID – Unified system for monitoring individual doses of exposure of citizens in Russia (In Russ.)]

² Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.05.2010 № 58 (ред. от 10.06.2016) «Об утверждении СанПиН 2.1.3.2630-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность» (вместе с «СанПиН 2.1.3.2630-10. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы...») // СПС Консультант Плюс (Утратил силу). [Decree of Chief state sanitary doctor of the Russian Federation #58, 18.05.2010 (ed. 10.06.2016) "On the approval of SanPiN 2.1.3.2630-10 "Sanitary-epidemiological requirements to the medical facilities" // SPS Consultant Plus (repealed) (In Russ.)]

³ Приказ Минздрава РСФСР от 02.08.1991 № 132 «О совершенствовании службы лучевой диагностики» (вместе с «Положением ...») // СПС Консультант плюс (Утратил силу) [Order of the Ministry of Healthcare of the RSFSR #132, 02.08.1991 "On the development of the system of X-ray diagnostics" // SPS Consultant Plus (repealed) (In Russ.)]

⁴ Приказ Минздравсоцразвития России от 12.04.2011 № 302н (ред. от 18.05.2020) «Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся обязательные предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и Порядка проведения обязательных предварительных и периодических медицинских осмотров (обследований) работников, занятых на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда» // СПС Консультант Плюс (Утратил силу) [The Order of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation from 12.04.2011 N 302n (edition from 06.02.2018) "On the improvement of the list of harmful and(or) dangerous workplace factors and activities with mandatory initial and periodical medical examinations and the Practice of conduction of mandatory initial and periodical medical examinations of the employees, working in arduous of harmful and(or) dangerous working conditions". // SPS Consultant Plus (repealed) (In Russ.)]

⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 24.12.2020 № 44 «Об утверждении санитарных правил СП 2.1.3678-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к эксплуатации помещений, зданий, сооружений, оборудования и транспорта, а также условиям деятельности хозяйствующих субъектов, осуществляющих продажу товаров, выполнение работ или оказание услуг» // СПС Консультант Плюс. [Decree of Chief state sanitary doctor of the Russian Federation #44, 24.12.2020 "On the approval of State Sanitary Rules SP 2.1.3678-20 "Sanitary-epidemiological requirements on the use of premises, buildings, constructions, equipment and transport and conditions of operation of economic entities conducting trade of goods, execution of works or provision of services" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

ны правила проведения рентгенологических исследований⁶ и порядок оказания медицинской помощи детям со стоматологическими заболеваниями⁷, изменен порядок оказания медицинской помощи взрослому населению при стоматологических заболеваниях⁸ и др. Претерпели значительные изменения положения Федеральных законов «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»⁹ и «О лицензировании отдельных видов деятельности»¹⁰.

Все эти изменения в нормативно-правовой базе были призваны создать систему понятных и четких требований, снять избыточную административную нагрузку на медицинские организации, как на государственные,

так и на частные стоматологические клиники, снизить риски причинения вреда пациентам и персоналу.

При этом требования к обеспечению радиационной безопасности в медицине не претерпели каких-либо изменений¹¹. В связи с тем, что сводные санитарные правила по обеспечению радиационной безопасности приняты не были, сохраняются действующие гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований¹², нормы радиационной безопасности¹³, основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности¹⁴, правила организации и проведения индивидуального дозиметрического контроля¹⁵, методи-

⁶ Приказ Минздрава России от 09.06.2020 № 560н (ред. от 18.02.2021) «Об утверждении Правил проведения рентгенологических исследований» // СПС Консультант Плюс [Order of Ministry of Healthcare of Russia #560n, 09.06.2020 "On the approval of Rules of conduction of X-ray examinations" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

⁷ Приказ Минздрава России от 13.11.2012 № 910н (ред. от 21.02.2020) «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи детям со стоматологическими заболеваниями» // СПС Консультант Плюс [Order of Ministry of Healthcare of Russia #910n, 13.11.2012 (ed. 21.02.2020) "On the approval of the Order of provision of medical care for kids with dental diseases" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

⁸ Приказ Минздрава России от 18.02.2021 № 109н «О внесении изменений в Порядок оказания медицинской помощи взрослому населению при стоматологических заболеваниях, утвержденный приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 31 июля 2020 г. № 786н» // СПС Консультант плюс [Order of Ministry of Healthcare of Russia #109n, 18.02.2021 "On the changes in the Order of the provision of medical care to adults with dental diseases" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

⁹ Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» // СПС Консультант Плюс [Federal State Law #52-FZ, 30.03.1999 (ed. 02.07.2021) "On the sanitary-epidemiological well-being of the public" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

¹⁰ Федеральный закон от 04.05.2011 № 99-ФЗ (ред. от 06.12.2021) «О лицензировании отдельных видов деятельности» // СПС Консультант плюс [Federal State Law #99-FZ, 04.05.2011 (ed. 06.12.2021) "On the licensing of certain types of activities" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

¹¹ Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 N 2467 (ред. от 31.12.2021) «Об утверждении перечня нормативных правовых актов и групп нормативных правовых актов Правительства Российской Федерации, нормативных правовых актов, отдельных положений нормативных правовых актов и групп нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти, правовых актов, отдельных положений правовых актов, групп правовых актов исполнительных и распорядительных органов государственной власти РСФСР и Союза ССР, решений Государственной комиссии по радиочастотам, содержащих обязательные требования, в отношении которых не применяются положения частей 1, 2 и 3 статьи 15 Федерального закона «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 12.01.2022) [Decree of the Government of the Russian Federation #2467, 31.12.2020 "On the approval of the list of legislative acts and groups of legislative acts of the Government of the Russian Federation; legislative acts, certain conditions of legislative acts, and groups of legislative acts of federal executive authorities; ; legislative acts, certain conditions of legislative acts, and groups of legislative acts of executive and regulatory authorities of RSFSR and USSR, decisions of State commission on radio frequencies, containing mandatory requirements, for which statements of part 1,2 and 3 of chapter 15 of Federal Law "On the mandatory requirements in the Russian Federation" are not applicable" (In Russ.)]

¹² 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 нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 14.02.2003) // СПС Консультант плюс [Decree of Chief state sanitary doctor of the Russian Federation #8, 18.02.2003 "On the approval of SanPiN 2.6.1.1192-03" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

¹³ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 № 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») // СПС Консультант плюс [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.)]

¹⁴ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40 (ред. от 16.09.2013) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» (вместе с «СП 2.6.1.2612-10. ОСПОРБ-99/2010. Санитарные правила и нормативы...») // СПС Консультант плюс [Sanitary rules and norms SP2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules of the provision of the radiation safety (OSPORB 99/2010)". Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103742/ (In Russ.)]

¹⁵ МУ 2.6.1.3015-12. 2.6.1. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Методические указания» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19.04.2012) // СПС Консультант плюс [MU 2.6.1.3015-12 "Management and conduction of individual dose control. Staff of medical facilities" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

ческие указания по проведению радиационного контроля в рентгеновских кабинетах¹⁶ и др.

Принятие новых нормативно-правовых документов не решило многих проблем правового регулирования в этой области, а в ряде случаев привело к новым правовым казусам. Например, приказ Минздрава России от 09.07.2020 № 560н «Об утверждении Правил проведения рентгенологических исследований» относит к рентгеновским методам исследования магнитно-резонансную томографию, которая в принципе не подразумевает использование ионизирующего излучения.

Вызывает недоумение приказ Минздрава России от 31.07.2020 № 786н «Порядок оказания медицинской помощи взрослому населению при стоматологических заболеваниях»¹⁷, отменяющий необходимость наличия медицинской лицензии на выполнение работ (услуг) по рентгенологии при «выполнении рентгенологических исследований в кабинете стоматологии общей практики, кабинете терапевтической стоматологии, кабинете хирургической стоматологии, кабинете ортопедической стоматологии, ортодонтическом кабинете, стоматологическом кабинете в профессиональных образовательных организациях, образовательных организациях высшего образования и дополнительного профессионального образования, призывных пунктах, на предприятиях и в организациях, мобильном стоматологическом кабинете с применением дентального рентгеновского аппарата с цифровым приемником изображения (радиовизиограф), включенного в стандарты оснащения», что противоречит ФЗ №-99 «О лицензировании отдельных видов деятельности». Сам факт внесения нормы, отменяющей требование о лицензировании, установленное федеральным законом, в документ, утверждаемый Приказом МЗ РФ, является чрезвычайной правовой коллизией.

Так, например, согласно требованиям Федерального закона «О лицензировании отдельных видов деятельности», Постановления Правительства Российской Федерации от 01.06.2021 № 852¹⁸ «О лицензировании медицинской деятельности (за исключением ... инновационного центра «Сколково») и признании утратив-

шими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации», СанПиН 2.6.1.1192-03 работа рентгеновского кабинета в медицинской организации, в том числе стоматологической, разрешается только при наличии действующей лицензии на медицинскую деятельность по профилю «Рентгенология». То есть лицензия по профилю «Рентгенология» у стоматологической организации, если она оказывает населению услуги по рентгенологии, должна быть ОБЯЗАТЕЛЬНО.

Более того, отсутствие лицензии у медицинской организации на лицензируемый вид деятельности может нести за собой как административную¹⁹, так и уголовную²⁰ ответственность. Квалификация нарушений и определение вида ответственности уполномоченными органами осуществляется, исходя из конкретных обстоятельств [13].

В медицинской организации, помимо лицензии, должны быть санитарно-эпидемиологическое заключение о соответствии вида деятельности (эксплуатации и/или хранения рентгеновских аппаратов) требованиям государственных санитарных правил и другие документы, определенные санитарными правилами.

Как уже было отмечено выше, обязательные требования по обеспечению радиационной безопасности в медицинских организациях, не претерпели изменений. Система обеспечения радиационной безопасности при проведении медицинских рентгенологических исследований, в том числе в стоматологии, по-прежнему строится на 3 основополагающих принципах: нормирования, обоснования и оптимизации; обеспечивается проведение комплекса мер правового, организационного, инженерно-технического, санитарно-гигиенического, медико-профилактического, воспитательного и образовательного характера.

Выбор помещений, входящих в состав рентгеновского кабинета, осуществляется администрацией медицинской организации и согласуется с организацией (структурным подразделением) федеральных органов исполнительной власти, уполномоченной осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор²¹, при этом их

¹⁶ МУ 2.6.1.1982-05. Проведение радиационного контроля в рентгеновских кабинетах. Методические указания» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 25.04.2005) // СПС Консультант плюс [МУ 2.6.1.1982-05 "Conduction of radiation control in the X-ray rooms" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

¹⁷ Приказ Минздрава России от 31.07.2020 № 786н (ред. от 18.02.2021) «Об утверждении Порядка оказания медицинской помощи взрослому населению при стоматологических заболеваниях» // СПС Консультант Плюс [Order of the Ministry of Healthcare of Russia #786н, 31.07.2020 (ed. 18.02.2021) "On the approval of the Order of provision of medical care for adults with dental diseases" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

¹⁸ Постановление Правительства РФ от 01.06.2021 № 852 «О лицензировании медицинской деятельности (за исключением указанной деятельности, осуществляемой медицинскими организациями и другими организациями, входящими в частную систему здравоохранения, на территории инновационного центра «Сколково») ...» (вместе с «Положением о лицензировании медицинской деятельности (за исключением ... «Сколково»)») // СПС Консультант плюс [Decree of the Government of the Russian Federation #852, 01.06.2021 "On the licensing of the medical activities" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

¹⁹ Ст. 14.1, ст. 6.2, ст. 19.20. Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195-ФЗ (ред. от 01.07.2021, с изм. от 09.11.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.12.2021) // СПС Консультант плюс [Articles 14.1, 6.2, 19.20 of the Code of the Russian Federation on the administrative offences #195-FZ, 30.12.2001 // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

²⁰ Ст. 171 Уголовного кодекса Российской Федерации от 13.06.1996 № 63-ФЗ (ред. от 01.07.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.12.2021) // СПС Консультант плюс [Article 171 of the Criminal Code of the Russian Federation #63-FZ, 13.06.1996 // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

²¹ В настоящее время эти функции выполняет Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека [At the current time these functions are performed by the Federal service on surveillance on consumer rights protection and human well-being]

расположение не должно противоречить санитарному законодательству. Тем не менее, сохраняется ряд проблемных моментов, решить которые в текущей ситуации затруднительно.

Существовавшие ранее противоречия по расположению рентгеновских аппаратов в жилых многоквартирных зданиях с принятием новой редакции Свода правил²² устранили существовавший ранее правовой казус по размещению рентгенодиагностических аппаратов, применяемых в стоматологической практике, в жилых зданиях. Так, если ранее по требованиям СНиП 31-01-2003 «Здания жилые многоквартирные»²³ было запрещено размещение любых рентгеновских кабинетов, а также помещений с лечебной или диагностической аппаратурой и установками, являющимися источниками ионизирующего излучения в цокольных, первых и вторых этажах (а в крупных и крупнейших городах²⁴ – в третьих этажах) жилых многоквартирных зданий, то в настоящее время, такое размещение допускается при условии соответствия создаваемого ионизирующего излучения уровням, установленным санитарно-эпидемиологическими правилами.

При этом в настоящее время в жилых зданиях на основании ОСПОРБ-99/2010 допускается размещение цифровых рентгенодиагностических аппаратов, применяемых в стоматологической практике, номинальная рабочая нагрузка которых не превышает:

- 40 мА·мин/нед для помещений, смежных с жилыми помещениями, при условии обеспечения требований норм радиационной безопасности для населения в пределах помещений, в которых проводятся диагностические исследования;

- 200 мА·мин/нед для помещений, не смежных с жилыми помещениями, при условии обеспечения требований норм радиационной безопасности для населения в пределах помещений стоматологической организации».

П. 9.2 СанПиН 2.6.1.1192-03 также четко ограничена номенклатура рентгеновских стоматологических аппаратов, которые возможно размещать в жилых зданиях. К таким аппаратам относят «дентальные аппараты и пантомографы, работающие с высокочувствительным приемником изображения (без фотолаборатории), и дентальные аппараты с цифровой обработкой изображения». При этом номинальное анодное напряжение для дентальных аппаратов и пантомографов с «высокочувствительным» приемником изображения ограничено 70 кВ; для панорамных аппаратов и пантомографов – 90 кВ.

Данные ограничения являются предельно спорными и вызывают большое количество разночтений в практике регулирующих организаций. Как правило, в технической

документации на рентгеновские стоматологические аппараты, как отечественного, так и зарубежного производства, не содержатся сведения о рабочей нагрузке. Отсутствуют методики расчета (оценки) рабочей нагрузки, исходя из количества обследованных пациентов и параметров протоколов проведения рентгеностоматологических исследований. Также в большинстве КЛКТ и ортопантомографов заложены режимы, отличающиеся по режимам анодного напряжения. Следует отметить, что для КЛКТ значения номинальной рабочей нагрузки в СанПин 2.6.1.1192-03 отсутствуют в принципе.

Чтобы уйти от ограничений по размещению рентгеностоматологических аппаратов в помещениях, смежных с жилыми, предусмотренных ОСПОРБ 99/2010 и СанПиН 2.6.1.1192-03, широко используется практика оборудования рентгенозащитных антресолей (фальшпотолков), технических подполов (фальшполов) и дополнительных внутренних стен в стоматологических рентгеновских кабинетах. Образовавшееся пространство необоснованно трактуется как смежное нежилое помещение.

В проекте сводных санитарных правил по обеспечению радиационной безопасности и ОСПОРБ 99/2021 был предложен компромиссный вариант, позволяющий упростить размещение рентгеностоматологических аппаратов в жилых зданиях. Предполагалось разрешить размещение и использование для рентгеностоматологических исследований пациентов стоматологических рентгенодиагностических аппаратов с цифровой обработкой изображения, при условии обеспечения организацией, проводящей рентгеностоматологические исследования пациентов, требований норм радиационной безопасности для населения на внутренних поверхностях стен (перекрытий) процедурной рентгеностоматологического кабинета, отделяющих ее от жилых помещений. Таким образом, все виды рентгеновского стоматологического оборудования (в том числе и КЛКТ) было бы возможно размещать в жилых зданиях при условии непревышения мощности амбиентного эквивалента дозы на стенах/перекрытиях в 0,3 мкЗв/ч.

Выбор рентгеновского аппарата стоматологической организацией проводится самостоятельно с учетом структуры предполагаемых исследований и возможностей рентгеновских аппаратов, а в организациях государственной системы здравоохранения также с учетом рекомендаций по оснащению стоматологических отделений (кабинетов) и возможностью размещения аппаратов на предполагаемых площадях. Кроме того, в медицинской практике разрешены к применению только те рентгеновские аппараты, которые соответствуют требованиям радиационной безопасности²⁵ и имеют регистрационное

²² СП 54.13330.2016. Свод правил. Здания жилые многоквартирные. Актуализированная редакция СНиП 31-01-2003 (утв. Приказом Минстроя России от 03.12.2016 N 883/пр) // СПС Консультант плюс [SP 54.133300.2016 Code of Practice. Multi-apartment residential buildings. Actualized version of SNiP 31-01-2003 // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

²³ Приказ Минстроя России от 03.12.2016 № 883/пр (ред. от 10.02.2017) «Об утверждении СП 54.13330 «СНиП 31-01-2003 Здания жилые многоквартирные» // СПС Консультант плюс [Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation #883/pr, 03.12.2016 "On the approval of SP 54.13330 "SNiP 31-01-2003 Multi-apartment residential buildings" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

²⁴ Классификация городов дана в «СП 42.13330.2011. Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*» (утв. Приказом Минрегиона России от 28.12.2010 № 820) // СПС Консультант плюс [Classification of cities is presented in SP 42.13330.2011. Code of Practice. City planning. Planning and development of city and village settlements. Actualized version of SNiP 2.07.01-89 (In Russ.)]

удостоверение на медицинское изделие²⁶, включены в государственный реестр медицинских изделий, разрешенных для медицинского применения в Российской Федерации²⁷. Но нужно отметить, что введение приказом МЗ № 560н кодов видов номенклатурной классификации медицинских изделий для стандартного оснащения рентгеновских кабинетов, опять-таки приводит к правовой коллизии. Для целей лицензирования недостаточно выбрать аппарат, зарегистрированный в РФ, он еще должен соответствовать указанным кодам, а далеко не все коды зарегистрированных рентгеновских аппаратов включены в данный документ. Данный факт противоречит не только принципам антимонопольного законодательства, но и федеральному закону №323-ФЗ.

Дополнительные проблемы возникают при желании медицинской организации использовать переносные рентгеновские аппараты, которые широко представлены на отечественном рынке. В соответствии с требованиями п. 3.22 СанПин 2.6.1.1192-03 управление такими аппаратами должно производиться с помощью выносного пульта управления с расстояния не менее 2,5 м. Данное условие на практике нивелирует все преимущества переносного аппарата (компактность, возможность выполнения съемки под разными углами и пр.) и требует его стационарного размещения.

Отдельной проблемой является описание результатов рентгенологического исследования. Следует отметить, что в «Профессиональном стандарте врача-рентгенолога»²⁸ установлены определенные требования к образованию данных специалистов, в соответствии с которыми врачи стоматологического профиля не могут обучаться в ординатуре по рентгенологии и получить специализацию врача-рентгенолога. При этом на основании «Профессионального стандарта врача-стоматолога»²⁹ такие специалисты должны уметь интерпретировать рентгенограммы, телерентгенограммы, радиовизиограммы, ортопантограммы, томограммы (на пленочных и цифровых носителях).

Несогласованность требований в правовых актах органов исполнительной власти в сфере санитарно-эпидемиологического благополучия и в сфере здравоохранения приводит к затруднениям в практике применения норм законодательства. С одной стороны, в соответствии со статьей 39.3 Федерального закона «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» соблюдение санитарных правил является обязательным для граждан, индивидуальных предпринимателей и юридических лиц, с другой стороны, Минздравом России указаны иные требования. В связи с этим, по-прежнему актуально совершенствование правотворческой деятельности, представляющей из себя научную и практическую проблему, являющуюся предметом постоянных дискуссий [14, 15].

Таким образом, обновленные нормативно – правовые документы, ставшие результатом работы «регуляторной гильотины» в области организации рентгенологической службы и обеспечения радиационной безопасности в стоматологии, сократив ряд обязательных требований, выявили системные ошибки, требующие как дальнейшего реформирования, так и механизма постоянной актуализации норм и требований в сфере радиационной безопасности в связи с бурно развивающимися технологиями и переходом к государственному регулированию через управление рисками.

Литература

1. Лучевая диагностика в стоматологии: национальное руководство / гл. ред. тома А.Ю. Васильев. (Серия «Национальные руководства по лучевой диагностике и терапии» / гл. ред. серии С.К. Терновой). М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. 288 с.
2. Петренко К.А. Перспективные методы рентгенологического исследования в стоматологии // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2016. № 1-4. Р. 32-35.
3. Аржанцев А.П. Рентгенология в стоматологии: руководство для врачей. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2021. 304 с. URL: <https://library.geotar.ru/book/ISBN9785970461976.html> (Дата обращения: 16.11.2021).

²⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2011 № 91 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2891-11 «Требования радиационной безопасности при производстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации (утилизации) медицинской техники, содержащей источники ионизирующего излучения» (вместе с «СанПиН 2.6.1.2891-11. Санитарные правила и нормативы...») // СПС Консультант плюс [SanPiN 2.6.1.2891-11 "Requirements on radiation safety for manufacturing, use and decommissioning (utilization) of the medical equipment containing sources of ionizing exposure" // SPS Consultant Plus (In Russ.)]

²⁶ См., например, Федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ (ред. от 02.07.2021) «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.10.2021); Постановление Правительства РФ от 27.12.2012 № 1416 (ред. от 24.11.2020) «Об утверждении Правил государственной регистрации медицинских изделий»; Приказ Росздравнадзора от 06.05.2019 № 3371 «Об утверждении Административного регламента Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения по предоставлению государственной услуги по государственной регистрации медицинских изделий» // СПС Консультант плюс [Federal State Law #323-FZ "On the basics of the healthcare of the citizens in the Russian Federation", Decree of the Government of the Russian Federation "On the establishment of the Rules of state registration of medical goods", Order of Roszdravnadzor #3371, 06.05.2019 "On the establishment of administrative regulation of the Federal service on surveillance in healthcare on the provision of the state service on the governmental registration of medical goods" (In Russ.)]

²⁷ Государственный реестр медицинских изделий и организаций (индивидуальных предпринимателей), осуществляющих производство и изготовление медицинских изделий [State registry of medical goods and facilities (individual entrepreneurs) manufacturing and assembling medical goods (In Russ.)]

²⁸ Приказ Минтруда России от 19.03.2019 № 160н «Об утверждении профессионального стандарта «Врач-рентгенолог» // СПС Консультант плюс [Order of the Ministry of Labor of Russia #160n, 19.03.2019 "On approval of the professional standard "Radiologist" (In Russ.)]

²⁹ Приказ Минтруда России от 10.05.2016 № 227н «Об утверждении профессионального стандарта «Врач-стоматолог» // СПС Консультант плюс [Order of the Ministry of Labor of Russia #227n, 10.05.2016 "On approval of the professional standard "Dentist" (In Russ.)]

4. Shatsky I. Effective doses and radiation risks from common dental radiographic, panoramic and CBCT examinations // Radiation Protection Dosimetry. October 2021. Vol. 195, No 3-4. P. 296–305. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab069>
5. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. Том 1. Лучевая диагностика / Под ред. проф. М.И. Балонина. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2019. Т.1. 320 с.
6. Хафизов Р.Г., Житко А.К., Азизова Д.А., и др. Стоматологическая радиология. Казань: Казан.ун-т, 2015. 64 с.
7. Акопова Н.А., Дружинина Ю.В., Ермолина Е.П., Логинова С.В. Оценка радиационной обстановки при рентгено-стоматологических исследованиях // Радиационно-гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. Санкт-Петербург: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. 2021. С. 6-8.2.
8. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. DOI 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
9. Балтрукова Т.Б. Гигиенические требования к обеспечению радиационной безопасности при работе с рентгеновскими стоматологическими аппаратами // Настольный справочник руководителя стоматологической клиники. СПб: ООО «Издательство Форум Медиа», 2012. 28 с.
10. Балтрукова Т.Б. Особенности проектирования рентгеностоматологических кабинетов // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Сб. тез. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию со д.р. П.В. Рамзаева. СПб: НИИРГ, 2014. С. 19-21.
11. Балтрукова Т.Б., Иванова О.И. Организационно-правовые аспекты обеспечения радиационной безопасности в рентгеновских кабинетах: учебно-методическое пособие / Министерство здравоохранения Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Кафедра гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены. СПб: Изд-во СЗГМУ им. И. И. Мечникова, 2016. 60 с.
12. Чибисова М.А. Радиационная безопасность при организации рентгенодиагностического обследования в амбулаторной стоматологической практике // Форум практикующих стоматологов. 2013. № 2(8). С. 4-15.
13. Чибисова М.А., Остренко С.Ю. Организация и радиационная безопасность рентгеностоматологических исследований в свете современных нормативных документов и санитарных правил // Институт стоматологии. 2014. № 4(65). С. 16-17.
14. Рёрихт А.А., Дубовик О.Л. Юридическая ответственность за нарушение законодательства об использовании атомной энергии, радиационной безопасности и радиоактивных отходов. РАН. Ин-т государства и права. М.: ООО «НБ-Медиа», 2013. 232 с.
15. Артеменко Е.А. «Регуляторная гильотина»: анализ проектов новых структур нормативного регулирования // Вопросы государственного и муниципального управления. 2021. №1. С. 30-55

Поступила: 31.01.2022 г.

Балтрукова Татьяна Борисовна – доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 195067, Санкт-Петербург, Пискаревский пр., д. 47; E-mail: xray_btb@mail.ru

Воронкова Светлана Владимировна – кандидат юридических наук, магистр общественного здравоохранения, научный сотрудник лаборатории судовой и водолазной медицины Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства, Санкт-Петербург, Россия

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

Для цитирования: Балтрукова Т.Б., Воронкова С.В., Водоватов А.В. Актуальные проблемы обеспечения радиационной безопасности при проведении рентгеностоматологических исследований // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 111-119. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-111-119

Topical issues of the provision of the radiation safety for dental X-ray examinations

Tatyana B. Baltrukova¹, Svetlana V. Voronkova², Aleksandr V. Vodovатов^{3,4}

¹ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint-Petersburg, Russia

² Research Institute of Industrial and Maritime Medicine of Federal Medical Biological Agency, Saint-Petersburg, 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 Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

As a part of administrative reform and “regulatory guillotine” in Russia in 2020–2021, several significant changes in the governmental regulation of dental care have occurred: implementation of new version of Order of provision of dental care and infrastructure of governmental dental facilities; approval of Rules of carrying of X-ray examinations; development of changes in the sanitary-epidemiological requirements to medical facilities. Meanwhile, the requirements on the radiation safety in the medical facilities remained the same. The lack of coordination during the development of new documents between the Ministry of Healthcare and Rospotrebnadzor resulted in preservation of the existing problems with the use of X-ray equipment in dentistry (for example, related to the allocation of dental X-ray units in residual and public buildings) and appearance of new problems (for example, removal of a requirement for the license in radiology for dentists). The study is focused on the analysis of the issues of regulation of the provision of radiation safety for dental care of public of the Russian Federation. It includes a review of the acting regulatory documents of the Ministry of Healthcare and Rospotrebnadzor, regulating the allocation of dental X-ray units and provision of dental X-ray examinations, with subsequent identification of the major issues and problems. The results of the study indicate that changes in the regulatory documents of the Ministry of Healthcare implemented in 2020–2021 contradict the acting requirements on radiation safety. It is necessary to further improve the legislative base regulating the dental care: harmonization of the acting requirements on the equipment of the dental rooms, orders and standards of dental care, training of staff. The harmonized base should result in a provision of qualitative dental care and radiation safety.

Keywords: radiation safety, “regulatory guillotine”, dental care, dental X-ray examinations.

References

1. X-ray diagnostics in dentistry: national guidelines / Ed. by A.Yu. Vasilyev (Series “National guidelines on X-ray diagnostics and therapy” / Ed. by S.A. Ternovoy). Moscow: GEOTAR-Media; 2010. 288 p. (In Russian).
2. Petrenko KA. The innovative methods of the dental x-ray diagnostics. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2016;1-4: 32-35. (In Russian).
3. Arzhantsev AP. Roengenology in dentistry: guidelines for physicians. Moscow: GEOTAR-Media. 2021. 304 p. Available on: <https://library.geotar.ru/book/ISBN9785970461976.html> (Accessed: November 16, 2021). (In Russian).
4. Shatsky I. Effective doses and radiation risks from common dental radiographic, panoramic and CBCT examinations. *Radiation Protection Dosimetry*. October 2021;195(3-4): 296–305. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab069>
5. Balonov MI, Golikov VYu, Vodovатов AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Kalnitsky SA, et al. Scientific basis of the radiation safety in modern medicine. Vol. 1. X-ray diagnostics. Ed. by prof. M.I. Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG after prof. P.V. Ramzaev; 2019. Vol. 1. 320 p. (In Russian).
6. Khafizov RG, Zhitko AK, Azizova DA, Khafizova FA, Khairutdinova AR. Dental radiology. Kazan: Kazan University; 2015. 64 p. (In Russian).
7. Akopova NA, Druzhinina YuV, Ermolina EP, Loginova SV. Assessment of radiation environment for dental X-ray examinations. Radiation-hygienic consequences and lessons from the accidents at Chernobyl NPP and Fukushima-1 NPP: Proceedings of international scientific-practical conference, St-Petersburg, 22-23.04.2021. St-Petersburg: FBUN NIIRG after prof. P.V. Ramzaev; 2021. P. 6-8.2. (In Russian).
8. Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovатов AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 6-24. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24>. (In Russian).
9. Baltrukova TB. Hygienic requirements on the provision of the radiation safety for the use of dental X-ray units. Handbook for the head of dental clinic. St- Petersburg: JSC “Forum Media Publishing”; 2012. 28 p. (In Russian).
10. Baltrukova TB. Features of design of the dental X-ray rooms. Actual issues of radiation hygiene. Proceedings of international scientific-practical conference on 85th anniversary of P.V. Ramzaev. St- Petersburg: NIIRG; 2014. P. 19-21. (In Russian).
11. Baltrukova TB, Ivanova OI. Procedural and institutional aspects of provision of radiation safety in X-ray rooms: a

Tatyana B. Baltrukova

North-western State Medical University named after I.I. Mechnikov

Address for correspondence: Piskarevskiy pr., 47, Saint-Petersburg, 195067, Russia; E-mail: xray_btb@mail.ru

- handbook. North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, department of Hygiene of Educational, Training, and Labor Conditions, and Radiation Hygiene. St-Petersburg: Publishing of NWSMU after I.I. Mechnikov; 2016. 60 p. (In Russian).
12. Chibisova MA. Radiation safety for X-ray examinations performed in ambulatory dental practice. *Forum praktikuyushchikh stomatologov = Forum of practical dentists*. 2013;2(8): 4-15. (In Russian).
 13. Chibisova MA, Ostrenko SYu. Management and radiation safety of X-ray dental examinations in the light of modern legislative documents and sanitary rules. *Institut stomatologii = Institute of dentistry*. 2014;4(65): 16-17. (In Russian).
 14. Rerikht AA, Dubovik OL. Legal responsibility for the violation of legislation on the use of atomic energy, radiation safety and radioactive waste. Russian academy of sciences. Institute of state and law. Moscow: OOO «NB-Media»; 2013. 232 p. (In Russian).
 15. Artemenko EA. Regulatory Guillotine: project analysis of new regulatory structures. *Voprosy gosudarstvennogo i munitsipalnogo upravleniya = Public administration issues*. 2021;1: 30-55. (In Russian).

Received: January 31, 2022

For correspondence: Tatyana B. Baltrukova – Doctor of Medical Sciences, professor, department of Hygiene of Educational, Training, and Labor Conditions, and Radiation Hygiene of the North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov (Piskarevskiy pr., 47, Saint-Petersburg, 195067, Russia; E-mail: xray_btb@mail.ru)

Svetlana V. Voronkova - Candidate of legal sciences, master of public healthcare, scientist of laboratory of ship and diving medicine FGBUN "Research Institute of industrial and maritime medicine" of the Federal Medical-Biological Agency, Saint-Petersburg, Russia

Aleksandr V. Vodovатов – 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; Associate Professor of the Department of Hygiene of Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Baltrukova TB., Voronkova S.V., Vodovатов A.V. Topical issues of the provision of the radiation safety for dental X-ray examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 111-119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-111-119

Оценка поглощенных доз в органах пациентов от высвобожденного радионуклида–метки при проведении радионуклидной терапии с ^{225}Ac

А.Е. Петрова¹, Л.А. Чипига^{1,2,3}, А.В. Водоватов^{1,4}, А.А. Станжевский², Д.Н. Майстренко²,
А.А. Лумпов⁵, А.Б. Синюхин⁶, И.В. Бойков⁷, Т.Е. Рамешвили⁷

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, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

³ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

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

⁵ Радиевый институт им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Всерегиональное Объединение «Изотоп», Санкт-Петербург, Россия

⁷ Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

На сегодняшний день лечение онкологических заболеваний с использованием радиофармпрепаратов является развивающимся методом во всем мире. Изготовление радиофармпрепаратов и контроль качества его до введения пациенту является одним из важных элементов процедур ядерной медицины. Нестабильность соединения может привести к изменению распределения радионуклида в организме пациента, снижению эффективности лечения, а также необоснованному облучению здоровых органов и тканей. Целью данной работы являлась оценка поглощенных доз в органах и тканях человека при радионуклидной терапии с использованием ^{225}Ac в качестве метки для случая высвобождения ^{225}Ac в теле пациента. Поглощенные дозы были рассчитаны с использованием модели, представленной в Публикации 141 МКРЗ для здоровых людей. Данная модель состоит из 18 камер (кровь, кортикальный объем, кортикальная поверхность, кортикальный красный костный мозг, трабекулярный объем, трабекулярная поверхность, трабекулярный красный костный мозг, почки (две камеры), мочевого пузыря, печень (две камеры), гонады, содержимое тонкого кишечника, содержимое верхнего отдела толстого кишечника, мягкие ткани (MT1, MT0, MT2)). С использованием специализированного программного обеспечения SAAM II v2.3 были рассчитаны временные интегралы активности в камерах. Расчет поглощенных доз производился с использованием программного обеспечения IDAC-Dose 2.1. Наибольшие поглощенные дозы в органах от высвобожденного из радиофармпрепаратов ^{225}Ac были получены для печени, поверхности кости, почек, яичек и красного костного мозга, что приводит к увеличению доз в этих органах по сравнению с дозами от ^{225}Ac -ПСМА вплоть до 7 раз. Изменение биораспределения ^{225}Ac в организме пациента, связанное с высвобождением радионуклида из препарата, может привести к существенному росту доз в здоровых радиочувствительных органах и тканях, а также снижению эффективности лечения.

Ключевые слова: ^{225}Ac , радионуклидная терапия, радиофармпрепараты, поглощенные дозы в органах.

Введение

Радионуклидная терапия (РНТ) – это вид лучевой терапии, при котором облучение очагов происходит в результате введения в организм пациента радиофармпрепарата (РФП), который благодаря специфической тропности препарата к патологическому процессу позволяет донести

дозу облучения непосредственно к очагу, что делает этот метод лучевой терапии уникальным неинвазивным способом лечения злокачественных новообразований. [1]

В последние годы в практику РНТ активно внедряются РФП, меченные α -излучателями, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с β -излучающими радионукли-

Петрова Анна Евгеньевна

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: anyapetrova2797@gmail.com

дами. Одним из таких перспективных радионуклидов для РНТ является ^{225}Ac . Испускаемые α -частицы имеют высокую линейную передачу энергии, с пробегом в мягких тканях в пределах 80–100 мкм, что способствует эффективности лечения небольших поражений и метастазов [2]. РФП, меченные радионуклидом ^{225}Ac , такие как атезолизумаб, ПСМА показали свою эффективность при лечении онкологических заболеваний и изучаются в доклинических и клинических исследованиях [3–7]. Использование ^{225}Ac и его дочернего продукта ^{213}Bi , конъюгированного с антителами или носителем, является многообещающим методом лечения многих видов рака, таких как рак предстательной железы (РПЖ), немелкоклеточный рак легких (НМРЛ), миелоидный лейкоз, рак мочевого пузыря, рак яичников, рак молочной железы, рак поджелудочной железы, меланома и неходжкинская лимфома [8, 9].

В единичных работах представлены экспериментальные данные о биораспределении РФП, меченных ^{225}Ac , у животных и пациентов, полученные в рамках доклинических и клинических исследований. Так, целью экспериментов, проведенных в работе Stuparu et al. [6], было создание моделей РПЖ для изучения эффективности лечения ^{225}Ac -ПСМА-617 метастазов при разных стадиях заболевания. В работе Nedrow et al. [7] представлены результаты оценки биораспределения ^{225}Ac -DOTA-anti-PD-L1-BC у мышей пеп-Н с введенными подкожно клетками рака молочной железы. В работе Kratochwil et al. [5] были рассчитаны поглощенные дозы от ^{225}Ac -ПСМА-617 в органах и тканях пациентов, на основании кривых изменения активности от времени, которые были получены в серии сканирований пациентов с введенным ^{177}Lu -ПСМА-617, с экстраполяцией на физический период полураспада ^{225}Ac , предполагая при этом мгновенный распад дочерних радионуклидов.

Эффективность методов ядерной медицины зависит от качества вводимого пациенту РФП, включая стабильность, химическую и радиохимическую чистоту – параметров, которые влияют на распределение радионуклида в теле пациента и дозу к очагу. В ряде работ по изучению РФП на основе ^{225}Ac отмечалась нестабильность соединений актиния, при этом отщепление метки оценивалась вплоть до 10% [10–12]. Высвобожденный из соединения ^{225}Ac имеет другой метаболизм в организме пациента относительно РФП, не накапливается в очаге, что может привести к необоснованно высоким дозам в здоровых органах и тканях. Изменение биораспределения ^{225}Ac в организме пациента, связанное с высвобождением радионуклида из препарата, может привести к росту доз в здоровых радиочувствительных органах и тканях, а также к снижению эффективности лечения. Для оценки вклада высвобожденного ^{225}Ac в дозу облучения необходимы данные о биораспределении ^{225}Ac в организме человека, которых в настоящее время мало. Биокинетика актиния была изучена в экспериментах на крысах и наблюдалась у лиц из персонала [13]. В Публикации 141 МКРЗ представлена общая камерная модель биораспределения актиноидов в организме здоровых людей [13]. В связи с малым количеством данных не было возможности оценить специфические для актиния пути и скорости перехода в структуре общей модели и по причине схожести биораспределения актиния и америция, модель в Публикации 141 МКРЗ для актиния представляет собой немного измененную модель для америция. В данной работе была

проведена оценка поглощенных доз высвобожденного из РФП ^{225}Ac , основанная на модели биораспределения для актиноидов для здоровых людей из Публикации 141 МКРЗ [13]. Данная модель описывает распределение в организме водорастворимых соединений трехвалентного актиния (оксидов, хлоридов и нитратов) с пероральным и ингаляционным поступлением.

Использование моделей МКРЗ для ситуаций профессионального облучения (т.е. с пероральным и ингаляционным поступлением радионуклидов в организм) для оценки поглощенных доз в органах и тканях пациентов при РНТ является допустимым на этапе планирования и проведения доклинических испытаний, при отсутствии данных о накоплении радионуклида у пациентов. Так, в работе Lassman et al. [14] была проведена оценка доз от РФП ^{223}Ra -дихлорида на основании модели из Публикации МКРЗ 137 [15] для здоровых людей. Безусловно, распределение РФП в организме пациента будет отличаться от распределения органических и неорганических соединений радионуклидов. Однако на этапе планирования внедрения в медицинскую практику нового радионуклида данный подход является одним из возможных путей для проведения прогностической оценки распределения радионуклида и поглощенных доз в радиочувствительных органах. Следует отметить, что число публикаций по биокинетике и дозиметрии актиния крайне ограничено [5–7].

Цель исследования – оценка поглощенных доз в органах и тканях пациента при радионуклидной терапии с использованием ^{225}Ac в случае высвобождения ^{225}Ac из меченного им РФП. В работе был проведен расчет временных интегралов активностей радионуклида ^{225}Ac и определение поглощенных доз в органах и тканях пациента на основании модели, представленной в Публикации МКРЗ 141.

Материалы и методы

Накопление и выведение радионуклида

Для расчета поглощенных доз в данной работе была использована обобщенная модель распределения актиноидов для здоровых людей, представленная в Публикации 141 МКРЗ [13] (рис.1). Из представленной в Публикации 141 МКРЗ обобщенной модели был исключен переход из камеры «Печень 1» в камеру «Кровь» и переход от камеры «Кортикальный красный костный мозг» в камеру «Кортикальная поверхность» в связи с замечанием в Публикации 141 МКРЗ, что при использовании данной модели для актиноидов скорости перехода между данными камерами равны нулю. Также по причине отсутствия данных о скоростях выведения ^{225}Ac из организма в данной работе использован консервативный подход, подразумевающий отсутствие выведения ^{225}Ac из организма с калом. Для камер, соответствующих содержанию ректосигмовидной кишки, содержанию нижнего отдела толстого кишечника, калу и моче, отсутствовала информация о скоростях перехода. В связи с этим в данной работе было принято, что снижение активности радионуклида в толстом кишечнике происходит только за счет физического распада, а снижение активности в мочевом пузыре – за счет его опорожнения каждые 4 ч и физического распада.

Данная модель состоит из 18 камер: центральная камера: кровь; скелет – кортикальный объем, корти-

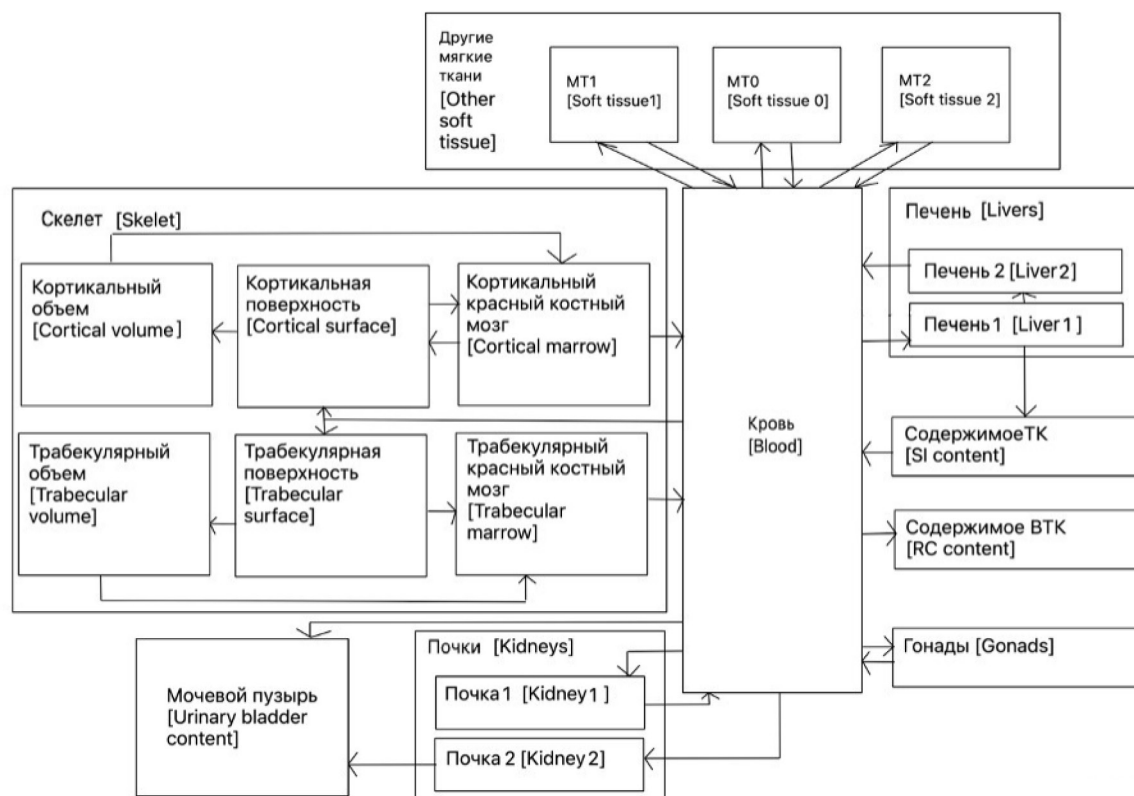


Рис. 1. Модель распределения ^{225}Ac для здоровых людей, представленная в Публикации МКРЗ 141 [13]
[Fig. 1. The ^{225}Ac biodistribution model presented in the ICRP Publication 141 [13] of for healthy people]

кальная поверхность, кортикальный красный костный мозг, трабекулярный объем, трабекулярная поверхность, трабекулярный красный костный мозг; мочевыделительная система: почки (две камеры: «почка 1» – с быстрым обменом, «почка 2» – с медленным обменом), мочевой пузырь; печень (две камеры: «печень 1» – с быстрым обменом, «печень 2» – с медленным обменом), гонады, подмодели желудочно-кишечного тракта: содержимое тонкого кишечника (ТК), содержимое верх-

него отдела толстого кишечника (ВТК). Остальные органы, которые не были включены в данную модель, представлены в виде камер – мягкие ткани с быстрым обменом веществ (MT1), мягкие ткани со средним обменом веществ (MT0), мягкие ткани с медленным обменом веществ (MT2).

Камерная модель биораспределения ^{225}Ac , представленная в Публикации 141 МКРЗ, была смоделирована в программном обеспечении SAAM II v2.3. [16].

Продукты распада ^{225}Ac с видами распада

Таблица 1

[Table 1]

The daughter radionuclides in the decay chain of ^{225}Ac with decay types

Дочерний радионуклид [Radionuclide]	Период полураспада [Half-life]	Вид излучения [Decay type]	Средняя энергия, МэВ [Energy, MeV]	Выход на распад (/nt)
^{225}Ac	10 д [day]	α	5,8	1
^{221}Fr	4,9 мин [min]	α	6,3	1
		γ	0,22	0,12
^{217}At	32,3 мс [ms]	α	7,1	0,99
^{213}Bi	45,6 мин [min]	α	5,8	0,021
		β	0,43	0,98
		γ	0,45	0,12
^{213}Po	4,2 мкс [mks]	α	8,5	1
^{209}Pb	3,25 ч [h]	β	0,197	1
^{209}Bi	Стабильный [Stable]			

При построении данной модели в программном обеспечении SAAM II использовался кинетический тип модели, был выбран болюсный способ введения в камеру – кровь. Единица введенного вещества соответствовала 1 000 000 МБк по причине низкого накопления активности в камерах и ограничений при расчете в программе SAAM II (далее было проведено нормирование на 1 МБк). Так как средний период дожития пациентов при кастрат-резистентном метастатическом РПЖ составляет 33 месяца [17, 18], то оценка накопления радионуклида проводилась на протяжении 33 месяцев от момента введения радионуклида ^{225}Ac в организм пациента.

В рассмотренной модели биораспределения ^{225}Ac кровь представлена как камера, в которой в начальный момент времени содержится весь введенный ^{225}Ac и далее обменивается им с мягкими тканями, камерами скелета, печенью, отделами желудочно-кишечного тракта и мочевыводящей системы. Выводится радионуклид из организма человека с калом и мочой. Однако в связи с отсутствием данных о скоростях выведения ^{225}Ac оценить накопленные активности в данных камерах было невозможно, поэтому в работе консервативно приняли, что радионуклид не выводится с калом, активность в камере «Верхний отдел толстого кишечника» снижается только за счет физического распада, а опорожнение мочевого пузыря происходит один раз в 4 ч.

Далее на основании полученных кривых накопления и выведения ^{225}Ac при помощи программы Origin Pro 2020 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA [19]) были рассчитаны накопленные активности в течение 33 месяцев с учётом физического распада радионуклида ^{225}Ac и его дочерних радионуклидов. Распределение дочерних радионуклидов в организме пациентов считали таким же, как и у ^{225}Ac в связи с их коротким периодом полураспада, при этом интегрированные по времени активности определялись отдельно для каждого дочернего радионуклида.

Оценка поглощенных доз в органах и тканях

Расчет поглощенных доз в органах и тканях производился в программе IDAC-Dose2.1 [20]. Данное программное обеспечение позволяет выполнить расчет поглощенных доз для радионуклидов, представленных в Публикации МКРЗ 107, для оценки доз внутреннего облучения. Расчет поглощенных доз в программе IDAC-Dose2.1 [20] был произведен для 18 камер, отдельно для каждого радионуклида из цепочки распада ^{225}Ac . Итоговая доза рассчитывалась как сумма поглощенных доз от всех радионуклидов.

Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) излучения используется как коэффициент для корректировки рассчитанной поглощенной дозы таким образом, чтобы она отражала вероятность или тяжесть биологического эффекта. Для стохастических эффектов, таких как индукция рака, для α -излучения принято использовать коэффициент 20 [21]. При таргетной терапии основным биологическим эффектом является не канцерогенез, а скорее эффективность или токсичность. Такие терапевтические эффекты являются детерминированными, и мерой, связанной с ними, является не вероятность возникновения (т.е. риск), а тяжесть токсичности или уровень ответа [22]. Коэффициент для таких эффектов для α -излучения находится в диапазоне от 3 до 7 [23, 24].

В нашем расчете доз, так же, как и в работе [5], был использован средний коэффициент 5 для α -излучения и 1 для β - и γ -излучения.

Результаты и обсуждение

Накопление и выведение радионуклида

Полученные кривые накопления и выведения ^{225}Ac в программе SAAM II v2.3 для всех камер модели представлены на рисунке 2.

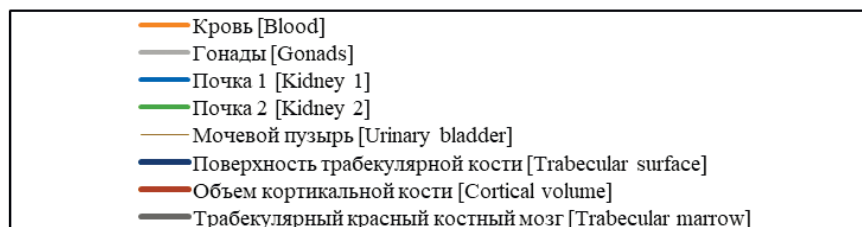
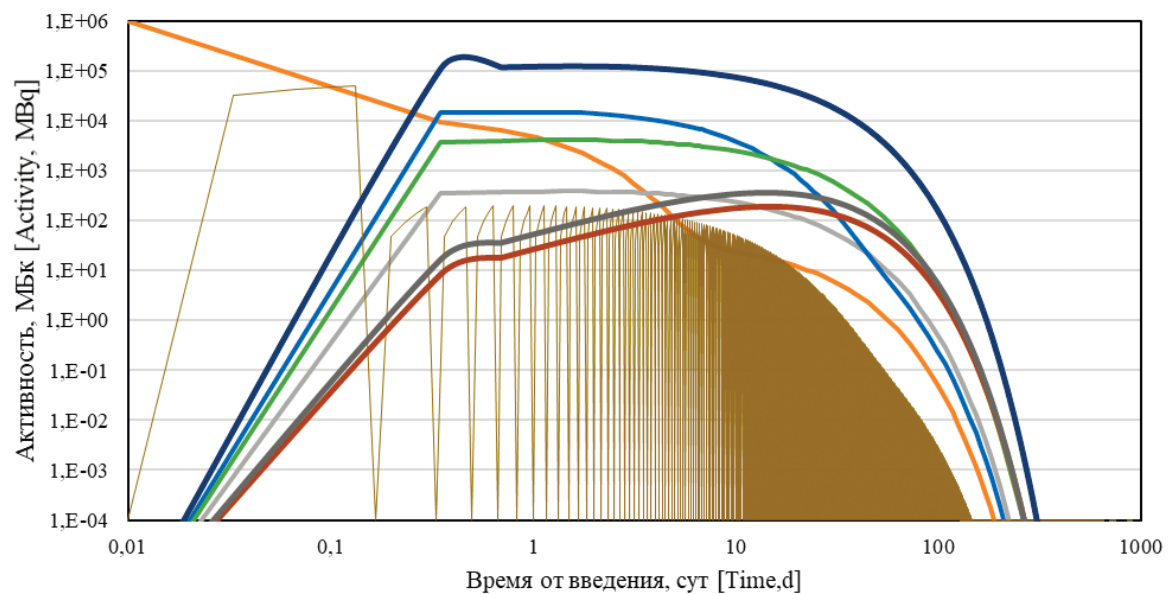
Короткие периоды полураспада дочерних радионуклидов относительно ^{225}Ac обуславливают быстрое наступление равновесного состояния, сходные кривые накопления и выведения для дочерних радионуклидов, а также их временные интегралы. Временные интегралы активности для всех камер модели, рассчитанные для введения 1 МБк ^{225}Ac с использованием программного обеспечения Origin Pro 2020, представлены в таблице 2. Только для камеры «Кровь» накопление радионуклидов и временные интегралы различались для дочерних радионуклидов, что связано с отсутствием равновесного состояния на момент болюсного введения ^{225}Ac через эту камеру. Интегрированная активность для дочерних радионуклидов в камере «Кровь» была определена как 0,28 МБк·ч.

Наибольшее накопление радионуклида, рассчитанное в соответствии с исследованной моделью, наблюдалось в печени, что связано с выведением его из организма с калом [7], также высокое накопление наблюдалось в поверхности трабекулярной и кортикальной кости. Так как дочерние радионуклиды имеют короткий период полураспада, при расчетах сделали допущение, что их распределение в организме было таким же, как у ^{225}Ac . Временные интегралы активности дочерних радионуклидов оказались равными временным интегралам ^{225}Ac для всех камер накопления, за исключением крови; при этом дочерние радионуклиды за счет высокого выхода альфа-излучения вносят существенный вклад в дозу для всех обследованных радиочувствительных органов – от 78% до 93%.

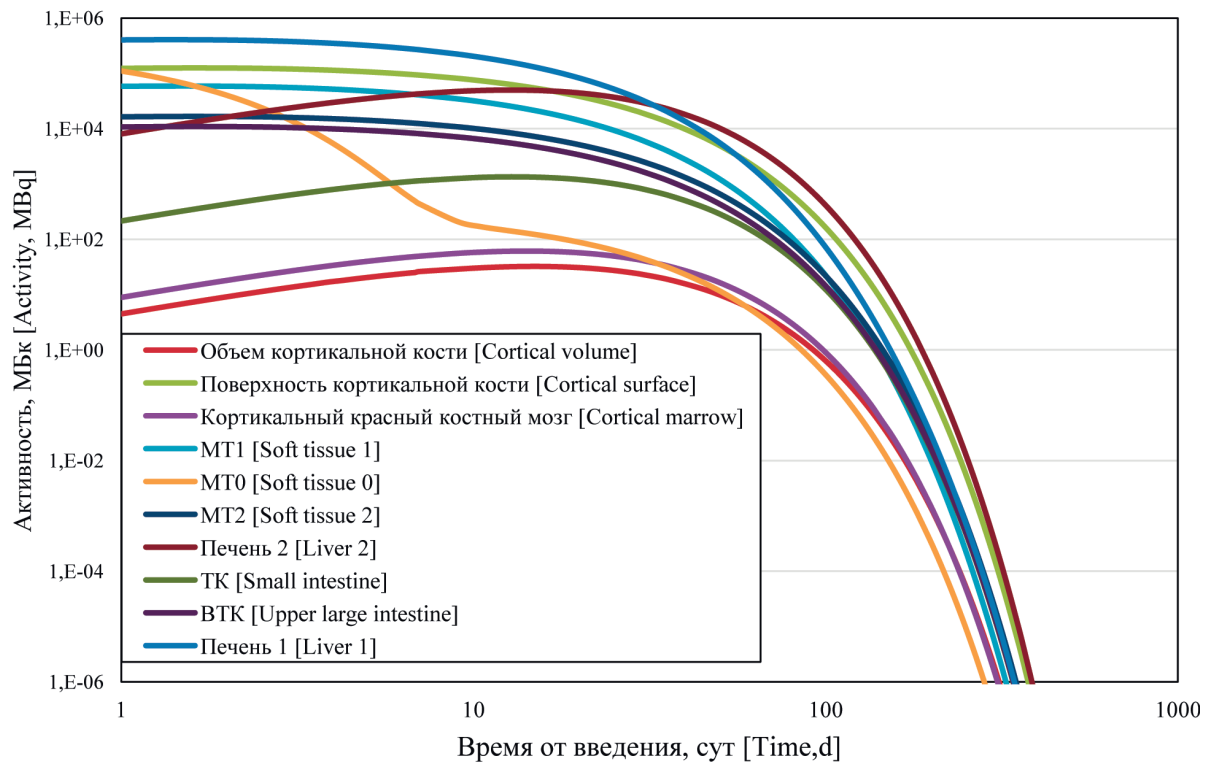
Оценка поглощенных доз в органах и тканях

В таблице 3 представлены поглощенные дозы от α и $\beta+\gamma$ -излучения, рассчитанные в программе IDAC Dose 2.1. Наибольший вклад в дозу для всех органов и тканей был от α -излучения. Наибольшие поглощенные дозы при расчете на единицу активности (1 МБк) были получены для печени (5856 мГр), поверхности кости (3858 мГр), почек (881 мГр), красного костного мозга (506 мГр), яичек (351 мГр) и мышцы (93 мГр). Дозы в селезенке, легких, толстом и тонком кишечнике, пищеводе и желудке находились в диапазоне от 15 мГр до 22 мГр. Меньшие поглощенные дозы были получены для следующих органов: тимус, слюнные железы, ротовая полость, молочная железа, желчный пузырь, дыхательная система, головной мозг и составили 2,9 мГр/МБк.

На основании полученных результатов расчета доз от свободного ^{225}Ac была проведена оценка вклада в дозу облучения радиочувствительных органов и тканей от высвобождаемого из соединения РФП ^{225}Ac . Расчет проводился для протокола, применяемого в клинических



a



b

Рис. 2. Кривые накопления и выведения ^{225}Ac для каждой камеры модели, при внутривенном введении 1 000 000 МБк активности
[Fig. 2. Accumulation and excretion of ^{225}Ac in the compartments per unit of injected activity (1 000 000 MBq)]

Временные интегралы активности для всех камер модели при введении 1 МБк активности

Таблица 2

[Table 2]

Time-integrated activities for all model compartments with the injection of a unit of activity (1 MBq)

Камеры [Cameras]	Временной интеграл активности, МБк·ч. [Time-integrated activities, MBq ·h]
Объем кортикальной кости [Cortical volume]	0,031
Поверхность кортикальной кости [Cortical surface]	51
Кортикальный костный мозг [Cortical marrow]	0,055
Мягкие ткани 1 [Soft tissue 1]	21
Мягкие ткани 0 [Soft tissue 0]	6,06
Мягкие ткани 2 [Soft tissue 2]	6,8
Печень 1 [Liver 1]	128
Печень 2 [Liver 2]	41
Тонкий кишечник [Small intestine]	1,6
Верхний отдел толстого кишечника [Right colon]	4,5
Кровь [Blood]	4,5
Гонады [Gonads]	0,16
Содержимое мочевого пузыря [Urinary bladder content]	0,16
Почка 1 [Kidney 1]	2,8
Почка 2 [Kidney 2]	1,7
Поверхность трабекулярной кости [Trabecular surface]	51
Объем трабекулярной кости [Trabecular volume]	0,18
Трабекулярный костный мозг [Trabecular marrow]	0,33

Поглощенные дозы с учетом ОБЭ (мГр) в основных радиочувствительных органах и тканях организма на единицу введенной активности (1 МБк) от α - и $\beta+\gamma$ -излучений рассчитанные в программе IDAC-Dose2. 1

Таблица 3

[Table 3]

Absorbed doses, taking into account RBE (mGy), in the main radiosensitive organs and tissues of the body per unit of injected activity (1 MBq) from α - and $\beta + \gamma$ -radiations calculated in the IDAC-Dose2. 1 software]

Орган [Organ]	α -излучение мГр/МБк [α -emission, mGy/ MBq]	$\beta+\gamma$ -излучение, мГр/МБк [$\beta+\gamma$ -emission, mGy/MBq]
Печень [Liver]	5856	29
Поверхность кости [Bone surface]	3858	7,2
Почки [Kidneys]	881	4,7

Окончание таблицы 3

Орган [Organ]	α -излучение мГр/МБк [α -emission, mGy/ MBq]	$\beta+\gamma$ -излучение, мГр/МБк [$\beta+\gamma$ -emission, mGy/MBq]
Красный костный мозг [Red bone marrow]	506	3,6
Яички [Testes]	351	1,6
Мышцы [Muscle]	93	0,6
Селезенка [Spleen]	22	0,3
Легкие [Lung]	21	0,5
Толстый кишечник [Colon]	16	0,5
Тонкий кишечник [Small intestine]	16	0,5
Пищевод [Oesophagus]	15	0,5
Желудок [Stomach]	15	0,7
Надпочечники [Adrenals]	13	1,3
Поджелудочная железа [Pancreas]	13	0,9
Сердце [Heart]	9,4	0,5
Щитовидная железа [Thyroid]	9,3	0,1
Лимфатические узлы [Lymphatic nodes]	3,8	0,4
Кожа [Skin]	3,2	0,1
Молочная железа [Breast]	2,9	0,2
Дыхательная система [ET region]	2,9	0,2
Желчный пузырь [Gallbladder wall]	2,9	5,3
Ротовая полость [Oral mucosa]	2,9	0,2
Простата [Prostate]	2,9	0,1
Слюнные железы [Salivary glands]	2,9	0,1
Тимус [Thymus]	2,9	0,2
Головной мозг [Brain]	2,9	0,1
Мочевой пузырь [Urinary bladder]	1,6	0,1
Хрусталики [Eye lenses]	0,0	0,1

исследованиях препарата ^{225}Ac -ПСМА-617 у пациентов с метастатическим устойчивым к кастрационно-резистентным РПЖ с ПСМА-позитивным фенотипом опухоли: пациентам вводили 100 кБк ^{225}Ac на кг веса – 7 МБк для стандартного пациента весом 70 кг, полный курс терапии состоял из 4 введений с интервалом в 2 месяца [5]. При расчёте предполагали, что количество высвобожденного ^{225}Ac составило 10% от введенной активности [10–12]. Для такой оценки использовались дозы пациентов при РНТ с ^{225}Ac -ПСМА-617, полученные в работе Kratochwil et al. [5], которые не учитывали высвобождение ^{225}Ac из соединения. Органы с наибольшими поглощенными дозами при РНТ с ^{225}Ac -ПСМА-617, а также дозы с учетом высвобождения ^{225}Ac из соединения, определенные согласно соотношению:

$$D_{^{225}\text{Ac-ПСМА+свободный } ^{225}\text{Ac}} = 0,9 \cdot D_{^{225}\text{Ac-ПСМА}} + 0,1 \cdot D_{\text{свободный } ^{225}\text{Ac}},$$

в пересчете на одну терапевтическую процедуру (7 МБк), представлены на рисунке 3.

Согласно работе Kratochwil et al. [5] дозы в радиочувствительных органах при введении 7 МБк ^{225}Ac -ПСМА-617 достигают 16 Гр в слюнных железах и 5 Гр в почках, эти органы являются критическими при радионуклидной терапии с ПСМА- ^{225}Ac . Также относительно высокие поглощенные дозы определяются в печени и селезенке (0,67 Гр и 1,51 Гр, соответственно).

В результате оценок вклада в дозу от высвободившегося из соединения (10% высвобождения метки) ^{225}Ac было получено, что изменение метаболизма ^{225}Ac в организме пациента приводит к изменению дозы (до 7 раз) в здоровых радиочувствительных органах и тканях. Например, при рассмотрении органов с высокими дозами при РНТ с ^{225}Ac -ПСМА-617, таких как печень и крас-

ный костный мозг, наблюдается рост доз в 7 и 2 раза соответственно; для таких органов, как слюнные железы и селезенка, наблюдается снижение доз до 11%. При этом существенный, до 7 раз, рост доз в печени при высвобождении из соединения 10% ^{225}Ac соответствует 4 Гр при введении 7 МБк ^{225}Ac -ПСМА-617. Таким образом, необходимым условием проведения РНТ с изотопом ^{225}Ac является обеспечение стабильности изготавливаемого РФП и проведение контроля качества препарата на всех стадиях его применения.

Заключение

В настоящей работе был проведен математический расчет поглощенных доз в радиочувствительных органах и тканях для нештатной ситуации в РНТ, при которой ^{225}Ac высвобождается из соединения, используемого для радионуклидной терапии, в связи с чем меняется его биораспределение в организме пациента. Расчеты в данной работе были проведены на основании модели биораспределения, представленной в Публикации МКРЗ 141.

В данной модели органами наибольшего накопления являются поверхность кортикальной кости, поверхность трабекулярной кости и печень. Наибольшие поглощенные дозы от ^{225}Ac при расчете на одну единицу активности (1 МБк) были получены для печени (5856 мГр), поверхности кости (3858 мГр), почек (881 мГр), красного костного мозга (506 мГр), яичек (351 мГр) и мышцы (93 мГр). Вклад дочерних радионуклидов ^{225}Ac в поглощенную дозу радиочувствительных органов составил от 78% до 93%.

По результатам расчета было получено, что высвобождение 10% ^{225}Ac из соединения может привести к росту поглощенных доз в здоровых органах и тканях, например, рост доз до 7 раз был получен для печени, что соответству-

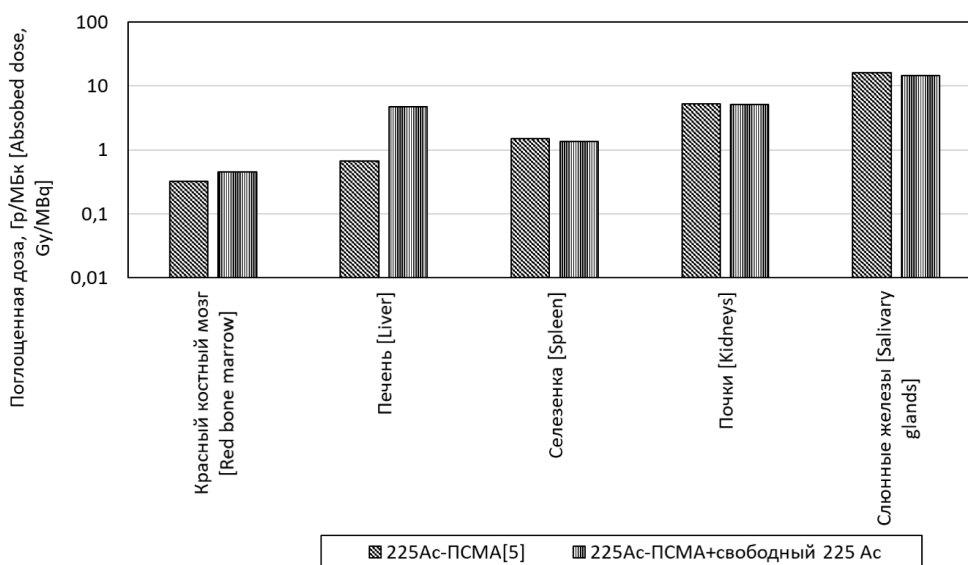


Рис. 3. Поглощенные дозы в радиочувствительных органах и тканях пациентов при РНТ с ^{225}Ac -ПСМА-617 из работы Kratochwil et al. [5] и дозы, полученные с учетом высвобождения 10% ^{225}Ac , при введении 7 МБк радионуклида

[Fig. 3.] Absorbed doses in radiosensitive organs and tissues of patients with RNT with ^{225}Ac -PSMA-617 from the work of Kratochwil et al. [5] and doses obtained taking into account the release of 10% ^{225}Ac , with the administration of 7 MBq of the radionuclide

ет 4 Гр при введении 7 МБк ^{225}Ac -ПСМА-617. Проведенные расчёты показывают, что необходимым условием введения в медицинскую практику радионуклидной терапии новых РФП является обеспечение стабильности изготавливаемого РФП, исследование стабильности на стадии доклинических испытаний и проведение контроля качества препарата перед введением пациенту.

Литература

1. Крылов В.В. Радионуклидная терапия в отечественной онкологии: успехи, проблемы и перспективы // Поволжский онкологический вестник. 2011. №1. С. 59-61.
2. Dauer L.T., Mayer D. Applications of systematic error bounds to detection limits for practical counting // Health Phys. 1993. Vol. 65. P. 89-91.
3. McDevitt M.R., Sgouros G., Finn R.D., et al. Radioimmunotherapy with alpha-emitting nuclides // European Journal of Nuclear Medicine. 1998. Vol. 25, № 9. P.1341–1351.
4. Muller C., van der Meulen N.P., Benešová M., Schibli R. Therapeutic radiometals beyond ^{177}Lu and ^{90}Y : production and application of promising α -particle, β -particle, and auger electron emitters // Journal of Nuclear Medicine. 2017. Vol. 58, № 2. P.91–96.
5. Kratochwil C., Bruchertseifer F., Rathke H., et al. Targeted α -Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer with ^{225}Ac -PSMA-617: Dosimetry Estimate and Empiric Dose Finding // Journal of Nuclear Medicine. 2017. Vol. 58, № 10. P. 1624-1631.
6. Stuparu A.D., Meyer C.A.L., Evans-Axelsson S.L., et al. Targeted alpha therapy in a systemic mouse model of prostate cancer – a feasibility study // Theranostics. 2020. Vol. 10, № 6. P. 2612-2620.
7. Nedrow R., Josefsson A., Park S., et al. Pharmacokinetics, microscale distribution, and dosimetry of alpha-emitter-labeled anti-PD-L1 antibodies in an immune competent transgenic breast cancer model // EJNMMI Research. 2017. Vol. 7, № 57.
8. Morgenstern A., Apostolidis C., Kratochwil C., et al. An Overview of Targeted Alpha Therapy with ^{225}Ac and ^{213}Bi // Current Radiopharmaceuticals. 2018. Vol.11. P. 200-208.
9. Jurcic J.G. Targeted Alpha-Particle Therapy for Hematologic Malignancies // Seminars in Nuclear Medicine. 2020. Vol. 50, № 2. P. 152-161.
10. McCleverty J.A., Meyer T.J. Comprehensive Coordination Chemistry II // Elsevier Science; 2003. 1063 p.
11. Kurtulus E., Benan K. Detailed Chemistry Studies of ^{225}Ac -Labeled Radiopharmaceuticals // Current Radiopharmaceuticals. 2021.
12. Deal K.A., Davis I.A., Mirzadeh S., et al. Improved in Vivo Stability of Actinium-225 Macrocyclic Complexes // Journal of Medicinal Chemistry. 1999. Vol. 42, № 15. P. 2988–2992.
13. ICRP Publication 141. Occupational intakes of radionuclides: Part 4 // Ann. ICRP. 2019. Vol. 48, No 2/3.
14. Lassmann M., Nosske D. Dosimetry of ^{223}Ra -chloride: dose to normal organs and tissues // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2012. Vol. 40, № 2. P. 207–212.
15. ICRP Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3 // Ann. ICRP. 2018. Vol. 46, No 3/4.
16. Barrett P.H., Bell B.M., Cobelli C., et al. SAAM II: simulation, analysis, and modeling software for tracer and pharmacokinetic studies // Metabolism. 1998. Vol. 47, № 4. P. 484–492.
17. Матвеев В.Б., Маркова А.С. Радий-223 в лечении кастрационно-резистентного рака предстательной железы с метастазами в кости // Онкоурология. 2017. Т.13, № 2. С. 140-147.
18. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрова А.Е., Станжевский А.А. Анализ моделей биораспределения ^{223}Ra -дихлорида для оценки доз внутреннего облучения // Формулы фармации. 2020. Т. 2, № 1. С. 54-69.
19. Официальный сайт OriginLab. URL: <https://www.originlab.com/demodownload.aspx>. (Дата обращения: 20.07.2021).
20. Andersson M., Johansson L., Eckerman K., Mattsson S. IDAC-Dose 2.1, an internal dosimetry program for diagnostic nuclear medicine based on the ICRP adult reference voxel phantoms // EJNMMI Research. 2017. Vol. 7, № 1.
21. ICRP Publication 103. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // Ann. ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4.
22. Sgouros G. Alpha-particles for targeted therapy // Advanced Drug Delivery Reviews. 2008. Vol. 60, № 12. P. 1402–1406.
23. ICRP Publication 92. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (w_R) // Ann. ICRP. 2003. Vol. 33, No 4.
24. MIRD Pamphlet No. 22 (Abridged): Radiobiology and Dosimetry of α -Particle Emitters for Targeted Radionuclide Therapy // Journal of nuclear medicine. 2010. Vol. 51, № 2. P. 311-328.

Поступила: 24.07.2021 г.

Петрова Анна Евгеньевна – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: anyapetrova2797@gmail.com

Чипига Лариса Александровна – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; научный сотрудник Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Водоватов Александр Валерьевич – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия

Станжевский Андрей Алексеевич – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Майстренко Дмитрий Николаевич – доктор медицинских наук, директор Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Лумпов Александр Александрович – начальник лаборатории химического и радиохимического анализа Акционерного Общества «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия

Синюхин Андрей Борисович – начальник группы развития производства проектного офиса Акционерного Общества «Всероссийское Объединение «Изотоп», Санкт-Петербург, Россия

Бойков Игорь Валерьевич – доктор медицинских наук, заместитель начальника кафедры рентгенологии и радиологии Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Рамешвили Тамара Евгеньевна – доктор медицинских наук, профессор кафедры рентгенологии и радиологии Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Петрова А.Е., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Лумпов А.А., Синюхин А.Б., Бойков И.В., Рамешвили Т.Е. Оценка поглощенных доз в органах пациентов от высвобожденного радионуклида-метки при проведении радионуклидной терапии с ^{225}Ac // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 120-131. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-120-131

Estimation of absorbed doses in patients' organs from the released radionuclide-label during radionuclide therapy with ^{225}Ac

Anna E. Petrova¹, Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Aleksandr V. Vodovатов^{1,4}, Andrey A. Stanzhevsky², Dmitry N. Maystrenko², Aleksandr A. Lumpov⁵, Andrey B. Sinyukhin⁶, Igor V. Boykov⁷, Tamara E. Rameshvil⁷

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

²A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

³Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

⁴Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

⁵Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg, Russia

⁶Isotope, Saint-Petersburg, Russia

⁷Military Medical Academy named S.M. Kirov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Today, the treatment of cancer with the use of radiopharmaceuticals is a developing method all over the world. The preparation of the radiopharmaceuticals and its quality control prior to its administration to the patient is one of the important elements of nuclear medicine procedures. The instability of the compound can lead to a change in the distribution of the radionuclide in the patient's body, a decrease in the effectiveness of treatment, as well as to unjustified irradiation of healthy organs and tissues. The aim of this work was to estimate the absorbed doses in human organs and tissues during radionuclide therapy using ^{225}Ac for the case of the ^{225}Ac release. The absorbed doses were calculated for the model presented in ICRP Publication 141 for healthy people. This model consists of 18 cameras (blood, cortical volume, cortical surface, cortical red bone marrow, trabecular volume, trabecular surface, trabecular red bone marrow, kidneys (two chambers), bladder, liver (two chambers), gonads, contents of the small intestine, contents of the upper large intestine, soft tissues. Time-integrated activities were calculated using the specialized software SAAM II v2.3. The calculation of absorbed

Anna E. Petrova

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: anyapetrova2797@gmail.com

doses was performed using the IDAC-Dose 2.1 software. The highest absorbed doses were obtained for liver, testes, ovaries and red bone marrow, which leads to an increase in doses in these organs in comparison with doses from ^{225}Ac -PSMA up to a factor of two. A change in the biodistribution of ^{225}Ac in a patient's body, associated with the release of a radionuclide from the radiopharmaceuticals, can lead to an increase in doses in healthy radiosensitive organs and tissues, as well as to a decrease in the effectiveness of treatment.

Key words: ^{225}Ac ; radionuclide therapy; radiopharmaceuticals; absorbed doses in organs.

References

- Krylov VV. Radionuclide therapy in domestic oncology: successes, problems and prospects. *Povolzhskiy onkologicheskii vestnik = Povolzhsky oncological bulletin*. 2011;1: 59-61. (In Russian).
- Dauer LT, Mayer D. Applications of systematic error bounds to detection limits for practical counting. *Health Physics*. 1993;65: 89-91.
- McDevitt MR, Sgouros G, Finn RD, et al. Radioimmunotherapy with alpha-emitting nuclides. *European Journal of Nuclear Medicine*. 1998;25(9): 1341-1351.
- Müller C., van der Meulen N.P., Benešová M., Schibli R. Therapeutic radiometals beyond ^{177}Lu and ^{90}Y : production and application of promising α -particle, β -particle, and auger electron emitters // *Journal of Nuclear Medicine*. 2017. Vol. 58, № 2. P.91-96.
- Kratochwil C., Bruchertseifer F., Rathke H., et al. Targeted α -Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer with ^{225}Ac -PSMA-617: Dosimetry Estimate and Empiric Dose Finding // *Journal of Nuclear Medicine*. 2017. Vol. 58, № 10. P. 1624-1631.
- Stuparu AD, Meyer CAL, Evans-Axelsson SL, et al. Targeted alpha therapy in a systemic mouse model of prostate cancer – a feasibility study. *Theranostics*. 2020;10(6): 2612-2620.
- Nedrow R, Josefsson A, Park S, et al. Pharmacokinetics, microscale distribution, and dosimetry of alpha-emitter-labeled anti-PD-L1 antibodies in an immune competent transgenic breast cancer model. *EJNMMI Research*. 2017;7(57).
- Morgenstern A, Apostolidis C, Kratochwil C, et al. An Overview of Targeted Alpha Therapy with ^{225}Ac and ^{213}Bi . *Current Radiopharmaceuticals*. 2018;11: 200-208.
- Jurcic JG. Targeted alpha-particle therapy for hematologic malignancies. *Seminars in Nuclear Medicine*. 2020;50(2):152-161.
- McCleverty JA, Meyer TJ. Comprehensive Coordination Chemistry II. *Elsevier Science*; 2003. 1063 p.
- Kurtulus E, Benan K. Detailed chemistry studies of ^{225}Ac labeled radiopharmaceuticals. *Current Radiopharmaceuticals*. 2021.
- Deal KA, Davis IA, Mirzadeh S, Kennel SJ, et al. Improved in vivo stability of Actinium-225 macrocyclic complexes. *Journal of Medicinal Chemistry*. 1999;42(15): 2988-2992.
- ICRP Publication 141. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. *Ann. ICRP*. 2019; 48(2/3).
- Lassmann M, Nosske D. Dosimetry of ^{223}Ra -chloride: dose to normal organs and tissues. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2012;40(2): 207-212.
- ICRP Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. *Ann. ICRP*. 2018; 46(3/4).
- Barrett PH, Bell BM, Cobelli C, et al. SAAM II: simulation, analysis, and modeling software for tracer and pharmacokinetic studies. *Metabolism*. 1998;47(4): 484-492.
- Matveev VB, Markova AS. Radium-223 in the treatment of castration-resistant prostate cancer with bone metastases. *Onkourologiya = Oncology*. 2017;13(2): 140-147. (In Russian).
- Chipiga LA, Vodovatov AV, Petrova AE, Stanzhevsky AA. Analysis of ^{223}Ra -dichloride biodistribution models for assessing internal exposure doses. *Formuly farmatsii = Formulas of Pharmacy*. 2020;2(1): 54-69 (In Russian).
- Official Site of OriginLab: <https://www.originlab.com/demo-download.aspx> (Accessed July 20, 2021).
- Andersson M, Johansson L, Eckerman K, Mattsson S. IDAC-Dose 2.1, an internal dosimetry program for diagnostic nuclear medicine based on the ICRP adult reference voxel phantoms. *EJNMMI Research*. 2017;7(1).
- ICRP Publication 103. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*. 2007;37 (2-4).
- Sgouros G. Alpha-particles for targeted therapy. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2008;60(12): 1402-1406.
- ICRP Publication 92. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (w_R). *Ann. ICRP*. 2003;33 (4).
- MIRD Pamphlet No. 22 (Abridged): Radiobiology and dosimetry of α -particle emitters for targeted radionuclide therapy. *Journal of Nuclear Medicine*. 2010;51(2): 311-328.

Received: July 24, 2021

For correspondence: Anna E. Petrova – Junior Researcher, Information Analytical Center, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101; Russia. E-mail: anyapetrova2797@gmail.com)

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 of the Ministry of Health of the Russian Federation; docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of 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; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Andrey A. Stanzhevsky – M.D., Deputy Director for Research, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Dmitry N. Maystrenko – M.D., Director, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Aleksandr A. Lumpov – Head of laboratory of chemical and radiochemical analysis, Khlopin Radium Institute JSC, Saint-Petersburg, Russia

Andrey B. Sinyukhin – Head of the group of the development of the manufacture of the project office of JSC Isotop, Saint-Petersburg, Russia

Igor V. Boykov – M.D., Deputy Head of the Department of Radiology of the Military Medical Academy named S.M. Kirov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

Tamara E. Rameshvili – M.D., Professor of the Department of Radiology of the Military Medical Academy named S.M. Kirov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Petrova A.E., Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Stanzhevsky A.A., Maystrenko D.N., Lumpov A.A., Sinyukhin A.B., Boykov I.V., Rameshvili T.E. Estimation of absorbed doses in patients' organs from the released radionuclide-label during radionuclide therapy with ^{225}Ac . *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 1, P. 120-131. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-120-131

Правила для авторов журнала «Радиационная гигиена»

Правила для авторов составлены на основе «Белой книги Совета научных редакторов о соблюдении принципов целостности публикаций в научных журналах, 2012» (CSE's White Paper on Promotion Integrity in Scientific Journal Publications, 2012 Update) и «Рекомендаций по проведению, описанию, редактированию и публикации результатов научной работы в медицинских журналах, декабрь 2016» (ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, December 2016).

Принимаются оригинальные научные статьи на русском и английском языках, соответствующие профилю журнала «Радиационная гигиена» и отражающие результаты оригинальных научных исследований авторов, экспериментальные, теоретические статьи, обзоры, краткие сообщения, дискуссионные статьи, рецензии на работы по актуальным вопросам радиационной гигиены, писем в редакцию.

Работы для опубликования в журнале должны быть представлены в соответствии с данными требованиями:

- К опубликованию в журнале принимаются статьи на русском и английском языках. Если статья представлена на английском языке, обязательно нужно полностью дублировать ее и на русском языке. Обращаем Ваше внимание на качество английского текста!

- Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованы 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.

- Редакция имеет право вести переговоры с авторами по уточнению, изменению, сокращению рукописи.

- Редакция оставляет за собой право сокращать и редактировать представленные работы. Все статьи, поступающие в редакцию журнала, проходят двойное слепое рецензирование.

- 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 представлено 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. Все соавторы должны быть согласны с публикацией текущей версии статьи.

- Рукописи, оформленные не в соответствии с правилами, к дальнейшему рассмотрению не допускаются.

- Объем обзорных аналитических, исторических статей не должен превышать 40 страниц машинописного текста; оригинальных исследований – 25 страниц, дискуссионных статей – 10, кратких сообщений и заметок из практики – 10 страниц.

- Текст статьи печатается на одной стороне листа формата A4 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 безномера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

СТРУКТУРА СТАТЬИ

Титульный лист должен содержать:

- **название статьи** должно кратко (не более 10 слов) и точно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В него необходимо вложить как информативность, так и привлекательность, уникальность научного творчества автора. Не допускается использование сокращений и аббревиатур, а также торговых (коммерческих) названий приборов, медицинской аппаратуры и т.п.);

Приводится на русском и английском языках.

- **фамилия и инициалы автора(ов);**

- любые изменения в списке авторов после подачи статьи в редакцию должны быть одобрены всеми авторами.

Фамилии авторов нужно транслитерировать по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru.

- **наименование учреждений**, в которых работают авторы с указанием ведомственной принадлежности (Роспотребнадзор, Минздрав России, РАМН и т.п.), город, страна (при этом 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. **Указывается официально принятый английский вариант наименования организаций!**

- **Резюме.** После титульного листа размещается резюме статьи на русском и английском языках (объемом не менее 250 слов каждая). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

1. Введение (Introduction): ставится научная проблема и цель статьи.

2. Материалы и методы (Materials and Methods): даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

3. Результаты исследования (Results): приводятся конкретные авторские результаты исследования.

4. Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion): указываются практическая значимость и перспективы исследования.

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.** Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

Текст статьи

Текст оригинального научного исследования должен состоять из выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты исследования», «Обсуждение и заключение», «Литература».

Введение (Introduction) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности. Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье. При его написании автор прежде всего должен заявить общую тему исследования, обозначить проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме того, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы. Обзор литературы. Необходимо описать основные современные исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья. Желательно рассмотреть 20–40 источников и сравнить взгляды авторов; часть источников должна быть англоязычной. Важно провести сравнительный анализ с зарубежными публикациями по заявленной проблематике.

В разделе «**Материалы и методы**» (*Materials and Methods*) должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

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.

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.

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.

Результаты (Results). В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого – доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты желательно сопоставить с предыдущими работами в этой области, как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективности. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Также должно быть обосновано, почему для анализа были выбраны именно эти данные. Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

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) страныпроизводителя. Например: использовали спектрофотометр «СФ16» (Россия), спектрофлуориметр фирмы «Hitachi» (Япония). Малоупотребительные и узкоспециальные термины также должны быть расшифрованы.

Таблицы

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. Следует уточнить, какие параметры статистической вариативности оценивались, например, стандартное отклонение или стандартная ошибка среднего. Не следует дублировать данные, содержащиеся в таблице, в тексте статьи, в графиках или диаграммах.

Рисунки

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 рисунков 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.

Все названия, подписи и структурные элементы графиков, таблиц, схем и т. д. оформляются на русском и английском языках.

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion). Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде приводятся главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

В конце статьи должны быть размещены следующие данные:

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей. Наш журнал придерживается следующих критериев авторства, разработанных ICMJE и COPE:

- существенный вклад в разработку концепции или дизайна исследования; или сбор, анализ или интерпретация данных;
- написание текста статьи или ее редактирование для важного интеллектуального содержания;
- утверждение окончательного варианта статьи для публикации;
- согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы;
- иное.

Приводятся на русском и английском языках.

Благодарности. В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам. Приводятся на русском и английском языках.

Информация о конфликте интересов. В статье следует указать на реальный или потенциальный конфликт интересов. Если конфликта интересов нет, то следует написать, что автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Приводится на русском и английском языках.

Сведения об источнике финансирования.

Приводятся на русском и английском языках.

Список литературы

Рекомендуемое количество литературных источников: для оригинальных научных статей – не менее 25 источников, для лекций и обзоров – не более 60 источников, для других статей – не более 15 источников.

Ответственность за правильность изложения библиографических данных возлагается на автора.

В журнале используется Ванкуверский формат цитирования, который подразумевает ссылку на источник литературы в квадратных скобках и последующее упоминание источников в списке литературы и в порядке упоминания в тексте.

Прилагаются **два списка литературы.**

В первом списке литературы (Литература) библиографическое описание литературных источников должно соответствовать требованиям ГОСТа Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Необходимо правильно оформить ссылку на источник. Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

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, Rospotrebnadzor, 2011, 40 p. (In Russ.)]

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

Если имеется 3–4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые 3 автора, затем ставится «и др.».

Если в **монографии** на обложке указаны основные авторы, их всех следует указать, далее поставив и др.

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430–447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124–169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447–86.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553–98.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 46–52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25–26 октября 2007. М., 2007. С. 50–51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60–73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена, 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опублик. 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.

Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования

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].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

После списков литературы 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 на русском и английском языках, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов, идентификационный номер ORCID. Сокращения не допускаются.

ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В РЕДАКЦИЮ

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Направляя статью для публикации в данном журнале, авторы соглашаются со следующим:

- Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0) которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.
- Все авторы внимательно прочитали Этику научных публикаций журнала и с пониманием воспримут санкции за его нарушение.
- Авторы статьи принимают положения: «Авторское соглашение (публичная оферта) о публикации статьи в научном журнале «Радиационная гигиена».
- Согласно вступившей в действие IV части Гражданского кодекса РФ, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателю.

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка по электронной почте журнала в форме присоединенных файлов: journal@niirg.ru

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титальный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно указывайте номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикаций или фальсификации данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке исследовательских методов или результатов или недобросовестное поведение, не связанное с научным процессом.

Справки по телефону: (812)2334283 и (812)2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812)2335363, 2334283.