

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 17 № 4, 2024



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:

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.

По условиям лицензии Creative Commons
право на оригинал-макет и оформление
принадлежит журналу, авторское право
на статьи принадлежит авторам. Ссылка
на журнал «РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА»
обязательна.

Целью журнала является создание
широко-доступного информационного
поля для всех специалистов, связанных с
радиационной гигиеной и обеспечением
радиационной безопасности населения,
расширение сферы профессионального
диалога для российских и зарубежных
исследователей, работающих в этих и
смежных областях науки.

Задачи журнала:

- привлекать внимание к наиболее
актуальным, перспективным и интересным
направлениям научных исследований
по тематике журнала;
- вовлекать в журнал авторитетных
отечественных и зарубежных авторов,
являющихся специалистами высочайшего
уровня;
- расширять деятельность путем
повышения географического охвата
публикуемых материалов, редакционного
совета и редакционной коллегии, в том
числе из зарубежных стран.

Статьи в открытом доступе находятся
по адресу <https://www.elibrary.ru>
и по адресу <https://www.radhyg.ru/jour>

Адрес учредителя, издателя и 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

Журнал распространяется по подписке
Индекс для подписки в агентстве
«Книга-Сервис» - **Ф57988**
Стоимость годовой подписки – 3920 руб.

Подписано в печать 24.12.2024
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 18 печ.л.

Тираж 150 экз.
Отпечатано в типографии ООО «Амирит»
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, д. 88,
литер У

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

Научно-практический журнал

Основан в 2007 году и является первым и единственным
в Российской Федерации специализированным периодическим
изданием по вопросам радиационной гигиены и радиационной
безопасности населения

Издается ежеквартально.

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).

Представлен на платформах агрегаторов elibrary.ru, RUSED,
Google Scholar, Dimension, DOAJ (Directory of Open Access Journals),
VINITI RAN, РТБ и др. ([https:// www.radhyg.ru/jour](https://www.radhyg.ru/jour))



Том 17 № 4, 2024

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

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

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

Бузинов Роман Вячеславович — ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья», д.м.н., доцент, заслуженный врач Российской Федерации (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, член-корреспондент РАН (Обнинск, 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)

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

Софронов Генрих Александрович — ФГБНУ «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 Генриетта 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)

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

Горский Григорий Анатольевич — ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева», к.м.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)

Гребенюк Александр Николаевич — ФГБОУ ВО ПСПбГМУ им. И.П. Павлова Минздрава России, д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Ермолина Елена Павловна — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Минздрава России, к.м.н., доцент (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 & PUBLISHER

Federal budgetary institution of science
«Saint Petersburg Research Institute
of Radiation Hygiene after Professor
P.V. Ramzaev» Federal Service
for Surveillance on Consumer Rights
Protection and Human Wellbeing

The publication is registered by the Federal Service for Supervision over Compliance with Legislation in the Sphere of Mass Communications and Protection of Cultural Heritage. Registration certificate PI № FS77-28716 of July 6, 2007.

The journal is registered as an online edition by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technologies and Mass Communications. Registration certificate EL No. FS77-63702 was issued on November 10, 2015.

The aim of the Journal is to create a widely accessible information field for all specialists related to radiation hygiene and radiation safety of the population, to expand the sphere of professional dialog for Russian and foreign researchers working in these and related fields of science.

Objectives:

- to attract attention to the most relevant, promising and interesting areas of scientific research on the subject of the journal;
- to involve authoritative national and foreign authors, who are specialists of the highest level, to form a platform in the journal
- to strictly follow the principles of research and publication ethics, as well as open access to the content of the journal;
- to expand its publishing activities by increasing the geographical coverage of published materials, editorial board and editorial board, including international contributions.

Open Access articles are available
at <https://www.elibrary.ru>
and at <https://www.radhyg.ru/jour>

Under the terms of Creative Commons license the right to the original layout and design belongs to the journal, the copyright to the articles belongs to the authors. Reference to the Journal Radiation Hygiene is obligatory.

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

The journal is distributed by subscription
Index for subscription in the agency
“Book-Service” - F57988.

The cost of annual subscription – 3920 rubles.

RADIATION HYGIENE

Quarterly peer-reviewed scientific and practical journal

The Journal was founded in 2007 and is the first and only specialized periodical on issues of radiation hygiene and radiation safety of the population.

The Journal is included in the list of Russian peer-reviewed journals, in which the main scientific results for the degree of candidate and doctor of sciences should be published.

The journal is indexed in the multidisciplinary bibliographic and abstract database Scopus, Russian Index of Citation (RINC). It is represented on the platforms of aggregators elibrary.ru, RUSMED, Google Scholar, Dimensions, DOAJ (Directory of Open Access Journals), VINITI RAN, RGV, etc. (<https://www.radhyg.ru/jour>)



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)

Roman V. Buzinov — Federal Budgetary Scientific Facility "North-West Public Health Research Center", M.D., Docent, honorable physician of the Russian Federation (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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, Republic of Tajikistan)

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 Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, Russian Federation)

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

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

Genrikh A. Sofronov — Federal State Scientific Organization «Institute of Experimental Medicine», Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, M.D. (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, M.D., 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, M.D., Professor (Moscow, Russian Federation)

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

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

Grigoriy A. Gorskiy — Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Candidate of Medical Sciences (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

Aleksandr N. Grebenyuk — Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Pavlov First Saint Petersburg State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, 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, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

Vasiliy 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 Medical Sciences (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

Natalya I. Sanzharova — All-Russia Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, The Federal Agency for Scientific Organizations, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences (Obninsk, 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 17 № 4, 2024

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Рамзаев В.П., Репин В.С.

Накопление ^{137}Cs древесными растениями и съедобными грибами на месте проведения мирных ядерных взрывов «Тайга» 7

Капырина Ю.Н., Библин А.М., Водоватов А.В., Комиссаров М.И.

Информированность врачей по вопросам радиационной безопасности при проведении рентгеноэндоваскулярных диагностики и лечения 18

Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М., Седнев К.А., Зеленцова С.А. Архангельская Г.В.

Содержание трития в прибрежных водах Дальневосточных регионов Российской Федерации в первый год контролируемого сброса воды с АЭС «Фукусима-1» (Предварительные данные) 27

Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Богатырёва В.Ю.

Результаты индивидуального дозиметрического контроля кожи рук персонала, занятого при работе с радиофармацевтическими препаратами 35

ОБЗОРЫ

Горский Г.А., Романович И.К.

Радиационно-гигиенические аспекты аварийного реагирования на крупные радиационные аварии 43

Янишевская М.А., Блинова Е.А., Шишкина Е.А., Аклев А.В.

Полиморфизм гена *hOGG1* и предрасположенность к локальным новообразованиям у людей, подвергшихся длительному облучению с низкой мощностью дозы 55

ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Кормановская Т.А.

Итоги функционирования Федерального банка данных доз облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения в 2022–2024 гг. 68

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Юрков И.А., Изгagin В.С.

Оценка геогенного радонового потенциала с использованием активации адвективного потока воздуха из грунта..... 79

Баталов В.Р., Ишунина М.В., Ефимов А.В., Соколова А.Б.

Сравнительный анализ методов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и альфа-спектрометрии для измерения активности плутония в биосубстратах 88

САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Лихачева А.В., Библин А.М., Горский Г.А., Вишнякова Н.М.

Предложения по изменению подходов к реагированию на нештатные ситуации при медицинском облучении пациентов в рамках актуализации санитарно-эпидемиологического законодательства 96

CONTENTS

Vol. 17 № 4, 2024

RESEARCH ARTICLES

Ramzaev V. P., Repin V.S.

^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the «Taiga» peaceful nuclear explosions site15

Kapryina Yu.N., Biblin A.M., Vodovatov A.V., Komissarov M.I.

Awareness of interventional radiologists about radiation protection in medical exposure24

Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Biblin A.M., Sednev K.A., Zelentsova S.A., Arkhangelskaya G.V.

Tritium concentrations in coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation in the first year of controlled water discharge from the Fukushima-1 NPP (Preliminary results)32

Shleenkova E.N., Bazhin S.Yu., Bogatyreva V.Yu.

Results of individual dosimetric monitoring of the hands skin for personnel engaged in working with radiopharmaceuticals41

REVIEWS

Gorsky G.A., Romanovich I.K.

Radiation hygienic aspects of emergency response to major radiation accidents52

Yanishevskaya M.A., Blinova E.A., Shishkina E.A., Akleyev A.V.

Polymorphism of *hOGG1* gene and susceptibility to malignant neoplasms in people affected by long-term low dose rate exposure64

ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENE PASSPORTIZATION

Kormanovskaya T.A.

Results of functioning of the Federal databank of radiation doses to the population of the Russian Federation due to natural sources of ionizing radiation in 2022–202477

RADIATION MEASUREMENTS

Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Yurkov I.A., Izgagin V.S.

Assessment of geogenic radon potential with activation of advective soil air flow86

Batalov V.R., Ishunina M.V., Efimov A.V., Sokolova A.B.

Comparative analysis of inductively coupled plasma mass spectrometry and alpha spectrometry methods to measure plutonium activity in biosubstrates94

SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Likhacheva A.V., Biblin A.M., Gorsky G.A., Vishnyakova N.M.

Suggestions for amendments to responding approaches to events in medical exposure of patients within the updating sanitary and epidemiological legislation106

СОДЕРЖАНИЕ

Том 17 № 4, 2024

Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С.,
Сапрыкин К.А.

Новые методические рекомендации по радиационному
контролю и санитарно-эпидемиологической оценке
жилых, общественных и производственных зданий
и сооружений по показателям радиационной
безопасности. Часть 2 108

Громов А.В., Библин А.М., Седнев К.А., Ахматдинов Р.Р.

Радиационные аварии, связанные с нарушением
правил сбора и оборота лома черных и цветных
металлов, в Российской Федерации
в 2010–2023 гг. 117

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Дружинина П.С., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Солдатов И.В.,
Лантух З.А., Толкачев К.В.

Определение коэффициентов перехода
от произведения дозы на длину сканирования
к эффективной дозе для компьютерно-
томографических исследований всего тела
с захватом нижних конечностей пациента 126

ЮБИЛЕИ

Академик РАН УШАКОВ Игорь Борисович.
К 70-летию со дня рождения 135

НЕКРОЛОГ

Памяти Генриетты Владимировны Архангельской –
старейшего сотрудника ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева,
авторитетного ученого в области радиационной
гигиены (1931–2024) 138

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 140

CONTENTS

Vol. 17 № 4, 2024

Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Vasilyev A.S.,
Saprykin K.A.

New guidelines on radiation survey and sanitary
assessment of residential, public and industrial
buildings and facilities in terms of radiation safety
indicators. Part 2 115

Gromov A.V., Biblin A.M., Sednev K.A., Akhmatdinov R.R.

Radiation accidents associated with violation of rules
of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous
metal scrap in the Russian Federation
in 2010–2023 124

BRIEF REPORTS

Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Soldatov I.V.,
Lantukh Z.A., Tolkachev K.V.

Determination of the conversion coefficients
from the dose-length product to the effective dose
for CT-examinations of the whole body
including lower extremities 133

ANNIVERSARIES

Academician of the Russian Academy
of Sciences USHAKOV Igor Borisovich.
On the 70th anniversary of his birth 135

OBITUARY

In memory of Genrietta Vladimirovna Arkhangelskaya,
the most senior researcher at the Saint Petersburg
Research Institute of Radiation Hygiene named
after P.V. Ramzaev, and a distinguished scientist
in the field of radiation hygiene (1931–2024) 138

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 140

Накопление ^{137}Cs древесными растениями и съедобными грибами на месте проведения мирных ядерных взрывов «Тайга»

В.П. Рамзаев, В.С. Репин

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

В 1971 году в Пермском крае (Российская Федерация) был проведен одновременный подрыв трех термоядерных зарядов серии «Тайга» с целью изучения возможности применения ядерных взрывных технологий для создания канала Печора–Кама. В результате этих подземных взрывов на поверхность земли вместе с грунтом и породой были выброшены долгоживущие техногенные радионуклиды. Со временем на отвалах радиоактивно загрязненного грунта сформировалась новая лесная экосистема. Целью настоящей работы являлась оценка накопления ^{137}Cs в древесных видах растений и в съедобных грибах на отдаленном этапе (спустя 38 лет) после радиоактивного загрязнения окружающей среды. Определено содержание ^{137}Cs в органах березы (*Betula pubescens*), ели (*Picea abies*), осины (*Populus tremula*) и сосны (*Pinus sylvestris*), а также в плодовых телах грибов видов *Boletus edulis* (белый гриб), *Leccinum aurantiacum* (подосиновик), *Russula* (виды сыроежек) и *Suillus luteus* (масленок обыкновенный). Активность ^{137}Cs в образцах измеряли методом гамма-спектрометрии с использованием HPGe детектора. Значения удельной активности ^{137}Cs (на сухой вес) в пробах древесины, игл (1-го года)/листьев и грибов находились в диапазоне 0,5–6,8 Бк/кг, 54–112 Бк/кг и 212–3260 Бк/кг соответственно. Используя эти результаты и ранее опубликованные данные о плотности загрязнения почвы ^{137}Cs на объекте «Тайга», были вычислены значения агрегированного коэффициента перехода радионуклида в экологической паре почва–биота ($\text{кг}/\text{м}^2$). Установлено, что значения коэффициента перехода ^{137}Cs из почвы в биоту для всех исследованных видов на объекте «Тайга» являются крайне низкими по сравнению с теми, которые были оценены многими авторами для других мест радиоактивного загрязнения, в частности для территорий, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Обсуждены возможные причины малого накопления ^{137}Cs в биоте на объекте «Тайга».

Ключевые слова: древесные растения, съедобные грибы, ^{137}Cs , накопление, агрегированный коэффициент перехода, почва–биота, мирный ядерный взрыв, «Тайга».

Введение

Распределение и поведение радиоактивного цезия (в первую очередь ^{137}Cs , $T_{1/2} = 30,17$ года) в компонентах лесных экосистем к настоящему времени изучено достаточно подробно [1–6]. Наличие представительных натурных данных и разработанных на их основе моделей дает возможность прогнозировать (в определенной степени) уровни содержания ^{137}Cs в лесных ресурсах (например, в древесине и съедобных грибах) и оценивать вероятность их соответствия гигиеническим стандартам на территориях с известными уровнями загрязнения почвы радионуклидами [7–9]. В более широком смысле имеющиеся натурные данные и соответствующие модели позволяют давать обоснованные рекомендации о том, как безопасно (с радиологической точки зрения) вести лесохозяйственную деятельность на радиоактивно загрязненных территориях [7, 10]. Отметим, что подавляющая масса собранных экспериментальных данных, а также соответствующие обобщения и прогнозы относятся к ситуации выпадения радионуклидов из атмосферы (последствия ядерных взрывов различного назначения и радиационных аварий) на уже сформировав-

шиеся лесные экосистемы.

Помимо продолжения наблюдений за «старыми» лесными экосистемами, в настоящее время определенный интерес представляет исследование процессов миграции радионуклидов в молодых («новых») лесах, формирующихся на радиоактивно-загрязненной территории после момента выпадений радионуклидов на почву. Такого рода залесение происходит как естественным путем, так и в результате высадки саженцев древесных растений человеком [4, 10]. В частности, весьма пространственные места зарастания деревьями и кустарниками бывших земель сельскохозяйственного назначения (луга, пастбища, пахотные поля) можно обнаружить в зоне чернобыльского загрязнения в Беларуси, в России и на Украине [11–13]. Самостоятельное восстановление и формирование лесных экосистем описано для мест проведения мирных ядерных взрывов (МЯВ) «Кратон-3» [14, 15] и «Тайга» [16, 17] в России.

Экспериментальные данные и оценки, представленные по рассматриваемому вопросу в работах [18, 19], свидетельствуют о сравнительно низких коэффициентах перехода ^{137}Cs из почвы в растения в молодых сосновых лесах, посаженных после Чернобыльской аварии. Коэффициенты

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

перехода ^{137}Cs из почвы в съедобные грибы, собранные на участках, которые зарастали молодыми соснами и березами, также оказались во много раз меньше таковых в старых лесах, выросших до момента радиоактивных выпадений [19, 20]. Однако в целом особенности накопления ^{137}Cs в компонентах формирующихся новых лесных экосистем изучены явно недостаточно для составления обобщенных прогнозов и моделей по динамике радиоактивного загрязнения в таких лесах. Это касается характеристик почвенного покрова и видов деревьев, особенностей источника радиоактивного загрязнения, а также форм нахождения радионуклида в почве.

Цель исследования – оценка накопления ^{137}Cs в древесных видах растений и в съедобных грибах из нового леса, выросшего на месте проведения экскавационных МЯВ эксперимента «Тайга» (Пермский край, Россия).

Задачи исследования

1. Измерить удельную активность (УА, Бк/кг) ^{137}Cs в пробах биоты, отобранных на объекте «Тайга», и проверить их соответствие критериям радиационной безопасности;
2. Используя опубликованные данные по плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{cs} , Бк/м²) на объекте «Тайга», вычислить значения агрегированных коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в биоту (T_{ag} , м²/кг);

3. Сравнить значения T_{ag} , определенные в данном исследовании, с литературными данными.

Материалы и методы

Место обследования

Место обследования (61,30° с.ш., 56,60° в.д.) расположено на севере Пермского края. В 1971 г. в этом месте был проведен натурный эксперимент с целью определения целесообразности использования ядерных взрывных технологий для строительства канала Печора–Кама [21]. Три термоядерных заряда (мощность каждого 15 кт в тротиловом эквиваленте) были заложены на глубину 127 м под землей и одновременно подрваны. В результате взрывов произошел выброс горной породы и грунта и формирование неглубокого котлована, окруженного навалом грунта. В процессе взрыва произошло объемное загрязнение раздробленной породы и разрыхленного грунта техногенными радионуклидами, среди которых присутствовали долгоживущие ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{207}Bi , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am [22, 23]. В последующем котлован естественным образом заполнился водой, и образовалось озеро размером 700 м на 350 м. Довольно быстро берега озера на навале стали зарастать травянистыми и древесными растениями [21].

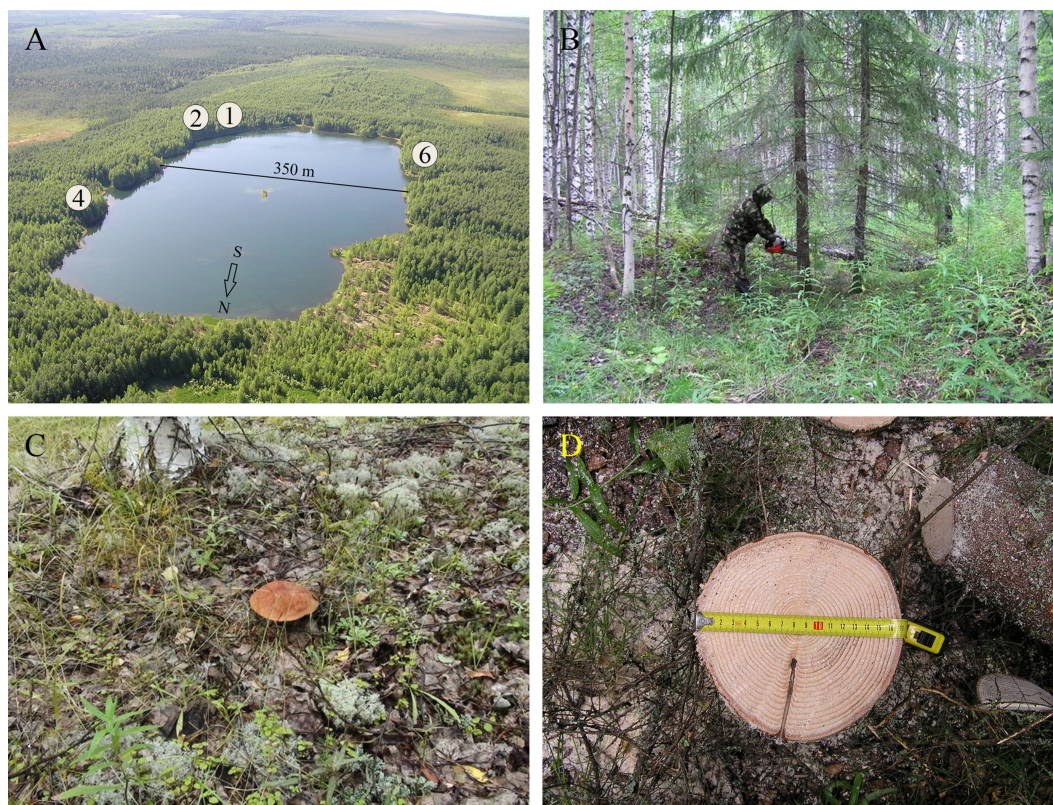


Рис. Место проведения МЯВ «Тайга» в августе 2009 г.: расположение пробных участков № 1, 2, 4, 6 (панель А, вид с вертолета с севера); общий вид участка № 2, спиливание выбранной ели (панель В); поверхность земли, покрытая подстилкой, лишайниками и мхами, и плодовое тело гриба подосиновика *Leccinum aurantiacum* (в центре) на участке № 1 (панель С); поперечный срез ствола ели *Picea abies*, спиленной на участке № 2 (панель D)

[Fig. The “Taiga” PNE site in August 2009: location of the sampled plots No. 1, 2, 4, 6 (panel A, a helicopter view from the north); a general view of plot No. 2, cutting down the selected spruce (panel B); the ground surface of plot No. 1 is covered by litter, lichens and mosses, and the fruiting body of the *Leccinum aurantiacum* mushroom is in the centre (panel C); a cross section of the trunk of the *Picea abies* tree cut down at plot No. 2 (panel D)]

Полевые исследования и отбор проб окружающей среды на объекте «Тайга» были выполнены в августе 2009 г. (через 38 лет после осуществления МЯВ «Тайга») в рамках совместной экспедиции, проведенной сотрудниками ФГУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и представителями Роспотребнадзора в Пермском крае [17]. Облет объекта на вертолете и подробное пешеходное обследование показали, что практически весь отвал покрыт древесными, кустарниковыми и травянистыми растениями (рис. А, В). Среди деревьев преобладающим видом была береза (*Betula pubescens*); кроме того, встречались ель (*Picea abies*), осина (*Populus tremula*) и сосна (*Pinus sylvestris*). Значительная часть поверхности почвы на навале была покрыта лесным опадом, лишайниками и мхами (рис. С). Также имелись участки оголенной почвы (преимущественно на северо-западном берегу озера). Плодовые тела различных видов съедобных грибов (например, подосиновики; рис. С) встречались во многих местах на территории объекта. Таким образом, к моменту нашего обследования на объекте «Тайга» сформировалась молодая лесная экосистема. Более подробно описание объекта дано в [17].

По данным дозиметрического обследования [17] мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения в воздухе варьировалась на объекте «Тайга» от 72 до 1540 нЗв/ч и в среднем составила 274 нЗв/ч. Среднее значение МАЭД на фоновых участках было почти в четыре раза меньше и оценивалось величиной 76 нЗв/ч. Отбор проб почвы (верхний слой толщиной 20 см) был проведен в шести разных местах навала [23], из которых четыре участка (№ 1, 2, 4 и 6) использовали для отбора проб биоты (рис. А). Значения плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A_{Cs}) на этих четырех участках находились в диапазоне 61–1020 кБк/м², что весьма существенно превышало величину этого показателя для фоновой территории (1,4 кБк/м²) [23].

Отбор проб биоты и их исследование в лаборатории

Отбор проб древесных растений был проведен на участке № 2 (рис. А), где были определены максимальные значения МАЭД (до 1540 нЗв/ч) и A_{Cs} (до 1020 кБк/м²) [17, 23]. В пределах данного участка было выбрано по од-

ному представительному экземпляру основных лесообразующих видов: береза, сосна, ель, осина. Измерения МАЭД были проведены на расстоянии около 0,5 м от ствола каждого из выбранных деревьев на высоте 1 м и 0,1 м с использованием дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121 (АТОМТЕХ, Беларусь). После валки деревьев проводили определение некоторых основных морфометрических характеристик спиленных деревьев (высоту, диаметр ствола), а также их возраста путем подсчета годичных колец на спиле (рис. D). Результаты измерений приведены в таблице 1. Затем со спиленных деревьев отбирали веточки с живыми листьями (береза, осина) и иглами (ель, сосна), а также сухие веточки. Из ствола на высоте 1 м и приблизительно на середине высоты дерева выпиливали секции длиной 0,5 м. При отборе проб особое внимание уделялось предотвращению загрязнения образцов от поверхности почвы. Пробы упаковывали в отдельные маркированные пакеты из плотного полиэтилена. Плодовые тела съедобных грибов отбирали в местах расположения четырех площадок отбора проб земли (рис. А). Контрольные (фоновые) пробы грибов были взяты из старого леса вблизи лагеря экспедиции, на расстоянии около 2-х километров к юго-западу от объекта «Тайга», т.е. в том месте, где были отобраны фоновые пробы почвы [23].

Предварительная разделка и просушка всех биопроб проходила в полевой лаборатории лагеря экспедиции. В частности, кора деревьев была отделена от древесины и разделена на внутренний и наружный слои. Иглы были разделены по возрасту: для сосны – 1-го, 2-го и 3-го года; для ели – 1-го года и более старые. Секции древесины стволов были распилены на диски толщиной 2,5 см. Опилки были аккуратно собраны на полиэтиленовый поддон и использованы для определения удельной активности ^{137}Cs в древесине в целом. Для изучения радиального распределения ^{137}Cs в стволе дерева использовали диски от секции с высоты 1 м. Были определены и отмечены фломастером слои возрастом 1–3, 4–8, 9–13 и >13 лет. Далее соответственно выделенным слоям от периферии к центру диска откалывали кусочки толщиной до 1 см. Грибы были измельчены ножом. Полученные сырые заготовки были взвешены.

Таблица 1

Биометрические характеристики исследованных деревьев и мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения в воздухе (МАЭД) на расстоянии 0,5 м от ствола дерева

[Table 1

Biometric characteristics of the sampled trees and ambient dose equivalent rate of gamma radiation in air (ADER) at a distance of 0.5 m from the tree trunk]

Вид растения [Plant species]	Возраст (год) [Age (year)]	Высота (м) [Height (m)]	Диаметр ствола (см)* [Trunk diameter (cm)*]	МАЭД (нЗв/ч)** [ADER (nSv/h)**]
Осина [Aspen] (<i>Populus tremula</i>)	34	20,5	24/22	1040/1260
Береза [Birch] (<i>Betula pubescens</i>)	28	16,5	21/19	900/1550
Сосна [Pine] (<i>Pinus sylvestris</i>)	31	13,5	26/22	850/1280
Ель [Spruce] (<i>Picea abies</i>)	31	14,3	17/16	840/980

* – в числителе приведено значение на высоте 0,3–0,4 м, в знаменателе – на высоте 1,3 м [* – the numerator shows the value at a height of 0.3–0.4 m, the denominator – at a height of 1.3 m].

** – в числителе приведено значение на высоте 1 м, в знаменателе – на высоте 0,1 м; статистическая неопределенность измерения не превышала 5% при вероятности 95% [** – the numerator shows the value at a height of 1 m, the denominator – at a height of 0.1 m; statistical uncertainty of the measurement did not exceed 5% (a 95% confidence level)].

В стационарной лаборатории пробы были высушены при комнатной температуре и взвешены. Измерение активности ^{137}Cs проводили с использованием полупроводникового гамма-спектрометра по методике, описанной в работе [23]. Способность биоты накапливать ^{137}Cs оценивали с использованием агрегированного коэффициента перехода (T_{ag} , $\text{м}^2/\text{кг}$), который представляет собой отношение удельной активности радионуклида в пробе биоты ($\text{Бк}/\text{кг}$) к плотности загрязнения почвы радионуклидом ($\text{Бк}/\text{м}^2$) в месте отбора пробы [2].

Результаты и обсуждение

^{137}Cs в древесных растениях

Результаты измерений УА ^{137}Cs в изученных органах деревьев приведены в таблицах 2 и 3. Значения УА находились в диапазоне от $<0,4$ $\text{Бк}/\text{кг}$ до 112 $\text{Бк}/\text{кг}$. Этот разброс в основном связан с неравномерностью распределения радионуклида по органам деревьев. Максимальные значения УА были найдены в физиологически активных компонентах – листьях и иглах текущего года, а минимальные – в древесине. Для сосны, ели и березы УА ^{137}Cs в наружной коре была меньше, чем таковая во внутренней коре. Для сосны эти различия были почти 6-кратными. Для осины такой разницы между наружным и внутренним слоем обнаружено не было. Распределение ^{137}Cs в древесине по высоте было достаточно равномерным у всех видов. Радиальное распределение ^{137}Cs в древесине было неравномерным: во всех случаях наибольшая УА была зарегистрирована в самых молодых периферических кольцах (табл. 3).

Отбор проб древесных растений на объекте «Тайга» был осуществлен спустя 38 лет после момента радиоактивного загрязнения окружающей среды, т.е. в тот отдаленный период, когда можно ожидать сравнительно устоявшегося переноса радионуклидов внутри экосистемы, поэтому наши результаты о накоплении ^{137}Cs в различных компонентах деревьев следует сравнивать с теми опубликованными данными, которые имеют отношение именно к отдаленному периоду после радиоактивных выпадений, хотя источник загрязнения может быть другим.

Такое сопоставление показывает, что в целом результаты наших исследований, свидетельствующих о неравномерности накопления ^{137}Cs в разных компонентах древесных растений, разумно соответствуют закономерностям, обнаруженным при исследовании взрослых деревьев этих же четырех видов в зоне чернобыльского загрязнения в Беларуси: наиболее загрязненной является крона, менее загрязнена кора, и наименее загрязненной является древесина [7]. Полученные нами результаты о содержании ^{137}Cs в различных компонентах сосны с объекта «Тайга» также хорошо согласуются с данными А.И. Щеглова и др. [24], которые установили, что для данного вида взрослых деревьев в зоне чернобыльского загрязнения характерен следующий ряд интенсивности накопления радионуклида: «хвоя текущего года > внутренние слои коры > ветви мелкие > хвоя прошлых лет формирования > ветви крупные > наружные слои коры > древесина». Сопоставимое распределение ^{137}Cs выявлено при изучении молодых сосен, выросших после Чернобыльской аварии в Брянской области России [1, 18, 19]. Для надземной части молодых берез из зоны чернобыльского загрязнения в Брянской области накопление ^{137}Cs убывало в ряду: листья – кора – древесина

[1, 18], что совпадало с вариацией накопления радионуклида в органах березы с объекта «Тайга».

Радиальное распределение ^{137}Cs в древесине сосны и березы с объекта «Тайга» (максимум на периферии диска) соответствовало той картине, которую приводят авторы работ [18, 25] для 10–11-летних деревьев из зоны чернобыльского загрязнения в Брянской области. Вместе с тем Holiaka et al. [9] не выявили определенной тенденции при исследовании радиального распределения ^{137}Cs в древесине 15–17-летних сосен из украинской части 30-км зоны отчуждения вокруг Чернобыльской АЭС. Распределение ^{137}Cs в древесине молодых берез (возраст 8–19 лет) из этой же зоны также варьировалось: только в двух деревьях из шести отмечено нарастание УА радионуклида к периферии [9].

Значения агрегированного коэффициента перехода ^{137}Cs (табл. 2) в компонентах деревьев с объекта «Тайга» варьировались от $4,5 \times 10^{-7}$ (древесина ели на высоте 1 м) до $1,1 \times 10^{-4}$ (иглы первого года у сосны). Все полученные значения T_{ag} в отношении сосны, ели и березы для физиологически активных частей деревьев (листья, иглы) и древесины были меньше нижних границ диапазонов T_{ag} , указанных для данных видов деревьев в справочнике МАГАТЭ [2] (табл. 4). Оценки МАГАТЭ в основном базируются на данных, полученных при изучении последствий Чернобыльской аварии. Какие-либо оценки T_{ag} для осины в документе [2] не приводятся, и для сравнения мы использовали данные из работ [3, 7], выполненных при исследовании взрослых деревьев после Чернобыльской аварии. Данные таблицы 4 свидетельствуют о том, что T_{ag} (^{137}Cs) для осины на объекте «Тайга» существенно (на 2–3 порядка величины) ниже по сравнению с таковым для деревьев данного вида из мест, загрязненных чернобыльскими выпадениями.

Столь небольшое накопление ^{137}Cs в деревьях на объекте «Тайга» может быть связано, во-первых, с отсутствием первичного аэрального загрязнения растения радионуклидом, что обязательно имеет место в случае выпадений радионуклидов из атмосферы на уже существующие лесные экосистемы [2, 5]. Остаточное загрязнение, связанное с данным механизмом, прослеживается во взрослых деревьях через много лет после момента выпадений [3]. Вторым фактором влияния могут быть особенности форм нахождения радионуклида в почве. По данным работ [26, 27], часть запаса ^{137}Cs в почве на объекте «Тайга» присутствует в крупных твердых включениях (частицах), имеющих стекловидную основу. Показано [27], что при воздействии концентрированной соляной кислотой на стекловидную частицу и мелкодисперсную фракцию почвы прочность удержания радионуклида ^{137}Cs частицей была намного выше, чем почвой. Еще одним фактором влияния может быть вертикальное распределение ^{137}Cs в профиле почвы. Данное распределение на участке № 2 на объекте «Тайга» имеет весьма равномерный характер [23], в то время как для старых лесов, загрязненных ^{137}Cs после Чернобыльской аварии, даже в отдаленном периоде (20 лет и более), основная часть запаса радионуклида сосредоточена в верхних 10 см [28]. О потенциальной значимости этого фактора свидетельствуют работа [19], которая показала, что коэффициенты перехода ^{137}Cs в молодые сосны, выросшие на поле, многократно перепаханном после аварии, были на порядок ниже таковых для молодых сосен из старого леса.

Таблица 2

Удельная активность (УА, на сухой вес) ^{137}Cs в компонентах древесных растений и агрегированный коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растение (T_{ag}) на участке № 2 ($A_{\text{cs}} = 1020 \text{ kBq/m}^2$) объекта «Тайга».

Статистическая неопределенность измерения УА ^{137}Cs (CH) приведена в процентах на уровне 1 сигма

[Table 2]

Activity concentration (AC, dry weight) of ^{137}Cs in components of woody plants, and the soil-to-plant aggregated transfer coefficient for ^{137}Cs (T_{ag}) at Plot 2 ($A_{\text{cs}} = 1020 \text{ kBq/m}^2$) of the “Taiga” site.

The statistical uncertainty of the ^{137}Cs AC measurement (SU) is provided in percent at 1 sigma level]

Вид пробы [Sample type]	УА ^{137}Cs (Бк/кг) [^{137}Cs AC (Bq/kg)]	CH (%) [SU (%)]	T_{ag} ($\text{m}^2/\text{кг}$) [T_{ag} (m^2/kg)], $\times 10^{-6}$
<i>Осина [Aspen]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	5,7	11	5,6
древесина – 12 м [wood – 12 m]	6,8	9,8	6,7
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	68,6	2,4	67
кора наружная – 12 м [outer bark – 12 m]	75,7	2,3	74
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	62,7	3,5	62
кора внутренняя – 12 м [inner bark – 12 m]	67,9	3,3	67
листья [leaves]	86,7	2,1	85
веточки живые [live twigs]	61,1	3,4	60
веточки сухие [dry twigs]	9,8	7,3	9,6
<i>Береза [Birch]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	4,5	9,8	4,4
древесина – 9 м [wood – 9 m]	5,9	8,8	5,8
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	6,3	11	6,2
кора наружная – 9 м [outer bark – 9 m]	2,4	9,4	2,3
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	18,9	6,2	18
кора внутренняя – 9 м [inner bark – 9 m]	21,3	4,1	21
листья [leaves]	57,2	3,7	56
веточки живые [live twigs]	30,9	4,0	30
веточки сухие [dry twigs]	12,3	4,9	12
<i>Сосна [Pine]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	2,6	11	2,5
древесина – 6 м [wood – 6 m]	3,6	12	3,5
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	5,8	9,2	5,7
кора наружная – 6 м [outer bark – 6 m]	3,4	22	3,3
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	32,4	6,1	32
кора внутренняя – 6 м [inner bark – 6 m]	21,2	5,7	21
иглы 1-го года [1st year needles]	112	2,2	110
иглы 2-го года [2nd year needles]	17,8	7,0	17
иглы 3-го года [3rd year needles]	9,3	8,6	9,1
веточки живые [live twigs]	22,8	8,2	22
веточки сухие [dry twigs]	7,3	8,8	7,2
<i>Ель [Spruce]</i>			
древесина – 1 м [wood – 1 m]	0,47	20	0,45
древесина – 7 м [wood – 7 m]	0,61	15	0,59
кора наружная – 1 м [outer bark – 1 m]	6,4	9,4	6,3
кора наружная – 7 м [outer bark – 7 m]	4,8	16	4,7
кора внутренняя – 1 м [inner bark – 1 m]	7,3	6,0	7,2
кора внутренняя – 7 м [inner bark – 7 m]	11,3	5,8	11
иглы 1-го года [1st year needles]	54,7	2,3	54
иглы ≥ 2 -го года [≥ 2 nd year needles]	15,3	7,7	15
веточки живые [live twigs]	22,2	3,8	22
веточки сухие [dry twigs]	7,9	8,6	7,7

Таблица 3

Удельная активность (УА, сухой вес) ^{137}Cs в годовых кольцах древесины ствола дерева на высоте 1 м на объекте «Тайга». В скобках приведена статистическая неопределенность измерения в процентах на уровне 1 сигма

[Table 3]

Activity concentration (AC, dry weight) of ^{137}Cs in annual rings of wood of the tree trunk at a height of 1 m at the "Taiga" site. The statistical uncertainty of the measurement is given in brackets in percent at 1 sigma level]

Возраст колец (год) [Age of rings (year)]	УА ^{137}Cs (Бк/кг) [^{137}Cs AC (Bq/kg)]			
	Осина [Aspen]	Береза [Birch]	Сосна [Pine]	Ель [Spruce]
1–3	12,4 (4,8)	9,5 (5,0)	4,6 (5,8)	0,71 (11)
4–8	3,9 (8,5)	2,4 (12)	2,0 (7,7)	<0,4
9–13	4,4 (8,4)	2,6 (11)	3,0 (7,0)	<0,4
>13	7,2 (6,4)	3,7 (7,3)	1,4 (15)	<0,4

Таблица 4

Агрегированные коэффициенты перехода (Tag) ^{137}Cs для листьев/игл и древесины по данным нашего исследования и данным литературы

[Table 4]

Aggregated transfer coefficients (T_{ag}) for ^{137}Cs in leaves/needles and wood according to our study and literature data]

Вид растения [Plant species]	T_{ag} (m^2/kg) [T_{ag} (m^2/kg)]			
	Листья/иглы [Leaves/needles]		Древесина [Wood]	
	Это исследование [This study]	Данные литературы [Literature data]	Это исследование [This study]	Данные литературы [Literature data]
Осина [Aspen]	$8,5 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-3}$ [3]; $1,4 \times 10^{-2}$ [7]*	$(5,6-6,7) \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-4}$ [3]; $2,1 \times 10^{-3}$ [7]
Береза [Birch]	$5,6 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-3}-3,0 \times 10^{-2}$ [2]	$(4,4-5,8) \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-4}-3,8 \times 10^{-3}$ [2]
Сосна [Pine]	$9,1 \times 10^{-6}-1,1 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}-9,2 \times 10^{-2}$ [2]	$(2,5-3,5) \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-4}-2,1 \times 10^{-2}$ [2]
Ель [Spruce]	$(1,5-5,4) \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-4}-5,2 \times 10^{-2}$ [2]	$(4,5-5,9) \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-4}-3,9 \times 10^{-3}$ [2]

* – крона дерева [the tree crown].

По показателю УА ^{137}Cs древесина (хозяйственно значимая часть дерева) изученных древесных растений с объекта «Тайга» не превышает допустимый по ОСПОРБ-99/2010 (п. 3.11.3)¹ уровень в 100 Бк/кг, ниже которого продукция может использоваться без каких-либо ограничений. Однако следует учитывать, что и другие радионуклиды (например, ^{90}Sr) могут накапливаться в древесных растениях на объекте «Тайга» [16], поэтому окончательное решение (рекомендации) по использованию таких материалов с этого объекта следует принимать после дополнительных радиометрических исследований.

^{137}Cs в съедобных грибах

Значения УА ^{137}Cs в грибах, собранных на контрольной территории вблизи лагеря экспедиции, варьировались в узком диапазоне от 19 до 25 Бк/кг (табл. 5). Значения УА ^{137}Cs в грибах с объекта «Тайга» были более чем на порядок величины выше фоновых значений и находились в диапазоне: 220–3260 Бк/кг. Превышение допустимого уровня содержания ^{137}Cs в грибах (2500 Бк/кг на сухой вес, согласно СанПиН 2.3.2.1078-01²) было обнаружено только для одной пробы. О значениях УА ^{137}Cs , не превышающих гигиенический норматив, сообщают А.А. Лурье [16]

(до 213 Бк/кг) и Gedeonov et al. [22] (340 ± 20 Бк/кг), которые проводили отбор проб грибов на объекте «Тайга» в 1998 г.

Хотя УА ^{137}Cs в грибах с объекта «Тайга» была многократно выше, чем таковая на фоновой территории, интенсивность перехода радионуклида из почвы в грибы (показатель T_{ag}) оказалась на порядок величины ниже на объекте по сравнению с фоном (табл. 5, 6). Кроме того, (табл. 6), значения T_{ag} ^{137}Cs для отдельных видов грибов на объекте «Тайга» были на уровне (либо даже меньше) нижних границ диапазонов T_{ag} , приведенных в рекомендациях МАГАТЭ (табл. 6) для предсказания накопления радионуклидов в грибах в природных экосистемах [2]. Низкие значения T_{ag} для ^{137}Cs на объекте «Тайга» в грибах, так же, как и в деревьях, могут быть связаны с особенностями формирования радионуклида в почве [26, 27]. Определенную роль может играть равномерное вертикальное распределение радионуклида в почве. Например, для зоны чернобыльского загрязнения показано, что интенсивность перехода ^{137}Cs (T_{ag}) из почвы в съедобные грибы видов *Leccinum* и *Suillus* в молодом лесу, выросшем на поле, многократно перепаханном после аварийного загрязнения, была на порядок ниже таковой в старом лесу [19].

¹ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

² Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01; Доп. и изм. 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01. [Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products. SanPiN 2.3.2.1078-01; Add. and rev. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01. (In Russ.)]

Таблица 5

Удельная активность (УА, на сухой вес) ^{137}Cs в съедобных грибах и агрегированный коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в грибы ($T_{\text{аг}}$) на контрольной (фоновой) территории и на участках объекта «Тайга».
Статистическая неопределенность измерения УА ^{137}Cs (CH) приведена в процентах на уровне 1 сигма.
Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs ($A_{\text{с}}$) приведена по данным работы [23]

[Table 5]

Activity concentration (AC, dry weight) of ^{137}Cs in the edible mushrooms, and the soil-to-mushrooms aggregated transfer coefficient for ^{137}Cs ($T_{\text{аг}}$) at the background site and at the «Taiga» site.
The statistical uncertainty of the ^{137}Cs AC measurement (SU) is provided in percent at 1 sigma level.
The density of soil contamination by ^{137}Cs ($A_{\text{с}}$) is taken from the study [23]

Код участка [Code of plot]	$A_{\text{с}}$ (кБк/м ²) [$A_{\text{с}}$ (kBq/m ²)]	Вид [Species]	УА ^{137}Cs (Бк/кг) [AC of ^{137}Cs (Bq/kg)]	CH (%) [SU (%)]	$T_{\text{аг}}$ (м ² /кг) [$T_{\text{аг}}$ (m ² /kg)]
Фоновая территория [Background site]					
Vas	1,34	Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	24,8	6,5	$1,9 \times 10^{-2}$
Vas	1,34	Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	19,0	5,1	$1,4 \times 10^{-2}$
Vas	1,34	Белый [<i>Boletus edulis</i>]	19,5	4,5	$1,5 \times 10^{-2}$
Объект «Тайга» [The «Taiga» site]					
1	269	Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	275	2,5	$1,0 \times 10^{-3}$
1	269	Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	595	3,5	$2,2 \times 10^{-3}$
2	1020	Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	938	2,2	$9,2 \times 10^{-4}$
2	1020	Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	418	0,7	$4,1 \times 10^{-4}$
4	901	Масленок [<i>Suillus sp.</i>]	3260	1,4	$3,6 \times 10^{-3}$
6	61,1	Белый [<i>Boletus edulis</i>]	217	3,6	$3,6 \times 10^{-3}$

Таблица 6

Агрегированные коэффициенты перехода ($T_{\text{аг}}$) ^{137}Cs для съедобных грибов по данным нашего исследования и по данным литературы

[Table 6]

Aggregated transfer coefficients ($T_{\text{аг}}$) for ^{137}Cs in the edible mushrooms according to our study and literature data

Вид [Species]	$T_{\text{аг}}$ (м ² /кг) [$T_{\text{аг}}$ (m ² /kg)]		
	«Тайга», это исследование [«Taiga», this study]	Фон, это исследование [Background, this study]	Данные литературы [2] [Literature data [2]]
Подосиновик [<i>Leccinum sp.</i>]	$9,2 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-4} - 1,1$
Сыроежка [<i>Russula sp.</i>]	$4,1 \times 10^{-4} - 2,2 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2} - 4,2$
Белый [<i>Boletus edulis</i>]	$3,6 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-3} - 1,4$
Масленок [<i>Suillus sp.</i>]	$3,6 \times 10^{-3}$	Не отобрано [Not sampled]	$7 \times 10^{-2} - 3,0$

Заключение

Изучено накопление ^{137}Cs деревьями и съедобными грибами в лесной экосистеме, сформировавшейся через 38 лет после проведения трех экскавационных термоядерных взрывов серии «Тайга». Установлено, что значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в биоту на объекте «Тайга» являются крайне низкими по сравнению с теми, которые были оценены многими авторами для других мест радиоактивного загрязнения, в частности для территорий, загрязненных ^{137}Cs в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Одним из факторов, который может определять столь низкую интенсивность перехода радионуклида из почвы в биоту, является то, что часть запаса ^{137}Cs в почве на объекте «Тайга» присутствует в крупных твердых включениях (частицах), имеющих стекловидную основу. В целом уровни

загрязнения ^{137}Cs изученных биопроб с объекта «Тайга» оказались намного ниже гигиенических нормативов. Лишь для одной пробы грибов гигиенический норматив был превышен.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

В.П. Рамзаев – концептуализация, отбор проб, измерения, написание рукописи.

В.С. Репин – концептуализация, отбор проб, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы выражают признательность бывшим сотрудникам ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева А. Медведеву, Е. Храмцову и В. Яковлеву, а также сотрудникам Роспо-

требнадзора в Пермском крае М. Драчеву и Д. Муравьеву за помощь в отборе проб на объекте «Тайга». Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за ценные замечания, которые позволили улучшить качество статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа в части написания и редактирования рукописи выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование и развитие методов мониторинга объектов окружающей среды в районах проведения мирных ядерных взрывов. Радиационно-гигиеническая характеристика источников питьевого водоснабжения».

Литература

- Fesenko S.V., Soukhova N.V., Sanzharova N.I. et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs in forest trees following the Chernobyl accident // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001. Vol. 40. P. 105–113.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series No. 472. IAEA, Vienna. 2010.
- Малюта О.В., Конаков Д.Е., Гончаров Е.А. Радиоэкологические исследования лесных экосистем Среднего Поволжья // *Лесной журнал*. 2010. № 4. С. 132–138.
- Раздайков А.Н., Марадудин И.И., Радин А.И., Ромашкин Д.Ю. Радиоэкологические проблемы в лесах России // *Лесохозяйственная информация. Электронный сетевой журнал*. 2019. № 3. С. 116–133. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.10 (Дата обращения: 27.06.2024).
- Ota M., Koarashi J. Contamination processes of tree components in Japanese forest ecosystems affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident ^{137}Cs fallout // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 816. P. 151587.
- Evrard O., Clergue T.C., Chaboche P.A. et al. Research and management challenges following soil and landscape decontamination at the onset of the reopening of the Difficult-To-Return Zone, Fukushima (Japan) // *Soil*. 2023. Vol. 9, No. 2. P. 479–497.
- Турлай И.В., Чернушевич Г.А., Перетрухин В.В., Терешко В.В. Радиоактивное загрязнение древесины Чернобыльской зоны // *Лесной журнал*. 2001. № 2. С. 25–29.
- Кадука М.В., Шутов В.Н., Брук Г.Я., Балонов М.И. Роль физико-химических свойств почвы в формировании радиоактивного загрязнения грибов // *Радиационная гигиена*. 2008. Т. 1, № 1. С. 32–35.
- Holiaka D., Yoschenko V., Cherniaev O.R. et al. Variability of activity concentrations and radial distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr in trunk wood of Scots pine and Silver birch // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023. Vol. 263. P. 107186.
- Jouve A., Tikhomirov F.A., Grebenkov A. et al. Management of contaminated forests. In: Karaoglou A., Desmet G., Kelly G.N., Menzel H.G. (Eds.). *The Radiological Consequences of the Chernobyl accident. Proceedings of the First International Conference*. Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. P. 389–400.
- Шубина О.А., Титов И.Е., Кречетников В.В., Санжарова С.И. Вопросы возвращения в хозяйственное использование территорий, временно выведенных из землепользования после аварии на ЧАЭС. «Актуальные вопросы радиоэкологии». Труды Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии». Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск, 2018. С. 99–119.
- Hostert P., Kuemmerle T., Prishchepov A. et al. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl // *Environmental Research Letters*. 2011. Vol. 6. P. 045201.
- Matsala M., Bilous A., Myroniuk V. et al. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster // *Forests*. 2021. Vol. 12. P. 1024.
- Koroleva T., Petrovsky V., Khitun O. Disturbance and recovery of vegetation at the sites of nuclear accidents in Arctic Yakutia. In: *Proceedings from Kalmar ECO-TECH'07: Technologies for Waste and Wastewater Treatment, Energy from Waste, Remediation of Contaminated Sites, Emissions Related to Climate*. November 26–28, 2007. Kalmar, Sweden. 2007. P. 607–615.
- Ramzaev V., Mishin A., Golikov V. et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009. Vol. 100. P. 1092–1099.
- Лурье А.А. Радиологическое исследование последствий ядерных взрывов с выбросом грунта на севере Пермской области. Часть 2. Радионуклиды в биосфере // *АНРИ*. 2002. № 3. С. 27–33.
- Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site: Site description and *in situ* measurements // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011. Vol. 102. P. 672–680.
- Fogh C.L., Andersson K.G. Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia // *Science of the Total Environment*. 2001. Vol. 269. P. 105–115.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В., Некрасов В.А. Радиационная обстановка в молодом сосновом лесу, выросшем после Чернобыльской аварии // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 1. С. 40–51.
- Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Оценка вторичного радиоактивного загрязнения деактивированного земельного участка, расположенного на территории зоны отдыха в лесистой местности // *Радиационная гигиена*. 2023. Т. 16, № 2. С. 52–64.
- 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.
- Gedeonov A.D., Petrov E.R., Savopulo M.I., Shkroev V.Y. Plutonium-239, 240, plutonium-238 and γ -emitting radionuclides in environmental samples near peaceful underground nuclear explosion site «Taiga» (European North-East Russia). In: Borretzen P., Jolle T., Strand P. (Eds.). *Proceedings from the International Conference on Radioactivity in the Environment*, September 1–5, 2002, Monaco. 2002.
- Ramzaev V., Repin V., Medvedev A. et al. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 109. P. 1–12.
- Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Касацкий А.А. Динамика загрязнения ^{137}Cs различных компонентов лесных экосистем Брянского Полесья // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2014. № 3. С. 17–22.

25. Soukhova N.V., Fesenko S.V., Klein D. et al. ^{137}Cs distribution among annual rings of different tree species contaminated after the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity. 2003. Vol. 65. P. 19–28.
26. Рамзаев В.П., Репин В.С. Радиоактивные стекловидные включения в почве, отобранной на месте проведения мирных подземных ядерных взрывов проекта «Тайга», Пермский край, Россия // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 148–159.
27. Рамзаев В.П., Репин В.С. Удельная активность ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am в просеянной почве и почвенных включениях с места проведения мирных ядерных взрывов «Тайга» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 79–92.
28. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Варфоломеева К.В. Вертикальное распределение ^{137}Cs в дерново-подзолистой песчаной почве на лугах и в лесах Брянской области в 2015–2016 гг. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 27–41.

Поступила: 10.06.2024

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

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, руководитель отдела здоровья, 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

Для цитирования: Рамзаев В.П., Репин В.С. Накопление ^{137}Cs древесными растениями и съедобными грибами на месте проведения мирных ядерных взрывов «Тайга» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-7-17

^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the «Taiga» peaceful nuclear explosions site

Valery P. Ramzaev, Viktor S. Repin

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

*In 1971 in the Perm region (the Russian Federation), three thermonuclear charges of the “Taiga” series were simultaneously detonated in order to test nuclear explosive technologies for creation of the Pechora–Kama canal. As a result of the underground explosions, long-lived technogenic radionuclides were released onto the surface of the earth along with soil and rock. Over time, a new forest ecosystem formed on the mound of the radioactively contaminated ground. The purpose of this study was to assess the ^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the “Taiga” underground nuclear explosions site at a remote stage (38 years) after radioactive contamination of the environment. Content of ^{137}Cs was determined in organs of birch (*Betula pubescens*), spruce (*Picea abies*), aspen (*Populus tremula*), and pine (*Pinus sylvestris*), as well as in the fruiting bodies of mushrooms of the species *Boletus edulis*, *Leccinum aurantiacum*, *Russula*, and *Suillus luteus*. The activities of ^{137}Cs in the samples were measured by gamma-ray spectrometry using a HPGe detector. The values of ^{137}Cs activity concentration (on a dry weight basis) in the samples of wood, leaves/needles (1st year), and mushrooms were in the ranges of 0.5–6.8 Bq/kg, 54–112 Bq/kg, and 212–3260 Bq/kg, respectively. Aggregated transfer coefficients (kg/m^2) for the radionuclide in the biota species were calculated using these results and previously reported data on the density of soil contamination by ^{137}Cs at the “Taiga” site. It has been found that the transfer coefficients of ^{137}Cs from soil to biota for all studied species at the “Taiga” site are abnormally low compared to those obtained by many authors for other places of radioactive contamination, in particular for the areas contaminated by ^{137}Cs as a result of the Chernobyl accident. Possible reasons for the low accumulation of ^{137}Cs in the biota at the “Taiga” site are discussed.*

Key words: woody plants, edible mushrooms, ^{137}Cs , accumulation, aggregated transfer coefficient, soil–biota, peaceful nuclear explosion, “Taiga”.

Valery P. Ramzaev

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

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

Authors' personal contribution

Ramzaev V.P. – conceptualization, sampling, measurements, writing the manuscript.

Repin V.S. – conceptualization, sampling, editing the manuscript.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to former employees of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev A. Medvedev, E. Khramtsov, and V. Yakovlev, as well as to employees of the Rospotrebnadzor branch in the Perm region M. Drachev and D. Muravyov for assistance in sampling at the “Taiga” site. The authors thank two anonymous reviewers for their constructive comments that improved the quality of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The article was written within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025: «Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia» on the topic: «Improving and developing methods for monitoring of environmental media in areas where peaceful nuclear explosions were performed. Radiation-hygienic characteristics of sources of drinking water supply».

References

- Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ^{137}Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.
- IAEA – International Atomic Energy Agency. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Technical Report Series No. 472. IAEA, Vienna; 2010.
- Malyuta OV, Konakov DE, Goncharov EA. Radioecological studies of forest ecosystems in Middle Povolzhje. *Lesnoy zhurnal = Forest Journal*. 2010;(4): 132–138 (In Russian).
- Razdaivodin AN, Maradudin II, Radin AI, Romashkin DYU. Radioecological problems in Russian forests. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya. Elektronnyy setevoy zhurnal = Forestry Information. Electronic Online Journal*. 2019;(3): 116–133. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.10 (Accessed: June 27, 2024) (In Russian).
- Ota M, Koarashi J. Contamination processes of tree components in Japanese forest ecosystems affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident ^{137}Cs fallout. *Science of the Total Environment*. 2022;816: 151587.
- Evrard O, Clergue TC, Chaboche PA, Wakiyama Y, Thiry Y. Research and management challenges following soil and landscape decontamination at the onset of the reopening of the Difficult-To-Return Zone, Fukushima (Japan). *Soil*. 2023;9(2): 479–497.
- Turlay IV, Chernushevich GA, Peretrukhin VV, Tereshko VV. Radioactive contamination of wood in the Chernobyl zone. *Lesnoy zhurnal = Forest Journal*. 2001;(2): 25–29 (In Russian).
- Kaduka M, Shutov V, Bruk G, Balonov M. Role of soil and climate characteristics in the formation of radioactive contamination of mushrooms. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 32–35 (In Russian).
- Holiaka D, Yoschenko V, Cherniaiev OR, Moskaliuk A, Lesnik O, Levchuk S, et al. Variability of activity concentrations and radial distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr in trunk wood of Scots pine and Silver birch. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023;263: 107186.
- Jouve A, Tikhomirov FA, Grebenkov A, Dubourg M, Belli M, Arkhipov N. Management of contaminated forests. In: Karaoglou A, Desmet G, Kelly GN, Menzel HG. (Eds.). The Radiological Consequences of the Chernobyl Accident. Proceedings of the First International Conference. Minsk, Belarus, 18 to 22 March 1996. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 1996: 389–400.
- Shubina OA, Titov IE, Krechetnikov VV, Sanzharova SI. Issues of return to economic use of territories temporarily withdrawn from land use after the Chernobyl accident. In: “Actual Problems of Radioecology”. Proceedings of the Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology”. Ed.: Sanzharova NI. Obninsk; 2018: 99–119 (In Russian).
- Hostert P, Kuemmerle T, Prishchepov A, Sieber A, Lambin EF, Radeloff VC. Rapid land use change after socio-economic disturbances: the collapse of the Soviet Union versus Chernobyl. *Environmental Research Letters*. 2011;6: 045201.
- Matsala M, Bilous A, Myroniuk V, Holiaka D, Schepaschenko D, See L, et al. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster. *Forests*. 2021;12: 1024.
- Koroleva T, Petrovsky V, Khitun O. Disturbance and recovery of vegetation at the sites of nuclear accidents in Arctic Yakutia. In: Proceedings from Kalmar ECO-TECH'07: Technologies for Waste and Wastewater Treatment, Energy from Waste, Remediation of Contaminated Sited, Emissions Related to Climate. November 26–28, 2007. Kalmar, Sweden; 2007: 607–615.
- Ramzaev V, Mishin A, Golikov V, Argunova T, Ushnitski V, Zhuravskaya A, et al. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009;100: 1092–1099.
- Lurie AA. Radioecological study of consequences of the underground nuclear explosions with soil excavation in the north of the Perm region. Part 2. Radionuclides in biosphere. *ANRI*. 2002;(3): 27–33 (In Russian).
- Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khramtsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the “Taiga” nuclear explosion site: Site description and *in situ* measurements. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102: 672–680.
- Fogh CL, Andersson KG. Dynamic behaviour of ^{137}Cs contamination in trees of the Briansk region, Russia. *Science of the Total Environment*. 2001;269: 105–115.
- Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV, Nekrasov VA. Radiological situation in the young pine forest that grew after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 40–51 (In Russian).
- Ramzaev VP, Barkovsky AN. Assessment of secondary radioactive contamination of a decontaminated land plot located on the territory of a recreation base in a wooded area. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 52–64 (In Russian).
- Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety. Ed.: Logachev VA. Moscow: Izd.AT; 2001. 519 p. (In Russian).
- Gedeonov AD, Petrov ER, Savopulo MI, Shkroev VY. Plutonium-239, 240, plutonium-238 and γ -emitting radionuclides in environmental samples near peaceful underground nuclear explosion site «Taiga» (European North-East Russia). In: Borretzen P, Jolle T, Strand P. (Eds.). Proceedings from the International Conference on Radioactivity in the Environment, 1–5 September, 2002, Monaco; 2002.

23. Ramzaev V, Repin V, Medvedev A, Khramtsov E, Timofeeva M, Yakovlev V. Radiological investigations at the «Taiga» nuclear explosion site, part II: man-made γ -ray emitting radionuclides in the ground and the resultant kerma rate in air. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012;109: 1–12.
24. Shcheglov AI, Tsvetnova OB, Kasatskiy AA. Pollution dynamics ^{137}Cs of the various components of forest ecosystems Bryansk Polesye. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedeniye = Bulletin of Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2014;(3): 17–22 (In Russian).
25. Soukhova NV, Fesenko SV, Klein D, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Badot PM. ^{137}Cs distribution among annual rings of different tree species contaminated after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003;65: 19–28.
26. Ramzaev VP, Repin VS. Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the «Taiga» peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia). *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 148–159.
27. Ramzaev VP, Repin VS. Activity concentrations of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{241}Am in sieved soil and soil inclusions from the «Taiga» peaceful nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3):79–92.
28. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Varfolomeeva KV. Vertical distribution of ^{137}Cs in soddy-podzolic sandy soil in grasslands and forests of the Bryansk region in 2015–2016. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 27–41 (In Russian).

Received: June 10, 2024

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

Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

For citation: Ramzaev V.P., Repin V.S. ^{137}Cs accumulation by woody plants and edible mushrooms at the «Taiga» peaceful nuclear explosions site. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No 4. P. 7–17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-7-17

Информированность врачей по вопросам радиационной безопасности при проведении рентгеноэндоваскулярных диагностики и лечения

Ю.Н. Капырина¹, А.М. Библин², А.В. Водоватов^{1,2}, М.И. Комиссаров³

¹ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

² 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

³ Детский клинический центр имени Л.М. Рошала, Московская область, Красногорск, Россия

Источники ионизирующего излучения являются неотъемлемой частью современного здравоохранения и широко используются в диагностических и терапевтических целях. Одним из ключевых аспектов безопасного использования ионизирующего излучения в медицине является грамотность врачей в вопросах радиационной безопасности. Целью настоящей работы является исследование уровня информированности врачей по рентгеноэндоваскулярным диагностике и лечению в Российской Федерации в вопросах радиационной безопасности. Исследование было проведено в виде анкетного опроса в сети Интернет. Ссылка на анкету распространялась в профильных сообществах врачей по рентгеноэндоваскулярным диагностике и лечению в социальных сетях. В анкетировании приняли участие 78 человек. Анкета состояла из 26 вопросов, 11 из которых были посвящены оценке уровня знаний о радиационной безопасности. Каждый вопрос касался одного из фундаментальных (необходимых) для понимания и применения в практике аспектов. Ни один из респондентов не смог ответить правильно на все вопросы о радиационной безопасности. Средний балл среди всех ответивших составил 6,1 при максимальном значении 11. Уровень знаний достоверно не зависит от стажа работы по специальности ($p > 0,05$). Наибольшие трудности вызвали вопросы о биологическом действии ионизирующего излучения. Принявшие участие в исследовании в основном оценили свои знания в области обеспечения радиационной безопасности как удовлетворительные (46,1%) или хорошие (33,3%). Самооценка уровня знаний достоверно не зависит от стажа работы по специальности ($p > 0,05$). В качестве предпочтительных источников информации о вопросах радиационной безопасности врачи отметили информационные ресурсы в сети интернет, научные конференции, учебные материалы и курсы повышения квалификации. К настоящему моменту какой-либо регулярно обновляемый единый информационный ресурс на русском языке отсутствует. Разработка такого ресурса является наиболее эффективным по соотношению затрат и выгод способом обеспечения и повышения информированности врачей по рентгеноэндоваскулярным диагностике и лечению в вопросах радиационной безопасности. Одновременно с этим необходимо повышать качество дополнительного профессионального образования по радиационной безопасности.

Ключевые слова: врачи по рентгеноэндоваскулярным диагностике и лечению, информированность, радиационная безопасность, медицинское облучение, социологическое исследование.

Введение

Источники ионизирующего излучения (ИИИ) являются неотъемлемой частью современного здравоохранения и широко используются в диагностических и терапевтических целях. Их применение существенно расширяет возможности медицинского персонала, повышает качество оказания медицинской помощи. Однако, несмотря на эффективность и неоспоримую пользу методик, использующих ИИИ, их применение сопровождается радиационными рисками для здоровья медицинского персонала и пациентов. Обоснованное использование ИИИ, в первую очередь, обеспечивается высокими квалификационными требованиями к специалистам и соблюдением норм санитарного

законодательства во избежание негативных последствий для здоровья медицинского персонала и пациентов.

Рентгеноэндоваскулярные методы диагностики и лечения в настоящее время широко применяются в практике благодаря минимально инвазивному характеру и своей эффективности. Они обеспечивают широкий спектр вмешательств, включая стентирование, эмболизацию, ангиопластику и т.д. Основное преимущество данных методов заключается в возможности одновременного проведения диагностики и лечения патологии. Эти методы позволяют получать доступ к кровеносным сосудам через небольшие разрезы, что снижает риск осложнений и сокращает время восстановления пациентов по сравнению с открытыми хирургическими вмешательствами. В большинстве случаев

Капырина Юлия Николаевна

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет

Адрес для переписки: 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2; E-mail: kapirina-yuliya@yandex.ru

рентгенэндоваскулярные методы диагностики и лечения являются более эффективными, малотравматичными, не требуют длительного пребывания в стационаре и психологически более комфортны для пациентов.

В тоже время рентгенэндоваскулярные методы диагностики и лечения ассоциированы со значительными дозами облучения: средние дозы лежат в диапазоне 10–20 мЗв за исследование. В отдельных исследованиях эффективная доза может превышать 100 мЗв [1–3]. В области входа пучка излучения в тело могут формироваться поглощенные дозы до нескольких Гр, что может приводить к возникновению детерминированных эффектов в коже и подкожных тканях [1–3].

Одним из ключевых аспектов безопасного использования ионизирующего излучения в медицине является грамотность врачей в вопросах радиационной безопасности (РБ), так как от них напрямую зависит соблюдение техники безопасности при работе с ИИИ, а также целесообразность назначения таких методов диагностики и лечения для каждого пациента с учетом всех возможных рисков. Медицинский персонал обеспечивает собственную безопасность при работе с ИИИ и безопасность пациентов.

Вопросы грамотности врачей и другого медицинского персонала по РБ поднимаются в разных странах [4–11] не первый год, демонстрируя актуальность данной темы для здравоохранения во всем мире в связи со всё более широким распространением технологий и повседневным внедрением методик, использующих ИИИ. Такие исследования

проводятся, в том числе, и среди врачей по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению (врачей РЭДЛ) [12–18].

Исследования неоднократно демонстрировали недостаточную осведомленность врачей в том, какие именно методы визуализации включают в себя ИИИ и о дозовой нагрузке на персонал и пациентов [5–9, 11, 16–18].

Ряд исследований показал, что врачи не проходят индивидуальный дозиметрический контроль и недооценивают потенциальные риски от воздействия ИИИ для собственного здоровья и здоровья пациентов. Исследования демонстрируют недостаточность специализированной подготовки по работе с ИИИ у большинства специалистов, многие врачи не проходят дополнительного обучения по вопросам РБ [7, 9–18]. Отечественные исследования по определению уровня знаний врачей РЭДЛ о РБ ранее не проводились.

Цель исследования – определение информированности в вопросах радиационной безопасности врачей РЭДЛ.

Материалы и методы

Социологическое исследование опросным методом проводилось в период с апреля по август 2024 года. Всего было опрошено 78 человек. Анкеты заполнялись онлайн в сервисе Google.Forms¹. Ссылка на анкету распространялась в группах и чатах профильных профессиональных сообществ в социальных сетях.

Профессиональная характеристика выборки представлена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика выборки

[Table 1

Characteristics of the sample]

Стаж работы, лет [Work experience in years]				
< 1	1–5	6–10	11–20	> 20
2 (2,6%)	22 (28,2%)	23 (29,5%)	21 (26,9%)	10 (12,8%)
Контингент пациентов [Patient contingent]				
Взрослые [Adults]		Дети [Children]		Взрослые и дети [Adults and children]
65 (83,3%)		4 (5,1%)		9 (11,4%)
Основные виды выполняемых вмешательств [The main types of interventions performed]				
Область сердца и магистральных сосудов [Heart and trunk vessels area]	Область головы и шеи [Head and neck area]		Периферические сосуды [Peripheral vessels]	Внесосудистые вмешательства [Extravascular interventions]
70 (89,7%)	20 (25,6%)		40 (51,3%)	9 (11,5%)

Анкета состояла из 26 вопросов, 11 из которых были посвящены вопросам по оценке уровня знаний о РБ. Каждый вопрос касался одного из фундаментальных (необходимых) для понимания и применения в практике аспектов. Правильный ответ на вопрос соответствовал одному баллу. Ответы на вопросы с несколькими правильными вариантами засчитывались только при выборе всех этих вариантов. Уровень знаний считался отличным при 11 правильных ответах, хорошим – при 9–10, удовлетворительным – при 7–8,

неудовлетворительным – при менее 7 правильных ответов.

Материалы исследования были подвергнуты статистической обработке с использованием методов параметрического и непараметрического анализа. Накопление, корректировка, систематизация исходной информации и визуализация полученных результатов осуществлялись в электронных таблицах Microsoft Office Excel 2016. Статистический анализ проводился с использованием программы Statistica 10.

¹ Google Forms: https://docs.google.com/forms/d/1r8ljzjRYTx_9uy8zlt290zqy8Zd331esdTE4OlcMASQ (Дата обращения: 03.09.2024) [Google Forms: https://docs.google.com/forms/d/1r8ljzjRYTx_9uy8zlt290zqy8Zd331esdTE4OlcMASQ (Accessed: September 03, 2024)]



Рис. 1. Распределение ответов на вопрос об уровне собственных знаний в вопросах РБ, %
[Fig. 1. Distribution of answers to the question on self-assessed knowledge of radiation protection, %]

Проверка на нормальность распределения совокупностей количественных данных проводилась с использованием критерия Шапиро-Уилка. Номинальные данные описывались с указанием абсолютных значений и процентных долей. Для проверки зависимости категориальных переменных использовался метод хи-квадрат. Сравнение результатов измерения разных подгрупп в выборке производилось с помощью критерия Краскелла-Уоллиса. Различия между выборками считались достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлено распределение ответов врачей РЭДЛ на вопрос об уровне собственных знаний в вопросах РБ.

Принявшие участие в опросе в основном оценили свои знания в области обеспечения РБ как удовлетворительные или хорошие. Самооценка уровня знаний достоверно не зависит от стажа работы по специальности ($p = 0,82$). Распределение респондентов по количеству правильных ответов на вопросы о РБ представлено на рисунке 2.

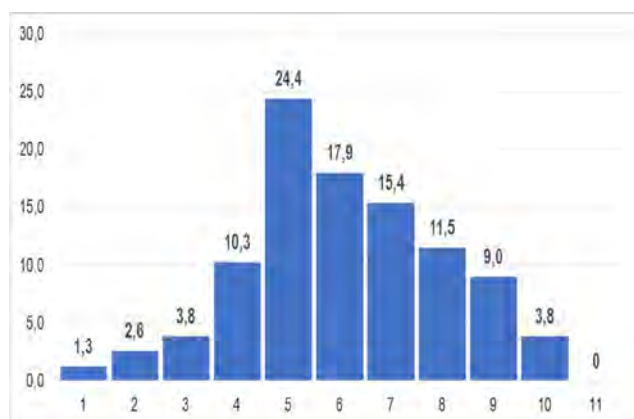


Рис. 2. Распределение количества правильных ответов на вопросы о РБ, %
[Fig. 2. Distribution of correct answers to questions on radiation protection, %]

Как следует из рисунка 2, ни один из принявших в исследовании специалистов не ответил правильно на все вопросы. Средний балл составил 6,1, среднеквадратичное отклонение оценено равным 1,95, что позволяет в целом оценить их уровень подготовки как неудовлетворительный. Это особенно важно, в связи с тем, что все специалисты относятся к персоналу группы А (непосредственно работающих с ИИИ) и, соответственно, должны проходить обучение по правилам работы с источником излучения и по РБ². Уровень знаний достоверно не зависит от стажа работы по специальности ($p = 0,6$). При этом 43,6% респондентов оценили свои знания по вопросам РБ как хорошие или отличные. Таким образом, существует фундаментальное расхождение между субъективной (собственной) самооценкой знаний персонала и объективными результатами исследования. Достоверная связь между числом правильных ответов и самооценкой уровня знаний респондентов отсутствует ($p = 0,7$).

Для трех вопросов процент правильных ответов составил менее 40.

В вопросе о том, верно ли утверждение, что при облучении пациента до приемника изображения доходит лишь малая часть от исходящей дозы излучения (не более 5%), 21 респондент (26,9%) выбрал правильный ответ «Да».

Сложности также вызвали вопросы о биологическом действии ионизирующего излучения. Только 23 респондента (29,5%) отнесли к стохастическим эффектам одновременно онкологические заболевания, пороки развития и генные мутации. К детерминированным лучевым эффектам отнесли одновременно кожные поражения, лучевую катаракту и лучевую болезнь 27 человек (34,6%). Такой низкий процент правильных ответов свидетельствует об отсутствии у специалистов целостного понимания вопросов радиобиологического действия ионизирующего излучения на организм человека.

Максимальное количество правильных ответов набрали вопросы, касающиеся методик обеспечения РБ при проведении интервенционных исследований (табл. 2).

² Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26 апреля 2010 г. №40. [Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010). Approved and enacted by Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 40 of April 26, 2010. (In Russ.)]

Таблица 2

Ответы на вопросы, посвященные оценке уровня знаний о РБ

[Table 2]

Answers to the questions on the assessment of knowledge on radiation protection]

Вопрос [Question]	Правильный ответ/ответы [Correct answer(s)]	% правильных ответов [Correct answers, %]
Верно ли, что при проведении интервенционного исследования тучному пациенту врач получает большую дозу облучения по сравнению с обследованием худощавого человека? [Is it true that during an interventional procedure, a physician receives a higher radiation dose when working with an obese patient compared to a slim one?]	Да [Yes]	87,2% (68)
Верно ли утверждение, что для уменьшения облучения кожи пациента целесообразно держать приемник изображения на максимальном расстоянии от пациента? [Is the statement true that to reduce skin exposure, the image receptor should be kept at the maximum possible distance from the patient?]	Нет [No]	85,9% (67)
Какие меры предосторожности принимаются для радиационной защиты пациентов при медицинском облучении? [What precautions are taken to ensure radiation protection for patients during medical exposure?]	Использование защитной одежды [Use of protective clothing]	71,8% (56)
Верно ли, что рассеянное излучение не оказывает влияния на качество изображения? [Is it true that scattered radiation does not affect image quality?]	Нет [No]	66,7% (52)
Кто из пациентов наиболее радиочувствителен? [Which patients are the most radiosensitive?]	Годовалый ребенок [One-year-old child]	62,8% (49)
Какие меры предосторожности принимаются для радиационной защиты врачей при работе с ионизирующим излучением? [What precautions are taken to ensure radiation protection for physicians working with ionizing radiation?]	Использование защитной одежды [Use of protective clothing] Защита экранированием [Shielding] Расстояние от источника [Distance from the source] Индивидуальный дозиметрический контроль [Individual dosimetric monitoring] Стационарные и мобильные средства защиты [Stationary and mobile protective equipment]	53,8% (42)
Верно ли, что рентгеновская трубка должна располагаться как можно дальше от пациента? [Is it true that the X-ray tube should be placed as far away from the patient as possible?]	Да [Yes]	44,9% (35)
Что из нижеперечисленного можно отнести к радиационно-индуцированным повреждениям кожи? [Which of the following are considered radiation-induced skin injuries?]	Эритема [Erythema] Десквамация [Desquamation]	43,6% (34)

Почти треть опрошенных не воспринимает индивидуальный дозиметрический контроль медицинского персонала в качестве меры обеспечения собственной РБ. Такое отношение может привести к добровольному отказу от ношения индивидуальных дозиметров. Риском такого отказа может стать невыявление нештатных ситуаций и радиационных аварий, что будет препятствовать, в свою очередь, разработке и реализации мер по недопущению повторения таких ситуаций.

В соответствии с действующими нормативно-методическими документами врачи РЭДЛ являются ответ-

ственными за информирование пациентов или их законных представителей о возможных негативных последствиях облучения (радиационных рисках). Только 29% респондентов утвердительно ответили на вопрос «Информируете ли Вы пациентов о возможных последствиях медицинского облучения и/или радиационных рисках?». Достоверная связь между числом правильных ответов и тем, что респонденты информируют пациентов о возможных последствиях облучения, отсутствует ($p=0,7$). Неудовлетворительный уровень знаний может приводить к ситуациям, когда в ходе информирования специалисты будут доносить до пациентов недостоверные сведения.

Только 39,7% опрошенных ассоциируют интервенционные исследования с негативными последствиями для здоровья пациентов. Данный факт может объясняться объективным улучшением состояния здоровья пациентов после проведения исследований за счет устранения или снижения выраженности патологического состояния или отсутствием знаний о механизмах развития негативных эффектов ионизирующего излучения. Также такие эффекты могут восприниматься как неизбежные при проведении процедуры. Результаты многочисленных исследований демонстрируют, что специалисты, работающие с ионизирующим излучением, склонны недооценивать его риски, так как воспринимают ионизирующее излучение как знакомый фактор опасности [19–21]. В таком случае субъективная неизбежность развития побочных эффектов мешает реализации комплекса мероприятий, направленных на их уменьшение. Более детальному рассмотрению этого вопроса будут посвящены следующие работы авторов.

Следует отметить, что менее 20% респондентов сталкивались с развитием поражений кожи у пациентов после интервенционных исследований. Данный результат может объясняться оптимальной практикой проведения исследований, позволяющих не допустить развитие кожных поражений (время облучения, геометрия облучения и т.д.) и отсутствием практики выявления и регистрации таких кожных поражений. По современным представлениям кожные эффекты развиваются спустя несколько дней–недель после облучения. Скорость развития поражений зависит от дозы облучения и индивидуальной радиочувствительности. Учитывая ограниченное время пребывания пациента в стационаре после проведения интервенционного исследования, такие эффекты будут реализовываться после выписки. Игнорирование возможности развития таких эффектов может приводить к игнорированию профилактики, назначению радиопротекторов и симптоматической терапии кожных поражений. В этом случае терапия кожных эффектов будет проводиться не своевременно, и снизить тяжесть проявления таких поражений будет затруднительно.

Нерадиационные эффекты интервенционных исследований (острая аллергическая реакция, контраст-индуцированная нефропатия) являются более знакомыми для респондентов. Никогда с ними не встречались только 9% респондентов.

Интересно отметить, что при всем вышесказанном специалисты осознают, что в ходе своей работы могут переоблучать пациентов. Только 15% утверждают, что никогда такого не допускают. С учетом того, что медицинское облучение не нормируется, исследования уровней облучения пациентов проводятся исключительно специалистами по РБ со слабой вовлеченностью врачей РЭДЛ. Критерии проведения переоблучения к настоящему моменту отсутствуют, а статистика таких случаев не ведется. Таким образом, представление о переоблучении является субъективным.

По результатам исследования какой-либо один предпочтительный источник информации о РБ отсутствует (рис. 3). Для более 50% респондентов предпочтительными источниками получения информации являются: информационные ресурсы в сети интернет, научные конференции, учебные материалы и курсы повышения квалификации. К настоящему моменту какой-либо регулярно обновляемый единый информационный ресурс на русском языке отсутствует. Курсы по РБ зачастую носят формальный характер и не дают всей полноты информации. Современные учебники и учебные пособия по РБ в медицине, за исключением отдельных, не актуализированы, содержат устаревшую информацию и не учитывают специфику интервенционной хирургии. Наиболее эффективным шагом для улучшения ситуации является создание онлайн-ресурса по вопросам РБ при медицинском облучении, а также разработка новых учебных пособий. Специалистам в области РБ пациентов целесообразно расширять объём предоставляемых данных в рамках профильных для медицинского персонала научно-практических конференций. Целесообразно распространять среди врачей РЭДЛ результаты исследований уровней облучения и ассоциированные с ними эффекты для формирования осознанного взгляда на процесс облучения пациентов.



Рис. 3. Предпочитаемые источники информации о РБ, %
[Fig. 3. Preferred sources of information on radiation protection, %]

Учитывая результаты исследования, рекомендуется скорректировать действующие программы дополнительного профессионального образования в части биологического действия ионизирующего излучения, а также повысить требования к выходному контролю знаний. Отсутствие понимания хотя бы одного из аспектов обеспечения РБ в медицине способно негативно повлиять на всю систему защиты персонала и пациентов. Например, отсутствие понимания механизма развития детерминированных и стохастических эффектов нивелирует оптимизацию радиационной защиты при проведении интервенционных исследований и может приводить к переоблучению пациентов и непроведению мероприятий, направленных на минимизацию негативных последствий.

Заключение

Общий уровень информированности врачей РЭДЛ в вопросах РБ является недостаточно высоким. Ни один из респондентов не ответил правильно на все вопросы. Средний балл составил 6,1 при максимуме 11. Наибольшие трудности представляют вопросы, касающиеся биологического действия ионизирующего излучения.

При этом принявшие участие в опросе в основном оценили свои знания в области обеспечения РБ как удовлетворительные (46,2%) или хорошие (33,3%).

Такой разрыв между самооценкой собственных знаний и результатами объективной оценки уровня знаний врачей РЭДЛ характерен не только для отечественных специалистов, но и является общемировой проблемой.

Результаты исследования показали, что наиболее эффективным по соотношению затрат и выгод способом обеспечения и повышения информированности врачей РЭДЛ в вопросах РБ является разработка специализированного информационного портала в сети Интернет. Такой ресурс должен включать в себя сведения о биологическом действии ионизирующего излучения, современных представлениях о методах обеспечения РБ при медицинском облучении и практические рекомендации по снижению доз облучения пациентов и персонала. Разработку такого ресурса целесообразно осуществлять при совместном участии специалистов ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и представителей профессионального сообщества.

Одновременно с этим необходимо повышать качество дополнительного профессионального образования по РБ. Информация, представляемая слушателям, должна охватывать все основные аспекты обеспечения РБ медицинского персонала и пациентов, включая базовую информацию о биологическом действии ионизирующего излучения. Прохождение такого обучения не должно быть направлено на формальное выполнение требований по периодическому обучению персонала группы А, а иметь целью повышение и актуализацию знаний о РБ у специалистов.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Капырина Ю.Н. разработала дизайн исследования, разработала анкету, осуществляла сбор данных, подготовку черновика рукописи.

Библин А.М. выполнил анализ литературных данных, подготовку черновика рукописи, оформил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Водоватов А.В. разработал дизайн исследования, принял участие в обсуждении промежуточного варианта рукописи.

Комиссаров М.И. принял участие в проработке и редактировании статьи, принял участие в обсуждении промежуточного варианта рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В. и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине, Том 1. Лучевая диагностика. Под ред. профессора М.И. Балонина. СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2019. Т. 1. 320 с.
2. 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.
3. Sarycheva S., Golikov V., Kalnitsky S. Studies of patient doses in interventional radiological examinations // Radiation Protection Dosimetry. 2010. Vol. 139, № 1–3. P. 258–261.
4. Campanella F., Rossi L., Girolettiet E. et al. Are physicians aware enough of patient radiation protection? Results from a survey among physicians of Pavia District–Italy // BMC Health Services Research. 2017. Vol. 17, P. 1–6. DOI: 10.1186/s12913-017-2358-1.
5. Merzenich H., Krille L., Hammer G. et al. Paediatric CT scan usage and referrals of children to computed tomography in Germany—a crosssectional survey of medical practice and awareness of radiation related health risks among physicians // BMC Health Services Research. 2012. Vol. 12. P. 1–7. DOI: 10.1186/1472-6963-12-47.
6. Brown N., Jones L. Knowledge of medical imaging radiation dose and risk among doctors // Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology. 2013. Vol. 57, № 1. P. 8–14. DOI: 10.1111/j.1754-9485.2012.02469.x.
7. Paolicchi F., Miniati F., Bastiani L. et al. Assessment of radiation protection awareness and knowledge about radiological examination doses among Italian radiographers // Insights into Imaging. 2016. Vol. 7. P. 233–242. DOI: 10.1007/s13244-015-0445-6.
8. Ditsch N., Shekhani H. N., Cloutier M. et al. Ionizing radiation knowledge among emergency department providers // Journal of the American College of Radiology. 2016. Vol. 13, № 9. P. 1044–1049. DOI: 10.1016/j.jacr.2016.03.011.
9. Brun A., Mor R.A., Bourrelly M. et al. Radiation protection for surgeons and anesthetists: practices and knowledge before and after training // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38, № 1. P. 175. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9dbd.
10. Baudin C., Vacquier B., Thin G. et al. Radiation protection in a cohort of healthcare workers: knowledge, attitude, practices, feelings and IR-exposure in French hospitals // Journal of Radiological Protection. 2024. Vol. 44, № 2. P. 021507. DOI: 10.1088/1361-6498/ad39f7.
11. Aras S., Tanzer I.O., Ikizceli T. A survey study of radiation protection awareness among radiology technicians in Mogadishu, Somalia // Radiation Protection Dosimetry. 2020. Vol. 192, № 1. P. 36–40. DOI: 10.1093/rpd/ncaa191.
12. Uthirapathy I., Dorairaj P., Ravi S., Somasundaram S. Knowledge and practice of radiation safety in the Catherization laboratory among Interventional Cardiologists—An online survey // Indian Heart Journal. 2022. Vol. 74, № 5. P. 420–423. DOI: 10.1016/j.ihj.2022.08.001.

13. Costa H., Vinhas H., Calé R. et al. A report on a survey among Portuguese Association of Interventional Cardiology associates regarding ionizing radiation protection practices in national interventional cath-labs // Revista Portuguesa de Cardiologia. 2024. Vol. 43, № 4. P. 177–185. DOI: 10.1016/j.repc.2023.07.008.
14. Rose A., Uebel K., Rae W.I.D. Personal dosimeter utilisation among South African interventionalists // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, № 2. P. 326. DOI: 10.1088/1361-6498/abf950.
15. O'Rourke M., Moore N., Young R. et al. An investigation into the knowledge, attitudes, and practice of radiation protection in interventional radiology and cardiac catheter-laboratories // Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences. 2024. Vol. 55, № 3. P. 101440. DOI: 10.1016/j.jmir.2024.101440.
16. Tefera E., Qureshi S.A., Gezmu A.M., Mazhani L. Radiation protection knowledge and practices in interventional cardiologists practicing in Africa: a cross sectional survey // Journal of Radiological Protection. 2020. Vol. 40, № 1. P. 311. DOI: 10.1088/1361-6498/ab5840.
17. Elmorabit N., Marrakchi A., Chelh F.Z. et al. Knowledge and practices of interventional radiology staff regarding radiation protection // Multidisciplinary Reviews. 2025. Vol. 8, № 2. P. 2025062. DOI: 10.31893/multirev.2025062.
18. Sebastião L.M., de Cássia Flôr R., Anderson T.J. The practice of radiation protection in an interventional neuroradiology service // Revista Brasileira de Medicina do Trabalho. 2023. Vol. 20, № 3. P. 430–437. DOI: 10.47626/1679-4435-2022-748.
19. Xu X., Xie Y., Li H. et al. Awareness and preparedness level of medical workers for radiation and nuclear emergency response // Frontiers in Public Health. 2024. Vol. 12. P. 1410722. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1410722.
20. Covello V., Sandman P. Solutions to an Environment in Peril. Baltimore: John Hopkins University Press; 2001. Risk communication: evolution and revolution; P. 164–178.
21. Freudenberg L.S., Beyer T. Subjective perception of radiation risk // Journal of Nuclear Medicine. 2011. Vol. 52, № S2. P. 29S–35S. DOI: 10.2967/jnumed.110.085720.

Поступила: 26.11.2024

Капырина Юлия Николаевна – ассистент кафедры общей гигиены, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Министерство здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 194100, Россия, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2; E-mail: kapyrina-yuliya@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-1018-5200

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

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

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Комиссаров Михаил Игоревич – кандидат медицинских наук, заведующий отделением рентгенохирургических методов диагностики и лечения, врач по рентгеноэндоваскулярным диагностике и лечению, Детский клинический центр имени Л.М. Рошала, Красногорск, Россия

ORCID: 0000-0003-4788-7561

Для цитирования: Капырина Ю.Н., Библин А.М., Водоватов А.В., Комиссаров М.И. Информированность врачей по вопросам радиационной безопасности при проведении рентгеноэндоваскулярных диагностики и лечения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 18–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-18-26

Awareness of interventional radiologists about radiation protection in medical exposure

Yuliya N. Kapyrina¹, Artem M. Biblin², Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Mikhail I. Komissarov³

¹ Saint Petersburg State Pediatric Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

³ Leonid Roshal Children's Clinical Centre, Moscow Region, Krasnogorsk, Russia

Sources of ionizing radiation are an integral part of modern healthcare and are widely used for diagnostic and therapeutic purposes. One of the key aspects of the safe use of ionizing radiation in medicine is the competence of medical professionals in the field of radiation protection. The aim of this study is to

Yuliya N. Kapyrina

Saint Petersburg State Pediatric Medical University

Address for correspondence: Litovskaya Str., 2, Saint Petersburg, Russia, 194100; E-mail: kapyrina-yuliya@yandex.ru

investigate the level of awareness and understanding of radiation protection among interventional radiologists in the Russian Federation. The research was conducted through an online survey. The link to the questionnaire was shared in communities of interventional radiologists in social networks. A total of 78 interventional radiologists participated in the survey. The questionnaire consisted of 26 questions, 11 of which focused on assessing knowledge of radiation protection. Each question addressed a fundamental aspect essential for understanding and application in medical practice. None of the respondents answered all radiation protection questions correctly. The average score among all participants was 6.1 out of a maximum of 11. The level of knowledge did not significantly depend on years of professional experience ($p > 0,05$). The most challenging questions concerned the biological effects of ionizing radiation. Most participants assessed their knowledge of radiation safety as satisfactory (46,1%) or good (33,3%). Self-assessment of knowledge levels also did not significantly depend on professional experience ($p > 0,05$). As preferred sources of information on radiation safety, interventional radiologists identified online resources, scientific conferences, educational materials, and training courses. Currently, no regularly updated, unified information online resource in Russian is available. Developing such a resource represents the most cost-effective approach to ensuring and improving the awareness of interventional radiologists regarding radiation protection. Simultaneously, efforts should be directed toward enhancing the quality of training courses on radiation protection.

Key words: interventional radiologists, awareness, radiation protection, medical exposure, survey

Authors' personal contribution

Kapryina Yu.N. developed the design of the study, developed a questionnaire, collected the data, prepared a draft of the manuscript.

Biblin A.M. analyzed the literature data, prepared a draft of the manuscript, submitted the final version for publication in the journal.

Vodovatov A.V. developed the design of the study, prepared a draft of the manuscript.

Komissarov M.I. assisted in elaboration and editing of the article, prepared a draft of the manuscript.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

References

1. Balonov MI, Golikov VYu, Vodovatov AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Kalnitsky SA, et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Volume 1. X-ray diagnostics. By edit. professor MI Balonov. Saint Petersburg: NIIRG named after prof. PV Ramzaev; 2019. Vol. 1. 320 p. (In Russian).
2. Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA, Kalnitsky SA, Repin VS, Sarycheva SS, et al. Current levels of medical exposures in Russia. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 67–79. (In Russian).
3. Sarycheva S, Golikov V, Kalnitsky S. Studies of patient doses in interventional radiological examinations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2010;139(1–3): 258–261. DOI: 10.1093/rpd/ncq021.
4. Campanella F, Rossi L, Girolettiet E, Micheletti P, Buzzi F, Villani S. Are physicians aware enough of patient radiation protection? Results from a survey among physicians of Pavia District–Italy. *BMC Health Services Research*. 2017;17: 1–6. DOI: 10.1186/s12913-017-2358-1.
5. Merzenich H, Krille L, Hammer G, Kaiser M, Yamashita S, Zeeb H. Paediatric CT scan usage and referrals of children to computed tomography in Germany—a crosssectional survey of medical practice and awareness of radiation related health risks among physicians. *BMC Health Services Research*. 2012;12: 1–7. DOI: 10.1186/1472-6963-12-47.
6. Brown N, Jones L. Knowledge of medical imaging radiation dose and risk among doctors. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*. 2013;57(1): 8–14. DOI: 10.1186/s12913-017-2358-1.
7. Paolicchi F, Miniati F, Bastiani L, Faggioni L, Ciaramella A, Creonti I, et al. Assessment of radiation protection awareness and knowledge about radiological examination doses among Italian radiographers. *Insights into Imaging*. 2016;7: 233–242. DOI: 10.1186/s12913-017-2358-1.
8. Ditskoffsky N, Shekhani HN, Cloutier M, Chen ZN, Zhang C, Hanna TN. Ionizing radiation knowledge among emergency department providers. *Journal of the American College of Radiology*. 2016;13(9): 1044–1049. DOI: 10.1016/j.jacr.2016.03.011.
9. Brun A, Mor RA, Bourrelly M, Dalivoust G, Gazazian G, Boufercha R, et al. Radiation protection for surgeons and anesthetists: practices and knowledge before and after training. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38(91): 175. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9dbd.
10. Baudin C, Vacquier B, Thin G, Chenene L, Guersen J, Partarrieu I, et al. Radiation protection in a cohort of healthcare workers: knowledge, attitude, practices, feelings and IR-exposure in French hospitals. *Journal of Radiological Protection*. 2024;44(2): 021507. DOI: 10.1088/1361-6498/ad39f7.
11. Aras S, Tanzer IO, Ikizceli T. A survey study of radiation protection awareness among radiology technicians in Mogadishu, Somalia. *Radiation Protection Dosimetry*. 2020;192(1): 36–40. DOI: 10.1093/rpd/ncaa191.
12. Uthirapathy I, Dorairaj P, Ravi S, Somasundaram S. Knowledge and practice of radiation safety in the Catherization laboratory among Interventional Cardiologists—An online survey. *Indian Heart Journal*. 2022;74(5): 420–423. DOI: 10.1016/j.ihj.2022.08.001.
13. Costa H, Vinhas H, Calé R, Pereira E, Santos J, Paulo G, et al. A report on a survey among Portuguese Association of Interventional Cardiology associates regarding ionizing radiation protection practices in national interventional cath-labs. *Revista Portuguesa de Cardiologia*. 2024;43(4): 177–185. DOI: 10.1016/j.repc.2023.07.008.
14. Rose A, Uebel K, Rae WID. Personal dosimeter utilisation among South African interventionalists. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(2): 326. DOI: 10.1088/1361-6498/abf950.
15. O'Rourke M, Moore N, Young R, Svetlic S, Bucknall H, McEntee MF, et al. An investigation into the knowledge, attitudes, and practice of radiation protection in interventional radiology and cardiac catheter-laboratories. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*. 2024;55(3): 101440. DOI: 10.1016/j.jmir.2024.101440.

16. Tefera E, Qureshi SA, Gezmu AM, Mazhani L. Radiation protection knowledge and practices in interventional cardiologists practicing in Africa: a cross sectional survey. *Journal of Radiological Protection*. 2020;40(1): 311. DOI: 10.1088/1361-6498/ab5840.
17. Elmorabit N, Marrakchi A, Chelh FZ, Zaizoune S, Azougagh M, Ennibi O. Knowledge and practices of interventional radiology staff regarding radiation protection. *Multidisciplinary Reviews*. 2025;8(2): 2025062. DOI: 10.31893/multirev.2025062.
18. Sebastião LM, de Cássia Flôr R, Anderson TJ. The practice of radiation protection in an interventional neuroradiology service. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*. 2023.20(3): 430–437. DOI: 10.47626/1679-4435-2022-748.
19. Xu X, Xie Y, Li H, Wang X, Shi S, Yang Z, et al. Awareness and preparedness level of medical workers for radiation and nuclear emergency response. *Frontiers in Public Health*. 2024;12: 1410722. DOI: 10.3389/fpubh.2024.1410722.
20. Covello V, Sandman P. Solutions to an Environment in Peril. Baltimore: John Hopkins University Press; 2001. Risk communication: evolution and revolution; P. 164–178.
21. Freudenberg LS, Beyer T. Subjective perception of radiation risk. *Journal of Nuclear Medicine*. 2011;52(S2): 29S–35S. DOI: 10.2967/jnumed.110.085720.

Received: November 26, 2024

For correspondence: Yuliya N. Kapyrina –Assistant of the Department of General Hygiene, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation (Litovskaya Str., 2, Saint Petersburg, Russia, 194100; E-mail: kapyrina-yuliya@yandex.ru)

ORCID: 0000-0002-1018-5200

Artem M. Biblin – Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, 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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

Aleksandr V. Vodovатов – Candidate of Biological Sciences, 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 Wellbeing; docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Mikhail I. Komissarov – Candidate of Medical Sciences, Head of the Department of X-ray Surgical Methods of Diagnosis and Treatment, doctor for X-ray endovascular diagnostics and treatment, Children's Clinical Center after Roshal L.M., Moscow region, Krasnogorsk, Russia

ORCID: 0000-0003-4788-7561

For citation: Kapyrina Yu.N., Biblin A.M., Vodovатов A.V., Komissarov M.I. Awareness of interventional radiologists about radiation protection in medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 18–26. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-18-26

Содержание трития в прибрежных водах Дальневосточных регионов Российской Федерации в первый год контролируемого сброса воды с АЭС «Фукусима-1» (Предварительные данные)

В.С. Репин, К.В. Варфоломеева, А.М. Библин, К.А. Седнев, С.А. Зеленцова, Г.В. Архангельская

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 представлены результаты исследования содержания трития в морской воде, отобранной в период с сентября 2023 года по июнь 2024 года в прибрежных акваториях Дальневосточных регионов Российской Федерации, включая Камчатский, Приморский и Хабаровский края, Магаданскую и Сахалинскую области, а также Чукотский автономный округ. Целью исследования является определение фоновых значений объемной активности трития. Для определения фонового содержания трития в 185 пробах морской воды, отобранных специалистами территориальных органов Роспотребнадзора шести субъектов Дальневосточного федерального округа, был использован низкофоновый жидкостной сцинтилляционный спектрометрический радиометр альфа-, бета-излучения «Quantulus 1220». Результаты исследований показывают, что уровни удельной активности трития за период наблюдений с сентября 2023 года по июнь 2024 года составили $<10,0$ Бк/кг. Зарегистрированные уровни трития, в соответствии с НРБ-99/2009, существенно ниже уровня вмешательства (7600 Бк/л) для питьевой воды, получаемой из морской воды после опреснения.

Ключевые слова: тритий, удельная активность, морская вода, Тихий океан, Японское море, Охотское море, субъекты Дальневосточного федерального округа, АЭС «Фукусима-1».

Введение

Авария на АЭС «Фукусима-1», произошедшая 11 марта 2011 года в Японии, стала второй по масштабам радиационной аварией в истории после Чернобыля [1, 2]. В ходе ликвидации последствий аварии одной из проблем для японского оператора «Tokyo Electric Power Company Holdings» (TEPCO) стало накопление резервуаров радиоактивной водой [3–6] из-за необходимости подачи воды для охлаждения разрушенных реакторов и откачки грунтовых вод. С 2013 года на станции работает система очистки воды от радионуклидов ALPS, которая очищает воду до установленных нормативов, за исключением трития, очистка которого невозможна [7]. К августу 2023 года резервуары объемом 1,37 млн тонн, содержащие очищенную от радионуклидов воду (за исключением трития), были заполнены на 98%. МАГАТЭ одобрило план правительства Японии по контролируемому поэтапному сбросу очищенной воды с тритием в Тихий океан.

Для сброса очищенной от радионуклидов воды под дном океана специалисты TEPCO проложили туннель длиной 1,5 км [5]. Система сброса включает ряд основных компонентов:

- средства для измерения и подтверждения того, что сбрасываемая вода, за исключением трития, соответствует национальным нормативным требованиям;
- устройство для перекачивания сбрасываемой воды;
- установка для разбавления, позволяющая снизить концентрацию трития до 1500 Бк/л, что соответствует требованиям для сброса;

- разгрузочная установка, включающая вертикальную шахту для разгрузки, разгрузочный туннель и выпускное отверстие;

- система контроля и подготовки воды к сбросу.

Контролируемые сбросы очищенной воды планируется осуществлять в течение примерно 30 лет.

С 24 августа по 11 сентября 2023 года была сброшена первая партия очищенной от радионуклидов воды объемом 7 788 м³ с содержанием трития 14×10^4 Бк/л [8]. К октябрю 2024 года было проведено 9 сбросов с общим объемом тритиевой воды до разбавления — 37 948 м³ [9].

Мониторинг содержания трития в сбрасываемой воде и в водах акватории АЭС «Фукусима-1» осуществляется независимо TEPCO, Министерством окружающей среды Японии и администрацией префектуры Фукусима, а также специалистами МАГАТЭ. В большинстве проб, отобранных в акватории, объемная активность трития не превышала 10 Бк/л, однако в некоторых точках достигала 63 Бк/л [10]. Согласно ранее проведенным исследованиям уровень содержания трития в поверхностных слоях и в толще воды северо-западной части Тихого океана до аварии составлял 0,4–1,3 ТЕ (0,15 Бк/л) [11].

Ряд стран и территорий Северо-Восточной Азии осуществляют мониторинг содержания трития в своих территориальных водах. Согласно данным Государственного управления по ядерной безопасности в Китайской Народной Республике, содержание трития в прибрежных водах за 2023 год достигает 2,0 Бк/кг [12]. По данным мониторинга Гонконгской обсерватории удельная активность трития

Репин Виктор Степанович

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.Repin@mail.ru

в морской воде в 2023 году находилась в диапазоне 0,3–1,7 Бк/кг [13]. Содержание трития в водах, омывающих Тайвань, по результатам мониторинга Министерства науки и технологии и Национального центра по исследованию ядерной энергии в 2023 году достигает 2,11 Бк/кг [14]. В Южной Корее, согласно данным Корейского института ядерной безопасности, уровень содержания трития в морской воде составляет менее 6,1 Бк/кг [15].

В Российской Федерации мониторинг за содержанием трития в поверхностных водоемах и осадках осуществляет Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), однако исследование содержания трития в морских водах в рамках программы мониторинга не предусмотрено [16].

Согласно многолетним исследованиям Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева, содержание трития в дальневосточных морях до начала сброса накопленных вод с АЭС «Фукусима-1» находилось в пределах от 0,20 до 1,60 ТЕ (0,02–0,19 Бк/л). Исследования 2024 года показали, что содержание трития варьирует от 0,40 до 0,78 ТЕ (0,05–0,09 Бк/кг). Наибольшие значения были зафиксированы в основной ветви течения Куроисио и около Южных Курил [17].

Зарегистрированные уровни трития в воде исследованных акваторий не превышают глобальные фоновые уровни содержания трития в морской воде [18–24].

Согласно результатам исследования радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана, проведенного специалистами Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), содержание трития в морской воде не превышало 2 Бк/кг [25].

В связи с началом долгосрочного сброса очищенной радиоактивной воды с тритием с АЭС «Фукусима-1» в Тихий океан, Коллегия Роспотребнадзора 30 ноября 2023 года приняла решение организовать совместный мониторинг фонового содержания трития в морской воде Дальневосточных регионов России. В мониторинге участвуют ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева и центры гигиены и эпидемиологии в Камчатском, Приморском и Хабаровском краях, а также в Магаданской, Сахалинской областях и Чукотском автономном округе.

Цель исследования – определить фоновые уровни содержания трития в прибрежной морской воде акваторий шести субъектов Дальневосточного федерального Округа Российской Федерации как критерия для анализа возможных изменений его концентраций в будущем.

Материалы и методы

Выбор мест для отбора проб морской воды в первую очередь определялся исходя из транспортной доступности и технических возможностей территориальных органов Роспотребнадзора, а также стабильности течений, близости береговой линии и глубины забора проб. Пробы морской воды отбирали на расстоянии 1 и 500 м от береговой

линии. Часть проб была отобрана на расстояниях 1 000 и 1 500 м., когда это позволяли технические возможности. В каждой точке один раз в квартал отбирали по 2 пробы с поверхности воды и с глубины 5 метров. На рисунке представлены населенные пункты, рядом с которыми производился отбор проб.

Согласно методике выполнения измерений активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов в жидких и твердых пробах с использованием радиометра альфа-, бета-излучения спектрометрического «Quantulus 1220» во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (свидетельство об аттестации № 45014.15225/RA.RU.311243, аттестована ФГУП «ВНИИФТРИ»), морскую воду отбирали в чистые стеклянные емкости, объемом по 500 мл, каждую пробу подкисляли концентрированной азотной кислотой до уровня pH = 3–4. Для минимизации обмена трития с атмосферной влагой, емкости с пробами герметично закрывали. Затем емкости подписывали согласно акту отбора проб. В акте указывали наименование близлежащего населенного пункта, координаты точек отбора, глубину, дату и время отбора, климатические параметры, объем пробы, ФИО и должность, структурное подразделение отбравшего пробы и его контактные данные. Отобранные образцы проб отправляли на дальнейшее исследование в испытательный лабораторный центр ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Методом двойной дистилляции пробы морской воды очищали от солей и сопутствующих радионуклидов. Пробы счетного образца после дистилляции готовили в измерительной вiale объемом 20 мл путем смешивания 10 мл дистиллята с 10 мл сцинтилляционного коктейля Optifase HiSafe III производства PerkinElmer™ (США).

Приготовленные пробы тщательно перемешивали и помещали в охлажденную измерительную камеру прибора, где для подавления фото- и хемилюминесценции их выдерживали в течение 8–12 часов, после чего запускали серию измерений. Все измерения проб трития в морской воде выполняли в течение 3–6 часов на низкофоновом жидкостном сцинтилляционном спектрометрическом радиометре альфа-, бета-излучения «Quantulus 1220» (США, фирма «АМТЕК», торговая марка ORTEC 2010 г.).

Для обеспечения стабильности условий измерений перед каждой серией определения содержания трития в пробах морской воды, а также в конце, проводили контроль фонового образца и стандартного образца трития, прилагаемого к прибору [26]. Статистическая обработка результатов выполнена средствами MS Excel. Графические построения выполнены средствами MS Excel, картографические построения – с использование QGIS.

В таблице 1 представлено общее количество проб морской воды, поступивших из Дальневосточного федерального округа с 2023 года по сентябрь 2024 года¹.

В таблице 2 показано количество проб, отобранных специалистами ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» субъектов Дальневосточного региона РФ за исследуемый период в зависимости от расстояния до береговой линии.



Рис. Карта-схема точек отбора морской воды в Дальневосточных регионах
[Fig. Scheme of seawater sample points in the Far Eastern regions of the Russian Federation]

Общее количество проб морской воды, поступивших из Дальневосточного федерального округа с 2023 года по сентябрь 2024 года
[Table 1

Total number of seawater samples from the Far Eastern Federal District from 2023 through September 2024]
[Table 1

Субъекты Российской Федерации [Subjects of the Russian Federation]	Год [Year]	
	2023	2024
Камчатский край [Kamchatka Kray]	20	44
Магаданская область [Magadan Oblast]	2	4
Приморский край [Primorsky Kray]	27	24
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	–	36
Хабаровский край [Khabarovsk Kray]	–	10
Чукотский АО [Chukotka Autonomous Okrug]	–	18
Всего [Total]	49	136

Таблица 2

**Распределение количества проб морской воды в зависимости от расстояния до береговой линии
за исследуемый период**

[Table 2]

Distribution of the number of seawater samples depending on the distance to the coastline during the study period]

Субъекты Российской Федерации [Subjects of the Russian Federation]	Расстояние от береговой линии, м. [Distance from coastline, m]			Всего [Total]
	≤1	500	1000 – 1500	
Камчатский край [Kamchatka Kray]	7	21	36	64
Магаданская область [Magadan Oblast]	4	2	0	6
Приморский край [Primorsky Kray]	16	33	2	51
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	13	23	0	36
Хабаровский край [Khabarovsk Kray]	4	6	0	10
Чукотский АО [Chukotka Autonomous Okrug]	6	12	0	18
Всего [Total]	50	97	38	185

Результаты и обсуждение

Удельная активность трития во всех 185 пробах морской воды, отобранных из мониторинговых точек в акваториях внутренних морей и Тихого океана Дальневосточных регионов, была менее 10,0 Бк/кг. Статистически значимых различий в удельной активности трития в зависимости от расстояния от берега в пределах до 1000–1500 м не обнаружено.

Согласно результатам исследований по моделированию переноса трития от места сброса, наиболее активная часть пятна загрязнения морской воды перемещается течением Куросио к восточному побережью Америки и достигает берегов Камчатки спустя несколько лет [27, 28]. Вихревые потоки на периферии радиоактивного пятна хотя и способствуют в течение первого года заносу трития в Японское и Охотское моря, а также к южной оконечности полуострова Камчатка, однако уровни удельной активности трития на периферии оцениваются сотыми и тысячными долями Бк/м³, что делает их неразличимыми на фоне естественных уровней. Косвенным свидетельством отсутствия поступления значимых уровней трития в прибрежные воды дальневосточных регионов России является также отсутствие достоверных различий в удельной активности трития в прибрежных зонах Тихого океана и внутренних морей.

Зарегистрированные уровни трития, в соответствии с НРБ-99/2009, существенно ниже уровня вмешательства (7600 Бк/л) для питьевой воды, получаемой из морской воды после опреснения.

Заключение

1. Средние уровни удельной активности трития за период наблюдений с сентября 2023 года по июнь 2024 года составили < 10,0 Бк/кг.
2. Целесообразно продолжать осуществлять мониторинг содержания трития в прибрежных водах Дальневосточных регионов Российской Федерации.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Репин В.С. – разработка дизайна исследования, определение цели и задач, организация отбора проб морской воды, анализ полученных данных и написание статьи.

Варфоломеева К.В. – организация сбора проб морской воды, оформление результатов измерений, анализ литературных данных, написание промежуточного варианта статьи.

Библин А.М. – анализ литературных данных, подготовка промежуточного варианта статьи.

Седнев К.А. – анализ литературных данных, подготовка проб и проведение измерения трития, подготовка табличных и картографических материалов.

Зеленцова С.А. – организация сбора проб воды, оформление результатов измерений, анализ литературных данных.

Архангельская Г.В. – редактирование промежуточного варианта статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам ФБУЗ Центр гигиены и эпидемиологии в Приморском, Камчатском и Хабаровском крае, а также в Сахалинской и Магаданской областях и Чукотском автономном округе за их участие в своевременном отборе и отправке проб морской воды в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Исследование уровней трития в морской воде Дальневосточных регионов Российской Федерации».

Литература

1. 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.
2. International Atomic Energy Agency. The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General. IAEA, 2015. 208 p.
3. Yamanishi T., Kakiuchi H., Tsuchi H., et al. Discussions on Tritiated Water Treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station // Fusion Science and Technology. 2020. Vol. 76, № 4. P. 430–438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
4. Боровой А.А., Гаврилов С.Л., Хвошинский В.А. Фукусима. Проблема воды. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2024. 44 с.
5. IAEA Comprehensive Report on the safety review of the ALPS -treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. IAEA, 2023. 129 p.
6. Plan for the Stabilization and Treatment of Waste generated by Contaminated Water Purification and Treatment Facilities. URL: https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/water_treatment/images/200619.pdf. (Дата обращения: 16.09.2024).
7. Buesseler K.O. Opening the floodgates at Fukushima // Science. 2020. Vol. 369. № 6504. P. 621–622. DOI: 10.1126/science.abc1507.
8. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Completion of the Discharge from Measurement/Confirmation Facility Tank Group B (First Discharge). URL: https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2023/reference_20230911_01-e.pdf (Дата обращения: 16.09.2024).
9. ALPS Treated Water Discharge Status Update. URL: https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2024/reference_20240926_02-e.pdf (Дата обращения: 16.09.2024).
10. Overarching Radiation monitoring data Browsing System around Japan URL: <https://www.monitororbs.jp/en/qmap.html> (Дата обращения: 16.09.2024).
11. IAEA. Technical Reports Series № 495. Tritium in the Environment. Preprint. 2024. 272 p.
12. National Nuclear Safety Administration. URL: <https://nnsa.mee.gov.cn/ztzl/haqbg/fshjzlbq/202407/P020240718535044630888.pdf> (Дата обращения: 16.09.2024).
13. Hong Kong observatory. URL: <https://www.hko.gov.hk/en/radiation/monitoring/seawater.html> (Дата обращения: 16.09.2024).
14. Ocean radioactive Information System. URL: <https://tworis.aec.gov.tw/monitorvalue.php> (Дата обращения: 16.09.2024).
15. Korea Institute of Nuclear Safety. URL: <https://nsic.nssc.go.kr/marine/marineMonitoring.do> (Дата обращения: 16.09.2024).
16. Радиационная обстановка по территории России и сопредельных государств в 2022 г. Ежегодник. НПО «Тайфун». Обнинск, 2023. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2022.pdf (Дата обращения: 08.07.2024).
17. Лобанов В.Б., Горячев В.А., Сергеев А.Ф., Будянский М.В. Нужно ли бояться «фукусимского трития»? URL: <https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/News/News/Нужно%20ли%20бояться%20-%20на%20сайт-мс.pdf> (Дата обращения: 03.10.2024).
18. Бондарева Л.Г., Чеботина М.Я., Артамонова И.Г., Тананаев И.Г. Тритий. Теория, практика, последствия: монография. Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2024. 359 с.
19. Антонова Е.В., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Панченко С.В. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде // Экология. 2022. №4. С. 255–288.
20. Investigation of the environmental fate of tritium in the atmosphere. Part of the Tritium Studies Project. Ottawa: CCNS, 2009. 104 p.
21. Момот О.А., Силин И.И., Сынзыныс Б.И., Козьмин Г.В. Оценка радиационного риска для здоровья населения при наличии трития в питьевой воде. Идентификация опасности // Экология энергетики. 2007. С. 84–91.
22. Management of waste containing tritium and carbon-14. Vienna: IAEA, 2004. 109 p.
23. Okada S., Momoshima N. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems // Health Physics. 1993. Vol. 65, № 6. P. 595–609.
24. Кесслер Г. Ядерная энергетика. М.: Энергоатомиздат, 1986. 261 с.
25. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15.
26. Репин В.С., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А. и др. Методические особенности наблюдения за многолетней динамикой малых уровней трития в окружающей среде // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 91–100. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-91-100.
27. Zhao C., Wang G., Zhang M. et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 169. No. 112515. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112515.
28. Будянский М.В., Удалов А.А., Лебедева М.А., Белоненко Т.В. Оценка загрязнения вод Южно-Курильской рыболовной зоны России радиоактивными водами АЭС «Фукусима-1» на основе лагранжева моделирования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 515, № 1. С. 164–174. DOI: 10.31857/S2686739724030212.

Поступила: 17.10.2024

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: v.repin@mail.ru

Варфоломеева Ксения Владимировна – 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

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

Седнев Константин Андреевич – 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

Зеленцова Светлана Александровна – 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

Архангельская Генриетта Владимировна – доктор медицинских наук, главный 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

Для цитирования: Репин В.С., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Библин А.М., Седнев К.А., Архангельская Г.В. Содержание трития в прибрежных водах Дальневосточных регионов Российской Федерации в первый год контролируемого сброса воды с АЭС «Фукусима-1» (Предварительные данные) // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 27–34. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-27-34

Tritium concentrations in coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation in the first year of controlled water discharge from the Fukushima–1 NPP (Preliminary results)

Victor S. Repin, Kseniya V. Varfolomeeva, Artem M. Biblin, Konstantin A. Sednev,
Svetlana A. Zelentsova, Genrietta V. Arkhangelskaya

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

The article presents results of a study on the tritium concentrations in seawater samples collected from September 2023 to June 2024 in coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation, including Primorsky, Kamchatka, and Khabarovsk Krai; Sakhalin and Magadan Oblasts; and the Chukotka Autonomous Okrug. The aim of the study is to determine the background values of tritium volume activity. The low-background liquid scintillation spectrometer-radiometer for alpha and beta radiation "Quantulus 1220" was used to determine the baseline tritium content in 185 seawater samples collected by specialists from the territorial bodies of Rospotrebnadzor in six subjects of the Far Eastern Federal District. The results indicate that the specific activity levels for the observation period from September 2023 to June 2024 were below 10.0 Bq/kg in samples collected from the coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation. The recorded tritium levels are significantly below the intervention level for drinking water (7600 Bq/L) as per NRB-99/2009, which applies to desalinated seawater.

Key words: tritium, specific activity, seawater, Pacific Ocean, Sea of Japan, Sea of Okhotsk, subjects of the Far Eastern Federal District, Fukushima–1 NPP.

Authors' personal contribution

Repin V.S. developed design of the study, determined aims and objectives, participated in the organization of sea water sampling, participated in the analysis of the obtained data and writing the article.

Varfolomeeva K.V. participated in organizing the collection of seawater samples, formalized the results of measurements, analyzed the literature data, prepared draft of the manuscript.

Biblin A.M. analyzed literature data, prepared draft of the manuscript.

Sednev K.A. analyzed the literature data, carried out sample preparation and measurements of tritium, developed cartographic materials.

Zelentsova S.A. participated in organizing the collection of seawater samples, formalized the results of measurements, analyzed the literature data, prepared draft of the manuscript.

Arkhangelskaya G.V. edited the draft of the manuscript.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the specialists of the Rospotrebnadzor Centers for Hygiene and Epidemiology

Viktor S. Repin

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

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

in Primorsky, Kamchatka and Khabarovsk Krai, Sakhalin and Magadan Oblasts and Chukotka Autonomous Okrug for collecting and sending seawater samples to the P.V. Ramzaev Research Institute of Radiation Hygiene.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the research work «Investigation of tritium levels in sea water of the Far Eastern regions of the Russian Federation».

References

1. Fukushima-1" NPP Accident: radiological consequences and lessons. Ed. by acad. of RAS GG Onishenko and prof. AYu Popova. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after prof. P.V. Ramzaev; 2021. 388 p. (In Russian).
2. International Atomic Energy Agency. The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General. IAEA; 2015. 208 p.
3. Yamanishi T, Kakiuchi H, Tauchi H, Yamamoto T, Yamamoto I. Discussions on tritiated water treatment for Fukushima Daiichi nuclear power station. *Fusion Science and Technology*. 2020;76(4): 430–438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
4. Borovoy AA, Gavrilov SL, Khvoshchinsky VA. Fukushima. The water problem. Moscow: Kurchatov Institute; 2024. 44 p. (In Russian).
5. IAEA Comprehensive Report On The Safety Review Of The ALPS-Treated Water At The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. IAEA; 2023. 129 p.
6. Plan for the Stabilization and Treatment of Waste generated by Contaminated Water Purification and Treatment Facilities. Available from: <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/images/200619.pdf> (Accessed: September 16, 2024).
7. Buesseler KO. Opening the floodgates at Fukushima. *Science*. 2020; 369(6504): 621–622. DOI: 10.1126/science.abc1507.
8. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Completion of the Discharge from Measurement. Confirmation Facility Tank Group B (First Discharge). Available from: https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2023/reference_20230911_01-e.pdf (Accessed: September 16, 2024).
9. ALPS Treated Water Discharge Status Update. Available from: https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2024/reference_20240926_02-e.pdf (Accessed: September 16, 2024).
10. Overarching Radiation monitoring data Browsing System around Japan. Available from: <https://www.monitororbs.jp/en/qmap.html> (Accessed: September 16, 2024).
11. IAEA. Technical Reports Series № 495. Tritium in the Environment. Preprint. 2024. 272 p.
12. National Nuclear Safety Administration. Available from: <https://nnsa.mee.gov.cn/ztlz/haqbg/fshjzlbq/202407/P020240718535044630888.pdf> (Accessed: September 16, 2024).
13. Hong Kong observatory. Available from: <https://www.hko.gov.hk/en/radiation/monitoring/seawater.html> (Accessed: September 16, 2024).
14. Ocean Radioactive Information System <https://tworis.aec.gov.tw/monitorvalue.php> (Accessed: September 16, 2024).
15. Korea Institute of Nuclear Safety. Available from: <https://nsic.nssc.go.kr/marine/marineMonitoring.do> (Accessed: September 16, 2024).
16. Radiation situation on the territory of Russia and neighboring countries in 2022. Yearbook. NPO "Typhoon". Obninsk; 2023. Available from: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2022.pdf (Accessed: July 8, 2024). (In Russian).
17. Lobanov VB, Goryachev VA., Sergeev AF, Budyansky MV. Is it necessary to be afraid of "Fukushima tritium"? Available from: <https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/News/Нужно%20ли%20бояться%20-%20на%20сайт-mc.pdf> (Accessed: October 3, 2024). (In Russian).
18. Bondareva LG, Chebotina MYa, Artamonova IG, Tananaev IG. Tritium. Theory, practice, consequences. Monograph. Apatity: Publishing house of the Kola Scientific Center; 2024. 359 p. (In Russian).
19. Antonova EV, Antonov KL, Vasyanovich ME, Panchenko SV. Tritium from a molecule to the biosphere. 1. Patterns of behavior in the environment. *Ekologiya = Ecology*. 2022;4: 255–288. (In Russian).
20. Investigation of the environmental fate of tritium in the atmosphere. Part of the Tritium Studies Project. Ottawa: CCNS; 2009. 104.
21. Momot OA, Silin II, Synzynin BI, Kozmin GV. Assessment of radiation risk to public health in the presence of tritium in drinking water. Hazard identification. *Ekologiya energetiki = Ecology of energy*. 2007; 84–91. (In Russian).
22. Management of waste containing tritium and carbon-14. Vienna: IAEA; 2004. 109 p.
23. Okada S, Momoshima N. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems. *Health Physics*. 1993;65(6): 595–609.
24. Kessler G. Nuclear power engineering. Moscow: Energoatomizdat; 1986. 261 p.
25. Onischenko GG, Popova AYu, Romanovich IK, Ivanov SA, Biblin AM, Repin VS, et al. Results of the fourth combined scientific expedition for the radiation monitoring in the Kuril-Kamchatka region of the Pacific ocean. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15. (In Russian).
26. Repin VS, Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Arkhangelskaya GV, Sednev KA. Methodological features of monitoring the long-term dynamics of low levels of tritium in the environment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 91–100. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-91-100 (In Russian).
27. Zhao C, Zhao C, Wang G, Zhang M, Wang G, de With G, et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;169(112515). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112515
28. Budyansky MV, Udalov AA, Lebedeva MA, Belonenko TV. Assessment of pollution of the waters in the South Kuril fishing zone of Russia by radioactive waters from the Fukushima-1 NPP based on Lagrangian modeling. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth sciences*. 2024;515(1): 164–174. DOI: 10.31857/S2686739724030212 (In Russian).

Received: October 17, 2024

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)

Kseniya V. Varfolomeeva – Research Fellow, 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

Artem M. Biblin – Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, 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

Konstantin A. Sednev – Junior Researcher, 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

Svetlana A. Zelentsova – Research Fellow, 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

Genrietta V. Arkhangelskaya – Doctor of Medical Sciences, Chief 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

For citation: Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Biblin A.M., Sednev K.A., Zelentsova S.A., Arkhangelskaya G.V. Tritium concentration in coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation in the first year of controlled water discharge from the Fukushima-1 NPP (Preliminary results). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 27–34. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-27-34

Результаты индивидуального дозиметрического контроля кожи рук персонала, занятого при работе с радиофармацевтическими препаратами

Е.Н. Шлеенкова, С.Ю. Бажин, В.Ю. Богатырёва

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

С активным развитием и широким использованием позитронно-эмиссионной томографии обеспечение радиационной безопасности в вопросах облучения кожи кистей рук персонала стало очень актуальным. Работа с радиофармацевтическими препаратами, меченными различными радионуклидами, отличается достаточно близким контактом с источником ионизирующего излучения, при котором кожа рук может быть облучена в существенных дозах. Таким образом, воздействие ионизирующего излучения на кожу рук является одной из основных проблем радиационной защиты персонала центров ядерной медицины. Работу персонала центров ядерной медицины в зависимости от характера выполняемых действий можно условно поделить на два типа: преимущественно ручные процессы (медицинские сестры – фасовка и введение препаратов, химики-аналитики – контроль качества) и преимущественно автоматизированные процессы (инженеры-радиохимики – синтез, фасовка во флаконы). Методом термолуминесцентной дозиметрии с использованием индивидуальных дозиметров, откалиброванных в терминах $H_p(0,07)$, были оценены индивидуальные эквивалентные дозы в коже рук медицинских сестёр, химиков-аналитиков и инженеров-радиохимиков, проводящих работы с радиофармацевтическими препаратами на основе ^{18}F . Максимальное полученное годовое значение для инженеров-радиохимиков – 7,8 мЗв, что составляет 1,56% от предела дозы, а для химиков-аналитиков – 171 мЗв, что составляет 34% от предела дозы (среднее значение – 28 мЗв, медиана – 8,8 мЗв, минимальное значение – 4,6 мЗв). При этом медицинские сестры, занимающиеся преимущественно фасовкой и введением радиофармацевтических препаратов, имеют более высокие значения годовых доз в коже рук (среднее значение – 114 мЗв, медиана – 56 мЗв, минимальное значение – 1,3 мЗв). Максимальное значение годовой дозы в коже рук, зафиксированное во время проведения работы, для медицинской сестры составило 573 мЗв, т.е. предел дозы 500 мЗв был превышен. Результаты работы свидетельствуют о том, что специалисты, задействованные в ручных процессах при проведении манипуляций с радиофармацевтическими препаратами, требуют особого внимания с позиций индивидуального дозиметрического контроля дозы облучения кожи рук и соблюдения требований радиационной безопасности.

Ключевые слова: позитронно-эмиссионная томография, индивидуальный эквивалент дозы $H_p(0,07)$, эквивалентная доза в коже, радиофармацевтический препарат, персонал.

Введение

Позитронно-эмиссионная томография (двухфотонная эмиссионная томография) (ПЭТ) – является одним из современных высокоинформативных радионуклидных томографических методов исследования внутренних органов человека. ПЭТ позволяет в полной мере оценить распространенность опухолевого процесса, дает возможность измерения абсолютной активности в исследуемом органе и количественную оценку физиологических процессов [1].

Фтордезоксиглюкоза, меченная атомом ^{18}F (^{18}F -ФДГ), является самым распространенным радиофармацевтическим препаратом (РФП) и используется для диагностики почти 90% онкологических заболеваний, оценки качества проводимого лечения и прогнозирования течения заболевания [2]. Чаще всего радионуклиды для РФП, применяе-

мые в ПЭТ-диагностике, получают на циклотроне, который располагается непосредственно в самом медицинском учреждении или в непосредственной близости к нему, что обусловлено коротким периодом полураспада большинства используемых позитрон-излучающих радионуклидов, измеряемым минутами. Проведение ПЭТ с использованием радионуклида ^{18}F характеризуется бета⁺-излучением с энергией ниже 700 кэВ [3]. В процессе аннигиляции позитрона с электроном образуются два гамма-кванта с энергией по 511 кэВ. Период полураспада ^{18}F составляет 109,7 мин [4], что делает возможным доставку ^{18}F -ФДГ в центры, оборудованные ПЭТ, но не имеющие собственного производства РФП [5].

Воздействие ионизирующего излучения на кожу рук является одной из основных проблем радиационной защиты персонала центров ядерной медицины (ЯМ), осуществля-

Шлеенкова Екатерина Николаевна

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: eshleenkova@mail.ru

ющих приготовление, фасовку и введение пациентам РФП. НРБ-99/2009¹ предписывают контролировать значения годовой эквивалентной дозы облучения кожи рук, операционной величиной для которой является индивидуальный эквивалент дозы $H_p(0,07)$. Годовой предел эквивалентной дозы в коже составляет 500 мЗв в год. Контроль эквивалентной дозы облучения кожи рук является одной из составляющих частей индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) и в последнее время стал более актуальным в связи с ростом числа ПЭТ-центров в России. Так, в 2015 г. в Российской Федерации по данным [6] насчитывалось 54 ПЭТ-сканера, а в 2022 г. в городах с населением более 0,5 млн. человек размещены уже порядка 60 ПЭТ-центров [7]; следовательно, растет и количество персонала, задействованного в работах с использованием РФП в своей профессиональной деятельности. При этом дозы облучения всего тела персонала в центрах ЯМ в основном невелики, и их можно легко контролировать с помощью пассивных персональных дозиметров, носимых на груди, что подтверждается собственными измерениями лаборатории радиационного контроля, выполняемыми в рамках проведения текущего ИДК в организациях, и данными Европейской платформы [8]. В процессе фасовки, отпуска и введения пациентам РФП персоналу приходится более близко контактировать с радионуклидами, вследствие чего они могут получить значительные дозы облучения именно кожи рук. Тема дозиметрии кожи рук в медицине была предметом проектов CONRAD (2002–2006) [9] и ORAMED (2008–2011) [10]. Она была рассмотрена в Приложении Е к Публикации 106 [11] МКРЗ. На основе результатов измерений, проведенных в 20 отделениях ЯМ, исследование ORAMED пришло к выводу, что почти каждый пятый работник ЯМ может получить эквивалентную дозу облучения кожи, превышающую предельную годовую дозу в 500 мЗв. В [12] сделан вывод о том, что среди производственных процедур, выполняемых персоналом, наибольшие дозы ионизирующего излучения были получены персоналом во время контроля качества ^{18}F -ФДГ. Максимальная расчетная годовая доза $H_p(0,07)$ для химиков из отдела контроля качества может превышать годовую предельную дозу для кожи (500 мЗв). Но в данной статье сказано о том, что у персонала не было четкого разделения по обязанностям; определенные процедуры (такие, как производство РФП, контроль качества и фасовка) могли выполняться одним человеком, т.е. сотрудники взаимозаменяемы. Сделан вывод о том, что специализация на выполнении конкретных видов деятельности/процедур сокращает время выполнения процедур, что, в свою очередь, приводит к снижению доз. Автоматизация производства ^{18}F -ФДГ способствует оптимизации радиационной защиты персонала [13, 14]. Сочетание автоматически выполняемых производственных процедур с фрагментами ручной работы, выполняемой в рамках контроля качества РФП, приводит к увеличению облучения рук.

Цель исследования – оценить реальные значения доз облучения кожи рук работников центров ЯМ (медицинских сестёр и радиохимиков) при работе с РФП на основе ^{18}F в ПЭТ-центрах Российской Федерации

Задачи исследования

1. Анализ протоколов ИДК с результатами измерений индивидуального эквивалента дозы в коже рук $H_p(0,07)$ работников центров ЯМ.
2. Оценка условий работы персонала и выделение групп персонала со схожими сценариями облучения;
3. Анализ результатов измеренных эквивалентов доз облучения кожи рук у выделенных групп персонала.

Материалы и методы

Материалами для работы послужили протоколы ИДК с результатами измерений индивидуального эквивалента дозы в коже рук $H_p(0,07)$ работников центров ЯМ.

В рамках проведения ИДК персонала отделений ЯМ накопленные дозы регистрировались с помощью индивидуальных термолюминесцентных дозиметров, отвечающих требованиям для определения индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения кожи $H_p(0,07)$, Finger Ring Type G² (Россия). Данный тип дозиметров представляет собой перстень с регулируемой по размеру окружностью кольца. Дозиметр содержит в своем корпусе из тканеэквивалентного материала один детектор ДТГ-4 (LiF: Mg, Ti). Со слов ответственных за радиационную безопасность в исследуемых организациях, дозиметр размещался на левой (не ведущей) руке в основании среднего либо безымянного пальцев с расположением детектора в сторону ладони; одна из организаций дополнительно осуществляла ношение дозиметров также и на правых руках персонала в основании среднего либо безымянного пальцев, такое положение является рекомендуемым [15]. Ношение осуществлялось регулярно на протяжении каждого из кварталов в течение каждого года с ежеквартальной сменой дозиметров и поквартальными измерениями. Считывание производилось с помощью комплекса дозиметрического термолюминесцентного «ДОЗА-ТЛД». Диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$: 0,02–10000 мЗв. Основная относительная погрешность измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$ в диапазоне от 0,05 мЗв до 100 мЗв фотонного излучения с энергией от 15 кэВ до 3 МэВ не превышает $\pm 30\%$. Вклад позитронов в дозу не учитывался. Калибровка дозиметров производилась согласно методике³. Переход от индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$ к эквивалентной дозе в коже осуществлялся с использованием коэффициента, равного 1.

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 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009, 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 №. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration №. 14534. (In Russ.)]

² Паспорт ФВКМ.412113.075ПС Дозиметр термолюминесцентный Finger Ring Type G. [Passport ФВКМ.412113.075ПС Thermoluminescent dosimeter Finger Ring Type G. (In Russ.)]

³ Методика поверки ФВКМ.412118.010МП Комплексы дозиметрические термолюминесцентные «ДОЗА-ТЛД». [Verification Methodology ФВКМ.412118.010МП Thermoluminescent Dosimetric Complexes «DOZA-TLD». (In Russ.)]

Измерения индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(0,07)$ проводились для 14 ПЭТ-центров и 2 центров, занимающихся производством РФП. Работа персонала была связана с изготовлением, фасовкой и введением ^{18}F -ФДГ. Работа с другими радионуклидами данным персоналом не проводилась.

Персонал был поделен на группы в зависимости от характера работы:

1. Медсестры: работают в ПЭТ-центрах (122 измеренных квартальных значения, 24 годовых значения);
2. Химики-аналитики: работают на производстве РФП для ПЭТ-центров (50 измеренных квартальных значения, 11 годовых значений).
3. Инженеры-радиохимики: работают на производстве РФП для ПЭТ-центров (25 измеренных квартальных значения, 4 годовых значения).

В обязанности инженера-радиохимика входит синтез и фасовка препарата во флаконы – автоматизированные процессы, в обязанности химика-аналитика входит контроль качества РФП – ручной процесс.

В обязанности медсестры входила фасовка РФП по шприцам, измерение активности каждого шприца, введение РФП пациентам – все эти процессы во включенных в работу центрах были ручными.

В работе представлен анализ результатов мониторинга квартальных и годовых эквивалентных доз облучения кожи рук, оцененных на основании измерений индивидуальных эквивалентов дозы $H_p(0,07)$ с использованием индивидуальных термолюминесцентных дозиметров. Годовые оцененные индивидуальные значения эквивалентных доз рассчитывались для каждого сотрудника, отработавшего последовательно все 4 квартала за каждый календарный год путем сложения доз за 4 квартала (период наблюдения с 2020 года по 2023 год). Отдельно были определены теоретические расчетные значения годовых эквивалентных доз: полученные квартальные значения умножались на 4; при учете квартальных значений использовались только те значения эквивалентной дозы облучения кожи рук, которые отличались от показаний фоновых дозиметров в данной организации.

Результаты измерений были обработаны с использованием программного обеспечения Statistica 10.

Результаты и обсуждение

Производство позитрон-излучающих РФП включает 3 основных этапа: наработку позитрон-излучающего изотопа, синтез на его основе РФП (введение изотопа в биологически активную молекулу), фасовку в упаковку и контроль качества полученного РФП. Контроль качества произведенной партии осуществляется химиками-аналитиками в лаборатории контроля качества согласно требованиям внутренней нормативной документации, разработанной в соответствии с требованиями Государственной фармакопеи. Внешний вид оценивается в вытяжном защитном шкафу за защитным свинцовым стеклом [5]. Процессы синтеза и фасовка во флаконы, выполняемые инженерами-радиохимиками, являются автоматизированными, поэтому контакт кожи рук персонала с радионуклидами минимален. В обязанности медсестры входят преимущественно только

ручные процессы такие как: фасовка РФП по шприцам, измерение активности каждого шприца, введение РФП пациентам. При таких манипуляциях, выполняемых руками, в контролируемых нами организациях, использовались дополнительные средства защиты персонала: контейнеры на основе вольфрама, катетеры для введения препарата, обеспечивающие минимизацию контакта рук медицинских сестёр с РФП.

На рисунках 1–5 представлены распределения значений квартальных и годовых значений индивидуального эквивалента дозы облучения кожи рук $H_p(0,07)$ контролируемого персонала. На всех приведенных рисунках распределений представлен широкий разброс значений индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$ среди персонала. Дозы облучения кожи рук у инженеров-радиохимиков и химиков-аналитиков, работающих на производстве РФП для ПЭТ-центров, не превышали годового предела 500 мЗв. Максимальное полученное годовое значение у инженера-химика – 7,8 мЗв – 1,56% от предела дозы (среднее значение – 5,2 мЗв, минимальное значение – 2,9 мЗв). Максимальное полученное годовое значение у химика-аналитика – 171 мЗв составило всего лишь 34% от предела дозы (среднее значение – 28 мЗв, медиана – 8,8 мЗв, минимальное значение – 4,6 мЗв). При этом медсестры, занимающиеся преимущественно фасовкой и введением РФП, могут иметь более высокие значения годовых доз облучения кожи рук (среднее значение – 114 мЗв, медиана – 56 мЗв, минимальное значение – 1,3 мЗв). Максимальное значение годовой дозы, зафиксированное во время проведения работы, составило 573 мЗв, т.е. был превышен установленный в НРБ-99/2009 предел дозы 500 мЗв.

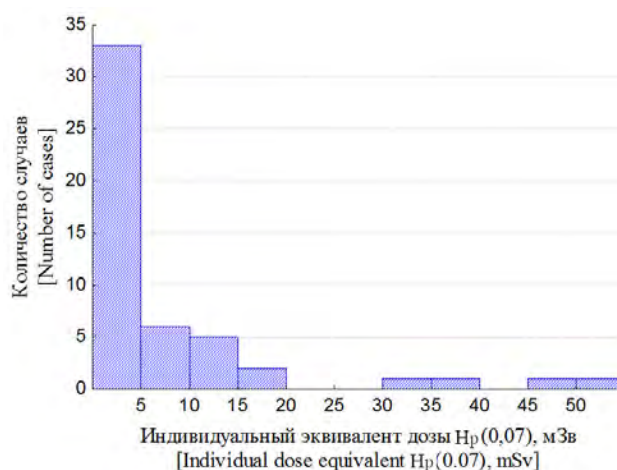


Рис. 1. Распределение квартальных индивидуальных эквивалентов дозы облучения кожи рук у химиков-аналитиков на производстве РФП для ПЭТ-центров (N=50, ср. знач. = 7,5 мЗв, медиана = 2,9 мЗв, мин. = 0,4 мЗв, макс. = 54 мЗв)

[Fig. 1. Distribution of skin quarterly equivalent doses due to irradiation of hands of analytical chemists in the production of radiopharmaceuticals for PET centers (N=50, mean = 7.5 mSv, median = 2.9 mSv, min. = 0.4 mSv, max. = 54 mSv)]

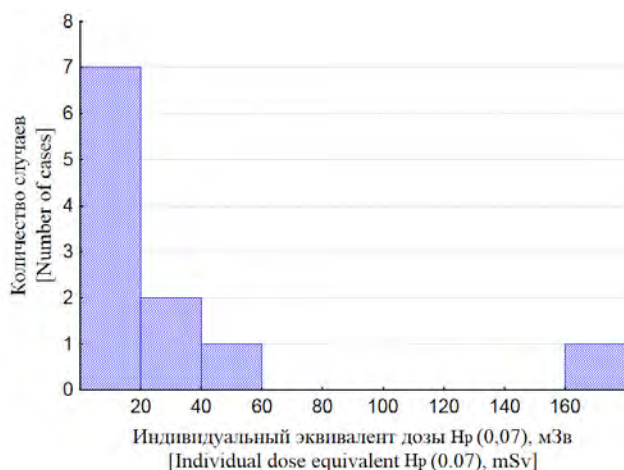


Рис. 2. Распределение годовых индивидуальных эквивалентов доз облучения кожи рук у химиков-аналитиков на производстве РФП для ПЭТ-центров (N=11, ср. знач. = 28 мЗв, медиана = 8,8 мЗв, мин. = 4,6 мЗв, макс. = 171 мЗв)

[Fig. 2. Distribution of skin annual equivalent doses due to irradiation of hands of analytical chemists in the production of radiopharmaceuticals for PET centers (N=11, mean = 28 mSv, median = 8.8 mSv, min. = 4.6 mSv, max. = 171 mSv)]

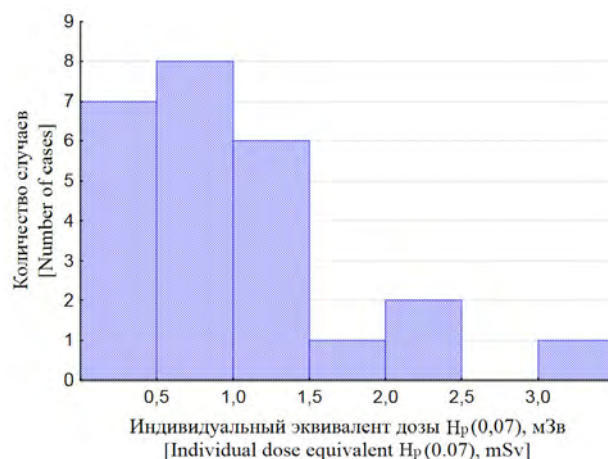


Рис. 3. Распределение квартальных индивидуальных эквивалентов доз облучения кожи рук у инженеров-радиохимиков на производстве РФП для ПЭТ-центров (N=25, ср. знач. = 1,0 мЗв, медиана = 0,9 мЗв, мин. = 0,2 мЗв, макс. = 3,5 мЗв)

[Fig. 3. Distribution of skin quarterly equivalent doses due to irradiation of hands of radiochemical engineers in the production of radiopharmaceuticals for PET centers (N=25, mean = 1.0 mSv, median = 0.9 mSv, min. = 0.2 mSv, max. = 3.5 mSv)]

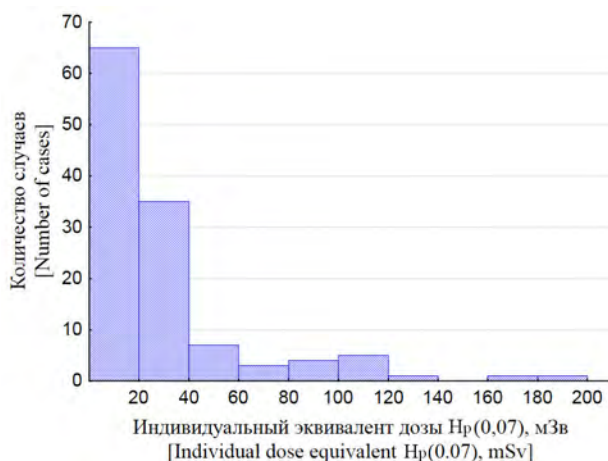


Рис. 4. Распределение квартальных индивидуальных эквивалентов доз облучения кожи рук у медсестёр из ПЭТ-центров (N=122, ср. знач. = 27 мЗв, медиана = 18 мЗв, мин. = 0,4 мЗв, макс. = 190 мЗв)

[Fig. 4. Distribution of skin quarterly equivalent doses due to irradiation of hands of nurses in PET centers (N=122, mean = 27 mSv, median = 18 mSv, min. = 0.4 mSv, max. = 190 mSv)]

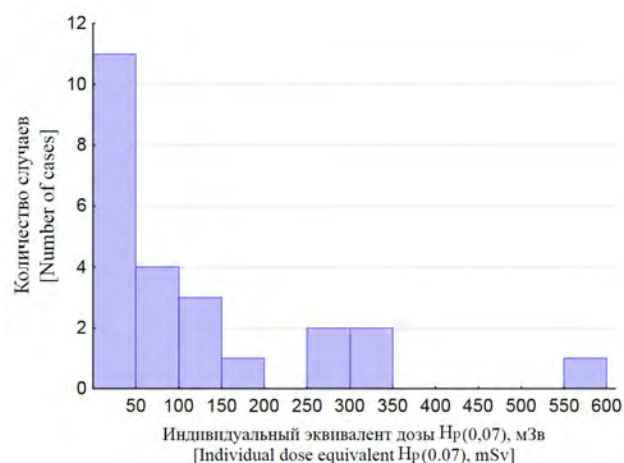


Рис. 5. Распределение годовых индивидуальных эквивалентов доз облучения кожи рук у медсестёр из ПЭТ-центров (N=24, ср. знач. = 114 мЗв, медиана = 56 мЗв, мин. = 1,3 мЗв, макс. = 573 мЗв)

[Fig. 5. Distribution of skin annual equivalent doses due to irradiation of hands of nurses in PET centers (N=24, mean = 114 mSv, median = 56 mSv, min. = 1.3 mSv, max. = 573 mSv)]

Полученные нами данные подтверждаются данными проекта ORAMED [10]. Этот масштабный проект, подробно изучавший условия облучения медицинского персонала, был закончен в 2012 году. Важным его разделом была оценка доз облучения кожи рук медицинского персонала различных специальностей. Исследование включало персонал, работающий с наиболее часто используемыми радионуклидами: ^{99m}Tc и ^{18}F – для диагностики; ^{90}Y и DOTATOC – для терапии. Был сделан вывод о том, что теоретическая расчетная годовая доза на кожу может превысить предел дозы облучения кожи рук для 20% персонала; для 49% составляет менее 150 мЗв; для 31% персонала доза находится в диапазоне от 150 мЗв до 500 мЗв

По аналогии с проектом ORAMED было решено оценить предполагаемые теоретические расчетные годовые дозы. Как было сказано выше, при оценке годовых измеренных значений был учтен только персонал, имеющий все четыре

квартальных измерения за год. Для получения расчетных максимальных доз были взяты все квартальные значения и, с учетом предположения, что нагрузка и количество рабочих дней в квартал неизменны, рассчитаны значения годовых доз. Все расчетные годовые значения сведены в таблице 1. Инженеры-радиохимики в данном расчете исключены, т.к. в нашем исследовании все полученные годовые значения $H_p(0,07)$ находились на уровне не более 1,5% от предела дозы. Годовые эквивалентные дозы внешнего облучения кожи рук у химиков-аналитиков по результатам измерения квартальных доз так же получились ниже установленного предела дозы: максимальное расчетное значение составило 216 мЗв (43% от предела дозы). Для медицинских сестёр при таком подходе три значения годовых эквивалентных доз в коже рук превышают установленный предел дозы, и пять значений оказались больше 410 мЗв (более 82% от предела дозы).

Таблица 1

Предполагаемые теоретические расчетные годовые эквивалентные дозы в коже рук

[Table 1]

Estimated annual equivalent doses to hand skin]

Диапазон доз, мЗв [Dose range, mSv]	Собственные исследования [Own research]				ORAMED, %
	Медицинские сестры, случаев [Nurses, cases]	Химики-аналитики [Radiochemists, cases]	Всего [Total]		
			случаев [cases]	%	
<150	99	47	146	85	49
150-500	20	3	23	13	31
>500	3	0	3	2	20

Для предотвращения ситуаций потенциального превышения годового предела дозы в коже рук специалисты, ответственные за радиационную безопасность внутри контролируемых организаций, внимательно анализируют выданный протокол ИДК и своевременно принимают меры для будущего снижения дозы у конкретного сотрудника в виде уменьшения интенсивности работы и анализа соблюдения техники безопасности при работе с РФП.

Для одной организации, которая выдала своим сотрудником по два индивидуальных дозиметра на руки, было проведено сравнение квартальных значений индивидуальных эквивалентов доз $H_p(0,07)$ облучения левой и правой (ведущей) руки. Для наглядности значения доз для обеих рук и их соотношение представлены в таблицах 2 и 3.

Практически во всех случаях для химиков-аналитиков, инженеров-радиохимиков и медицинских сестёр соотношение «левая рука/правая рука» выше единицы свидетельствует о том, что дозы в коже ведущей руки обычно ниже, чем дозы в коже руки, не являющейся ведущей, что так же хорошо согласуется с выводами, сделанными в рамках проекта ORAMED [10]. В связи с тем, что левая рука, удерживающая флакон с РФП, имеет более высокое значение эквивалентной дозы облучения кожи рук, чем доминирующая правая рука, для избегания ситуаций недооценки дозы следует носить кольцевой дозиметр именно на левой руке, имеющий больший контакт с РФП.

Таблица 2

Результаты квартальных измерений индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения кожи рук $H_p(0,07)$ медсестёр

[Table 2]

Results of measurements of individual equivalent dose of external irradiation of skin of hands $H_p(0.07)$ of nurses]

$H_p(0,07)$, мЗв [$H_p(0.07)$, mSv]		Соотношение Левая рука/правая рука [Ratio Left hand/right hand]
Левая рука [Left hand]	Правая рука [Right hand]	
26	15	1,8
23	17	1,3
22	8,9	2,5
22	14	1,6
52	42	1,2
84	19	4,4
118	85	1,4
255	73	3,5
44	35	1,3
82	44	1,9
57	15	3,8
7,3	5,5	1,3
47	40	1,2
42	29	1,4
83	44	1,9
96	42	2,3
36	34	1,1
65	39	1,7

Таблица 3

Результаты квартальных измерений индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения кожи рук $H_p(0,07)$ химиков-аналитиков и инженеров радиохимиков

[Table 3]

Results of measurements of the individual equivalent dose of external irradiation of the skin of the hands $H_p(0.07)$ of radiochemists]

$H_p(0,07)$, мЗв $[H_p(0.07), \text{mSv}]$		Соотношение
Левая рука [Left hand]	Правая рука [Right hand]	Левая рука/правая рука [Ratio Left hand / right hand]
4,1	3,1	1,3
1,8	2,2	0,8
5,6	2,2	2,5
2,4	2,3	1,0
3,0	1,4	2,1
5,2	1,7	3,1
6,4	5,5	1,2
3,1	3,0	1,0
3,4	3,0	1,1
13,0	15,0	0,9
15,0	6,9	2,2
2,6	2,2	1,2
1,3	0,6	2,2
6,2	3,6	1,7
0,4	0,4	1,0
1,0	0,9	1,1
2,0	1,7	1,2
2,9	2,5	1,2
0,5	0,4	1,3
3,4	4,2	0,8
0,5	0,3	1,7
0,6	0,5	1,2
1,8	1,2	1,5
6,0	3,1	1,9
4,2	2,6	1,6
2,3	0,8	2,9
3,0	0,3	10,0
0,8	0,5	1,6
8,3	11,6	0,7
1,9	1,1	1,7
6,2	2,5	2,5

Заключение

Проведенное исследование показало, что на практике для сотрудников ПЭТ-центров, работающих с РФП на основе ^{18}F , а именно медсестёр, выполняющих фасовку РФП по шприцам и введение препарата пациенту, возможно получение существенных доз облучения кожи рук (более 500 мЗв за год).

По результатам анализа собственных измерений, был сделан вывод, что химики-аналитики, проводящие ручной контроль качества РФП так же могут иметь существенные дозы внешнего облучения кожи рук, но не превышающие 500 мЗв. При этом инженеры-радиохимики, задействованные в автоматизированных процессах синтеза и фасовки, имеют существенно более низкие значения эквивалентных доз облучения кожи рук.

Таким образом, специалисты, задействованные в ручных процессах при проведении манипуляций с РФП, требуют особого внимания с позиций ИДК при контроле дозы облучения кожи рук и соблюдения требований радиационной безопасности.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шлеенкова Е.Н. осуществляла общее научное руководство исследованием, разработала дизайн исследования, определила цели и задачи, выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз, выполнила анализ данных, отредактировала и предоставила окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Бажин С.Ю. провел литературный поиск, выполнил измерения индивидуальных эквивалентов доз, выполнил анализ данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи, осуществил перевод текста.

Богатырёва В.Ю. провела литературный поиск и опросы ответственных за радиационную безопасность в исследуемых организациях.

Информация о конфликте интересов

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

Литература

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Sources and Effects of Ionizing Radiation. V.I, Annex A. Medical radiation exposures. NY: United Nations, 2010.
2. Чилига Л.А., Звонова И.А., Рыжкова Д.В. и др. Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 4. С. 31-43. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43.
3. Kubo A.L.S.L., Mauricio C.L.P., TLD occupational dose distribution study in nuclear medicine // Radiation Measurements. 2014. Vol. 71. P. 442-446, ISSN 1350-4487. DOI: 10.1016/j.radmeas.2014.04.021.
4. Audi G., Wapstra A.H., Thibault C. The Ame2003 atomic mass evaluation: (II) // Tables, graphs and references, 2003. Vol. 729, No 1. P. 337-676. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.003.
5. Невзоров Д.И., Скрипачев И.А., Долгушин М.Б. и др. Производство радиофармацевтического лекарственного средства ^{18}F -фтордезоксиглюкоза // Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2018. Т. 1, № 3. С. 10–14. DOI: 10.37174/2587-7593-2018-1-3-10-14.
6. Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года (в гражданской части). М., 2016. 76 с.
7. Шимчук Г.Г., Брусин А.Б., Шимчук Гр.Г. Возможности и перспективы создания пэт-центров в России на основе генераторных радионуклидов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67, № 6. С. 62–66. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-6-62-66.
8. European Platform for Occupational Radiation Exposure 1997 ESOREX Platform. URL: https://esorex-platform.org/database/query/skin?field_country_target_id (Дата обращения: 03.06.2024).

9. Vanhavere F., Carinou E., Donadille L. et al. An overview on extremity dosimetry in medical applications // Radiation Protection Dosimetry. 2008. Vol. 129, No 1–3. P. 350–355. DOI: 10.1093/rpd/ncn149.
10. ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff: EURADOS Report 2012-02, Braunschweig, April 2012. DOI: 10.12768/yc01-0d55.
11. International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. Annex E. Radiation exposure of hands in radiopharmacies: Monitoring of doses and optimisation of protection // Annals of the ICRP. 2008. Vol. 38, No 1–2. P. 1–197. DOI: 10.1016/j.icrp.2008.08.003.
12. Wrzesień M. The Effect of Work System on the Hand Exposure of Workers in 18F-FDG Production Centers // Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine. 2018. No. 41. P. 541–548. DOI: 10.1007/s13246-018-0644-9.
13. Kollaard R., Zorz A., Dabin J. et al. Review of extremity dosimetry in nuclear medicine // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, No 4. P. DOI: 10.1088/1361-6498/ac31a2. PMID: 34670207.
14. Cunha L., Dabin J., Leide-Svegborn S. et al. Extremity exposure of nuclear medicine workers: results from an EANM and EURADOS survey // The Quarterly Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2023. Vol. 67, No 1. P. 29–36. DOI: 10.23736/S1824-4785.22.03504-X. Epub 2023 Jan 11. PMID: 36630081.
15. Kyriakidou A., Schlieff J., Ginjaume M., Kollaard R. Need for harmonisation of extremity dose monitoring in nuclear medicine: results of a survey amongst national dose registries in Europe // Journal of Radiological Protection. 2021. Vol. 41, No 4. DOI: 10.1088/1361-6498/abff3. PMID: 34723834.
16. Beganović A., Petrović B., Surić Mihić M. Extremity dosimetry for exposed workers in positron emission tomography in Bosnia and Herzegovina // Radiation Protection Dosimetry. 2023. Vol. 199, No 8–9. P. 859–864. DOI: 10.1093/rpd/ncad117. PMID: 37225180.
17. Kaljević J., Stanković K., Stanković J. et al. Hand dose evaluation of occupationally exposed staff in nuclear medicine // Radiation Protection Dosimetry. 2016. Vol. 170, No 1–4. P. 292–296. DOI: 10.1093/rpd/ncv500. Epub 2015 Dec 10. PMID: 26656262.

Поступила: 09.07.2024

Шлеенкова Екатерина Николаевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: eshleenkova@mail.ru

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Богатырёва Виктория Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Шлеенкова Е.Н., Бажин С.Ю., Богатырёва В.Ю. Результаты индивидуального дозиметрического контроля кожи рук персонала, занятого при работе с радиофармацевтическими препаратами // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 35–42. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-35-42

Results of individual dosimetric monitoring of the hands skin for personnel engaged in working with radiopharmaceuticals

Ekaterina N. Shleenkova, Stepan Yu. Bazhin, Victoria Yu. Bogatyreva

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

With the active development and wide use of positron emission tomography, ensuring radiation safety in matters of irradiation of the skin of the hands of personnel, has become very important. Work with radiopharmaceuticals labeled with various radionuclides is characterized by fairly close contact with a source of ionizing radiation, during which the skin of the hands can be irradiated in significant doses. Thus, the effect of ionizing radiation on the skin of the hands is one of the main problems of radiation protection of personnel at nuclear medicine centers. The work of personnel at nuclear medicine centers, depending on the nature of the actions performed, can be divided into two types: predominantly manual processes (nurses – packaging and administration of drugs, analytical chemists – quality control) and predominantly automated processes (radiochemical engineers – synthesis, packaging into vials). The individual equivalent doses to the skin of the hands of nurses, analytical chemists and radiochemical engineers working with ¹⁸F-based radiopharmaceuticals were estimated using thermoluminescence dosimetry with individual dosimeters calibrated in terms of H_p(0.07). The maximum annual value obtained for radiochemical engineers was 7.8 mSv, which is 1.56% of the dose limit, and for analytical chemists it was 171 mSv, which is 34% of the dose limit (mean value was 28 mSv, median was 8.8 mSv, minimum value was 4.6 mSv). At the same time, nurses, who are mainly engaged in the packaging and administration

Ekaterina N. Shleenkova

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

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

of radiopharmaceuticals, have higher values of annual doses in the skin of the hands (mean value – 114 mSv, median – 56 mSv, minimum value – 1.3 mSv). The maximum value of the annual dose in the skin of the hands, recorded during the work, for a nurse was 573 mSv, i.e. the dose limit of 500 mSv was exceeded. The results of the work indicate that specialists involved in manual processes when manipulating radiopharmaceuticals require special attention from the standpoint of individual dosimetric control of the irradiation dose to the skin of the hands and compliance with radiation safety requirements.

Key words: positron emission tomography, individual dose equivalent $H_p(0.07)$, equivalent dose in the skin, radiopharmaceutical, personnel.

Authors' personal contribution

Shleenkova E.N. provided general scientific supervision of the study, developed the study design, defined goals and objectives, performed measurements of individual dose equivalents, performed data analysis, edited and submitted the final version of the manuscript for publication in the journal.

Bazhin S.Yu. conducted a literature search, performed measurements of individual dose equivalents, performed data analysis and edited an intermediate version of the manuscript.

Bogatyeva V.Yu. conducted a literature search and surveys of those responsible for radiation safety in the organizations under study.

Conflict of interests

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

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Sources and Effects of Ionizing Radiation. V.I, Annex A. Medical radiation exposures. NY: United Nations; 2010.
2. Chipiga LA, Zvonova IA, Ryzhkova DV, Menkov MA, Dolgushin MB. Levels of patients exposure and a potential for optimization of the pet diagnostics in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(4): 31–43. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-4-31-43.
3. Kubo ALSL, Mauricio CLP. TLD occupational dose distribution study in nuclear medicine. *Radiation Measurements*. 2014;71: 442–446. DOI: 10.1016/j.radmeas.2014.04.021.
4. Audi G, Wapstra AH, Thibault C. The Ame2003 atomic mass evaluation: (II). *Tables, graphs and references*. 2003;729(1): 337–676. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.003.
5. Nevzorov DI, Skripachev IA, Dolgushin MB, Odzharova AA, Eremin NV. Production of Radiopharmaceutical Medicinal Product 18F-Fluorodeoxyglucose. *Onkologicheskii zhurnal: luchelevaya diagnostika, luchelevaya terapiya = Journal of oncology: diagnostic radiology and radiotherapy*. 2018;1(3): 10–14. (In Russian). DOI: 10.37174/2587-7593-2018-1-3-10-14.
6. Passport of the program of innovative development and technological modernization of the State Corporation Rosatom for the period up to 2030 (in the civil part). Moscow; 2016. 76 p. (In Russian).
7. Shimchuk GG, Bruskin AB, Shimchuk GrG. Opportunities and Prospects for Russia to Create PET Centers Based on Generator Radionuclides. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(6): 62–66. (In Russian). DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-6-62-66
8. European Platform for Occupational Radiation Exposure 1997 ESOREX Platform. Available from: https://esorex-platform.org/database/query/skin?field_country_target_id (Accessed: 03.06.2024).
9. Vanhavere F, Carinou E, Donadille L, Ginjaume M, Jankowski J, Rimpler A, et al. An overview on extremity dosimetry in medical applications. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;129(1–3): 350–355.
10. ORAMED: Optimization of Radiation Protection of Medical Staff: EURADOS Report 2012-02, Braunschweig, April 2012.
11. International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals. Addendum 3to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106. Annex E. Radiation exposure of hands in radiopharmacies: Monitoring of doses and optimisation of protection. *Annals of the ICRP*. 2008;38(1–2): 1–197.
12. Wrzesień M. The effect of work system on the hand exposure of workers in 18F-FDG production centres. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*. 2018;41(2): 541–548. DOI: 10.1007/s13246-018-0644-9.
13. Kollaard R, Zorz A, Dabin J, Covens P, Cooke J, Crabbé M, et al. Review of extremity dosimetry in nuclear medicine. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(4). DOI: 10.1088/1361-6498/ac31a2. PMID: 34670207.
14. Cunha L, Dabin J, Leide-Svegborn S, Zorz A, Kollaard R, Covens P. Extremity exposure of nuclear medicine workers: results from an EANM and EURADOS survey. *Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2023;67(1): 29–36. DOI: 10.23736/S1824-4785.22.03504-X. Epub 2023 Jan 11. PMID: 36630081.
15. Kyriakidou A, Schlieff J, Ginjaume M, Kollaard R. Need for harmonisation of extremity dose monitoring in nuclear medicine: results of a survey amongst national dose registries in Europe. *Journal of Radiological Protection*. 2021;41(4). DOI: 10.1088/1361-6498/abff3. PMID: 34723834.
16. Beganović A, Petrović B, Surić Mihić M. Extremity dosimetry for exposed workers in positron emission tomography in Bosnia and Herzegovina. *Radiation Protection Dosimetry*. 2023;199(8–9): 859–864. DOI: 10.1093/rpd/ncad117. PMID: 37225180.
17. Kaljevic J, Stankovic K, Stankovic J, Ciraj-Bjelac O, Arandjic D. Hand dose evaluation of occupationally exposed staff in nuclear medicine. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;170(1–4): 292–296. DOI: 10.1093/rpd/ncv500. Epub 2015 Dec 10. PMID: 26656262.

Received: July 09, 2024

For correspondence: Ekaterina N. Shleenkova – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail eshleenkova@mail.ru)

Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

Victoria Yu. Bogatyeva – Junior Researcher of the Laboratory of Radiation Control, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

For citation: Shleenkova E.N., Bazhin S.Yu., Bogatyeva V.Yu. Results of individual dosimetric monitoring of the hands skin for personnel engaged in working with radiopharmaceuticals. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P.35–42. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-35-42

Радиационно-гигиенические аспекты аварийного реагирования на крупные радиационные аварии

Г.А. Горский^{1,2}, И.К. Романович¹

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

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

Темпы развития ядерных технологий неразрывно связаны с необходимостью совершенствования и актуализации подходов к готовности эффективного и адекватного реагирования на аварийные ситуации. Внедрение новых технических решений, которые за последние несколько десятилетий значительно снизили риски возникновения тяжелых последствий крупных радиационных аварий, не могут гарантировать их абсолютное отсутствие. Совершенствование систем глубоководной радиационной защиты, радиационного мониторинга и контроля, уровня подготовки персонала радиационных объектов не может идти отдельно от развития комплекса мер аварийной готовности и аварийного реагирования. Целью работы является обзор систем реагирования на крупные радиационные аварии, рекомендуемых Международной комиссией по радиационной защите и Международным агентством по атомной энергии, и российскими федеральными законами и нормативными правовыми актами. Результаты работы показали, что при актуализации и пересмотре санитарных норм и правил в области радиационной безопасности целесообразно рассмотреть необходимость дополнения действующей системы категорирования радиационных объектов по потенциальной радиационной опасности, системными критериями категорирования видов деятельности по степени аварийной готовности. Этими критериями будут охватываться не только эксплуатацию стационарных радиационных объектов, для которых предусматривается установление санитарно-защитной зоны, но и работу с источниками ионизирующего излучения вне стационарных условий, в том числе транспортирование радиоактивных веществ, эксплуатация судов с ядерными двигательными установками, а также радиационноопасные объекты, находящиеся за пределами страны. Введение такого категорирования создает основу для определения зон и расстояний аварийного реагирования, которые позволят определить эффективный набор мер радиационной защиты населения, планируемый органами власти субъектов Российской Федерации совместно с эксплуатирующими организациями и органами, осуществляющими государственное регулирование безопасности в области использования атомной энергии.

Ключевые слова: радиационная авария, категория аварийной готовности, зоны и расстояния аварийного реагирования, радиационная защита, детерминированные эффекты.

Введение

Прошло 70 лет с момента первого в мире подключения атомной электростанции к энергетической системе страны, когда первый советский реактор АМ-1, мощностью 5 МВт, расположенный в г. Обнинске, был запущен в промышленную эксплуатацию, а опыт его эксплуатации внес неоценимый вклад в развитие как отечественной, так и мировой ядерной электроэнергетики [1, 2].

Данные The Power Reactor Information System (Информационная система по энергетическим реакторам (PRIS/ПРИС)) [3], разработанной и поддерживаемой Международным агентством по атомной энергии, показывают, что по состоянию на середину 2024 года в мире находятся в эксплуатации 416 ядерных энергетических реакторов (ЯЭР) общей чистой установленной мощностью 374,7 ГВт(е), 25 ЯЭР мощностью 21,3 ГВт(е) – в состоянии приостановленной эксплуатации, 59 ЯЭР строятся. Многолетний опыт

насчитывает более 19 тысяч реактор-лет эксплуатации ЯЭР. В Российской Федерации эксплуатируются 36 энергоблоков на 11 атомных электростанциях, суммарной установленной мощностью свыше 28,5 ГВт, в том числе: 22 энергоблока с реакторами типа ВВЭР (4 энергоблока – ВВЭР-1200, 13 энергоблоков – ВВЭР-1000 и 5 энергоблоков – ВВЭР-440 различных модификаций), 10 энергоблоков с канальными реакторами (7 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000 и 3 энергоблока с реакторами типа ЭГП-6), 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением (БН-600 и БН-800) и реакторные установки типа КЛТ-40С в составе плавучей атомной теплоэлектростанции.

Развитие атомной электроэнергетики неразрывно связано с внедрением ядерных и радиационных технологий практически во все отрасли народного хозяйства. По данным радиационно-гигиенической паспортизации субъектов Российской Федерации [4] работы с источниками ионизи-

Горский Григорий Анатольевич

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: Gorskii@niirg.ru

рующего излучения (ИИИ) осуществляют более 23890 предприятий и организаций с общей численностью персонала группы А более 232 тысяч человек. На этих предприятиях, в том или ином виде, эксплуатируется более 178 тысяч устройств и установок содержащих радионуклидные или генерирующие ИИИ различных типов в промышленных, научно-исследовательских, медицинских, медико-биологических или иных целях.

Залогом динамичных темпов развития атомной энергетики и в целом индустрии ядерных и радиационных технологий, помимо экономической и технологической эффективности и целесообразности, безусловно, является продолжение фундаментальных научных разработок в этой области, совершенствование инженерных технологий, развитие инноваций и, наконец, обеспечение действенных мер по глобальному снижению эмиссии диоксида углерода [5, 6]. Вместе с тем, вопросы обеспечения радиационной безопасности (РБ) населения в части аварийной готовности, аварийной защиты и реагирования, медико-социальных и экологических последствий в случае крупномасштабных аварий, обеспечения гигиенического нормирования при радиационных авариях (РА) имеют не менее важное значение, а иногда и оказывают достаточно чувствительное влияние на стратегические планы развития ядерной энергетики разных стран с учетом необоснованных радиофобий на фоне крупных РА прошлых лет [7, 8].

В рамках деятельности органов и учреждений Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) вопросы аварийной готовности и аварийного реагирования (АР) прежде всего лежат в плоскости гигиенического нормирования уровней облучения персонала и населения при аварийном облучении, определении достаточного и информативного уровня и порядка ведения мониторинга показателей РБ в рамках социально-гигиенического мониторинга, поддержании аварийной готовности и надлежащего уровня профессиональной и методической подготовки всей лабораторной сети Роспотребнадзора, готовности к участию в выработке управленческих решений во взаимодействии со всеми участниками АР и аварийной защиты населения.

Цель исследования – обзор систем реагирования на крупные радиационные аварии, рекомендуемых МКРЗ и МАГАТЭ, и российскими федеральными законами и нормативными правовыми актами.

Международные подходы к системе аварийного реагирования

В системе международных подходов к аварийному реагированию и аварийной защите особое ключевое место занимает Публикация 103 [9] МКРЗ. Рекомендации, прежде всего, основываются на анализе ситуаций облучения, в отличие от ранее использовавшегося подхода практики и вмешательства. Все сценарии облучения рассматриваются как три ситуации: планируемое, аварийное и существующее облучение. В обосновании требований РБ МКРЗ по-прежнему отталкивается от трех основных фундаментальных принципов радиационной защиты: принцип нормирования пределов доз, принцип обоснования и принцип оптимизации защиты. При этом принцип нормирования, ориентированный на защиту индивидуума, применяется только в ситуации планируемого облучения, а принципы обоснования и оптимизации должны и могут применяться в любой

из ситуаций облучения. В связи с тем, что обоснование и оптимизация ориентированы на источник излучения, для их реализации с целью обеспечения РБ персонала и населения Комиссией рекомендуется использование критериев граничных доз и референтных уровней. Принципиальной позицией является то, что устанавливаемые граничные дозы всегда меньше жестких границ предела дозы, то есть по сути являются контрольными уровнями в привычном восприятии системы российского гигиенического нормирования, а референтные уровни чаще используются в случаях отсутствия нормативов предела дозы (например, референтные диагностические уровни при медицинском облучении) и по смыслу, прежде всего, определяют уровни оптимизации радиационной защиты и косвенно могут служить для оценки системы обеспечения РБ от того или иного источника излучения. В качестве типа ограничения дозы в ситуации аварийного облучения Комиссия рекомендует использовать именно референтные уровни. Уровень доз более 100 мЗв практически всегда признает защитные мероприятия обоснованными, а диапазон установления референтного уровня по остаточной дозе находится в пределах от 20 мЗв до 100 мЗв острого или годового облучения. Под остаточной дозой Комиссия понимает ту дозу, которая сохранится после реализации всех защитных мероприятий. При этом именно прогнозируемый уровень остаточной дозы с учетом всех возможных путей аварийного облучения населения, т.е. ее прогнозируемый уровень в сравнении с установленным референтным уровнем аварийного облучения, определяет результат предварительной оценки приемлемости и эффективности используемого варианта защиты населения в случае крупномасштабной РА. Концепция остаточной дозы положена в основу глобальной стратегии радиационной защиты, которая сформулирована новыми международными требованиями и состоит в том, что при предварительной оценке приемлемости варианта защитной стратегии, ожидаемые остаточные дозы с учетом всех путей облучения сравниваются с установленным референтным уровнем.

В части обеспечения радиационной безопасности ликвидаторов, референтный уровень должен быть меньше или на уровне 100 мЗв в целом, а в случае неотложных спасательных мероприятий – не более уровня развития любых детерминированных эффектов (ниже 500 мЗв). Только для исключительных действий в аварийных ситуациях, связанных со спасением жизни людей, для информированных добровольцев не предусматривается установление референтного уровня. Если рекомендуемые ранее [10, 11, 12] уровни вмешательства (в отношении пищевых продуктов, проведения йодной профилактики, укрытия, временной эвакуации или временного переселения) при аварийном облучении устанавливались для ограничения облучения населения по предотвращаемой конкретным защитным мероприятием дозе, то предлагаемые референтные уровни для оценки всего комплекса мер в рамках единой стратегии защиты устанавливаются в величине остаточной дозы. При этом диапазон рекомендованных МКРЗ уровней вмешательства и возможность их применения при АР остались без изменений [9, 13]. МКРЗ отмечает, что уровни не только выше, но и ниже референтных уровней должны быть предметом оптимизации защиты, что подчеркивает их смысл как инструмента оценки, в том числе ретроспективной, реализованных мероприятий радиационной защиты.

В международной практике мерам эффективного применения мер защиты в аварийных ситуациях уделяется значительное внимание, в том числе с пониманием того факта, что зачастую не сам факт аварии, а отсутствие достоверной информации и противоречивые меры реагирования вызывают недоверие населения и заставляют национальные правительства пересматривать подходы к вопросам развития атомной электроэнергетики.

МАГАТЭ относит аварийную готовность и АР к одним из основополагающих принципов обеспечения безопасности [14]. Принципы, лежащие в основе обеспечения системы РБ при РА, формируют основополагающие цели и задачи, определяющие стратегию действий всех участников АР. МАГАТЭ в развитие общих требований по безопасности [15, 16] рекомендует практическое руководство к поэтапному подходу к разработке, обоснованию и оптимизации стратегии защиты в случае ядерной или радиационной аварийной ситуации [17]. Стратегия защиты представляет собой целостным и последовательным в своих целях комплекс мер: восстановление контроля над аварийной ситуацией и смягчение неотвратимых последствий; спасение жизни людей; исключение или сведение к минимуму серьезных детерминированных эффектов; обеспечение медицинских мер реагирования (оказание первой, неотложной и специализированной помощи пострадавшим); снижение риска возникновения стохастических эффектов; информирование и поддержание доверия к принимаемым мерам в общественной среде; смягчение нерадиологических последствий; защита, насколько это возможно, окружающей среды и собственности; подготовка, насколько это возможно, к возобновлению нормальной социальной и экономической деятельности. Только при решении всех этих задач и достижения целей АР радиационная защита будет обоснованной и оптимизированной.

Начиная с 2002 года в публикации GS-R-2 [18] и затем в обновленной публикации GSR part 7 [16] в 2015 году, МАГАТЭ предлагает использовать систему оценки опасностей и потенциальных последствий аварийных ситуаций на основе которых формируется стратегия радиационной защиты в виде дифференцированного и детализированного подхода к аварийной готовности и реагированию, включая требования по персонализации ответственности, четкого распределения прав и обязанностей участников АР на объектовом, местном, региональном и национальном уровне, порядок передачи информации о РА, первичную классификацию РА и т.д. В соответствии с оцененными опасностями, все виды деятельности с ИИИ и, соответственно, радиационные объекты, группируются по 5 категориям аварийной готовности [16] и в кратком виде представлены ниже:

1 категория – объекты, например, атомные электростанции (АЭС), для которых аварии на площадке (включая аварийные события, не учтенные при проектировании) способны приводить к возникновению серьезных детерминированных эффектов за пределами площадки, которые оправдывали бы применение предупредительных, срочных или ранних защитных мер, а также других мер реагирования. К этой категории также относятся радиационные объекты, для которых аварийные события с указанными последствиями были зафиксированы ранее.

2 категория – объекты (установки), например, некоторые типы исследовательских реакторов или ядерных судо-

вых установок, для которых аварии на площадке способны приводить к дозам облучения людей за пределами площадки, оправдывающим принятие срочных или ранних защитных мер, а также других мер реагирования. К этой категории относятся указанные радиационные объекты, для которых такие аварийные события были зафиксированы как произошедшие ранее. Категория 2 предполагает, в отличие от категории 1, отсутствие детерминированных эффектов за пределами площадки даже при возникновении аварий, которые не были учтены при проектировании.

3 категория – объекты (установки), такие, как мощные промышленные гамма-облучательные установки, промышленное производство закрытых радионуклидных источников, некоторые медицинские учреждения, использующие радиоактивные вещества в закрытом или открытом виде, для которых аварии способны оправдать принятие защитных мер и других мер реагирования на площадке для достижения целей АР, или для которых такие аварийные события зафиксированы как произошедшие ранее.

4 категория – деятельность и действия (транспортировка ядерных или радиоактивных материалов; нестационарные работы с ИИИ; хищение ИИИ; выявление продукции, товаров или участков территорий, имеющих техногенное радиоактивное загрязнение выше установленных нормативов; выявление клинических симптомов, связанных с воздействием радиации; ядерные или радиационные аварии в других государствах с трансграничным перемещением радиоактивного загрязнения, не отнесенные к категории 5).

5 категория – территории в пределах зон и расстояний аварийного планирования в государстве, с учетом расположенных в другом государстве установок категорий 1 или 2.

Категории аварийной готовности основываются на международном опыте АР на масштабные РА, определяют стратегию АР [19] и позволяют обеспечить аварийную готовность или принимать первоочередные меры реагирования при недостаточной или отсутствующей дозиметрической информации в условиях отсутствия временного лага для взвешенной оценки доз облучения населения [20, 21].

Помимо представленных подходов к категорированию по аварийной готовности объектов и видов деятельности, МАГАТЭ дает непосредственно рекомендации по классификации всех типов ядерных и радиационных аварий по месту осуществления мер реагирования и проведения защитных мероприятий (*общая аварийная ситуация* – необходимы и однозначно оправданы меры защиты людей как на площадке, так и за пределами площадки радиационного объекта 1 и 2 категории; *аварийная ситуация на территории площадки* – оправданы меры защиты и АР на территории площадки объектов 1 и 2 категории и непосредственно вблизи территории площадки, если это потребуются с учетом результатов обязательного радиационного мониторинга и оценки доз облучения населения; *аварийная ситуация на установке* – авария на объекте 1 и 2 категории, не требующая мер защиты за пределами площадки объекта; *предупреждение об опасности* – аварийная ситуация, требующая мер реагирования непосредственно на радиационной или ядерной установке, оправдывающих принятие мер по оценке и смягчению потенциальных последствий на установке; *прочая ядерная или радиационная аварийная ситуация* – авария на объекте 4 категории аварийной готовности, то есть меры реагирования необходимы и могут быть оправданы в любом месте без привязки к радиационному объекту).

Для обеспечения кризисной риск-коммуникации и единого международного информирования о РА с точки зрения значимости и влияния ядерных или радиационных событий на РБ персонала, населения, а также окружающую среду, в 1990 году МАГАТЭ и Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР/АЯЭ) разработали Международную шкалу ядерных и радиологических событий INES [22]. Изначально шкала использовалась для классификации аварийных событий только на атомных станциях. Впоследствии, шкала стала универсальным инструментом оперативного информирования о влиянии масштабов и последствий РА на людей и окружающую среду. На сегодняшний день в шкалу INES включены любые РА или инциденты, в том числе не связанные с эксплуатацией атомных реакторов или работой с ядерными материалами на предприятиях ядерного топливного цикла [22, 23, 24]. По шкале INES классифицируются РА, возникшие не только в процессе эксплуатации или хранения радиоактивных веществ, но и аварии, возникающие в процессе транспортирования ИИИ, факты выявления бесхозных ИИИ, в том числе в металлоломе, случаи утраты или хищения радиоактивных веществ.

Шкала INES разделяет РА на две большие группы: инциденты (уровень 1 – «аномалия», уровень 2 – «инцидент», уровень 3 – «серьезный инцидент») и аварии (уровень 4 – «авария с локальными последствиями», уровень 5 – «авария с широкими последствиями», уровень 6 – «серьезная авария», уровень 7 – «крупная авария»). Уровни РА в каждой из этих групп определяются с учетом ограниченного или обширного влияния на людей и окружающую среду, воздействия на радиологические барьеры, глубокоэшелонированную защиту, порядка проведения радиационного контроля и могут использоваться для гигиенической характеристики РА [25].

Классификация аварий по шкале INES в период развития аварийной ситуации зачастую может быть затруднительна в связи с тем, что шкала включает ряд критериев, относящихся к последствиям РА и, соответственно, может зависеть от оперативности и эффективности принимаемых мер реагирования, поэтому она имеет значение исключительно с точки зрения информирования населения и не должна мешать принятию противоаварийных мер.

Важное значение МАГАТЭ уделяет определению зон и расстояний АР за пределами площадки с учетом предотвращения или сведения к минимуму детерминированных эффектов облучения и снижения риска возникновения стохастических эффектов:

1. Зона предупредительных мер – зона за пределами площадки объекта 1 категории до начала радиоактивного выброса, в которой необходимо проводить комплекс срочных предупредительных защитных мероприятий для исключения возникновения детерминированных эффектов;

2. Зона планирования срочных защитных мер – зона за пределами площадки объекта 1 и 2 категории до или после радиоактивного выброса, в которой необходимо проведение защитных мер с целью снижения риска возникновения стохастических эффектов облучения. Эта зона может быть спланирована заранее, но ее окончательные границы формируются на основе данных радиационного контроля и оценки радиационной обстановки; при этом приоритетом в порядке практической реализации мер защиты в случае ограниченности информации, оценок и про-

гнозов, является первоочередность выполнения защитных мер в зоне предупредительных мер;

3. Расстояние расширенного планирования – территория за пределами зоны планирования срочных защитных мер объектов 1 и 2 категории, определяемая по результатам радиационного контроля и оценки радиационной обстановки после радиоактивного выброса, в которой защитные меры будут направлены на снижение рисков возникновения стохастических эффектов;

4. Расстояние планирования мер в отношении продуктов питания, источников водоснабжения и товаров – территория за пределами расстояния расширенного планирования, на которой требуется введение мер по защите от радиоактивного загрязнения продуктов питания, поверхностных источников водоснабжения и потребительских товаров, а также защите населения от употребления радиоактивно загрязненных продуктов питания, воды или обращения с загрязненными потребительскими товарами.

Ориентировочные размеры зон и расстояний АР, рассчитанные для тяжелой запроектной аварии с выбросом 10% продуктов деления для реактора тепловой мощностью более 1000 МВт, составляют для зоны предупредительных мер 3–5 км, зоны планирования срочных защитных мер – 15–30 км, расстояния расширенного планирования – 100 км, расстояния планирования мер в отношении продуктов питания и товаров – 300 км [26].

Тремя условиями эффективного аварийного реагирования во всех зонах и расстояниях АР являются: своевременное оперативное информирование всех участников АР на площадке и за территорией радиационного объекта, передача эксплуатирующей организацией в адрес участников АР четкой первичной информации о возможном масштабе РА с учетом технических характеристик и характера нарушений условий нормальной эксплуатации ядерного или радиационного объекта, основанной на четком обосновании, содержащемся в проектной документации радиационного объекта, зон и расстояний АР, а также степени аварийной готовности и эффективности взаимодействия всех участников реагирования.

Заблаговременно, с понятной долей неопределенности, учитывающей особенности конкретной РА, при планировании мероприятий аварийной готовности и АР на национальном уровне должны быть предусмотрены меры и критерии по прекращению радиационной или ядерной аварийной ситуации и переходу от аварийного к существующему облучению с учетом необходимости возобновления нормальной социально-экономической деятельности [16, 27, 28].

В части критериев дозовых ограничений аварийного облучения персонала МАГАТЭ рекомендует уровень эффективной дозы 50 мЗв; при этом планируемое облучение специализированных работников, привлекаемых к ликвидации последствий РА, – более 50 мЗв – может осуществляться только при условии добровольного информированного согласия. Критерием предотвращения высоких уровней облучения персонала является эффективная доза 100 мЗв, превышение которой до уровня 500 мЗв считается оправданным только в случае выполнения работниками мер по спасению жизни и здоровья людей, предотвращению развития детерминированных эффектов путем минимизации катастрофических последствий и условий развития РА. Отдельно рассматривается ситуация аварийного облучения женщин, работающих на радиационном объекте,

в связи с тем, что облучение плода в эквивалентной дозе на уровне 100 мЗв может привести к развитию серьезных детерминированных эффектов. Поэтому при реагировании в случае ядерной или радиационной аварийной ситуации работники, которые знают, что они беременны, или которые могли забеременеть, должны быть информированы об этом риске и не должны привлекаться к аварийным мерам реагирования, которые могут привести к получению эквивалентной дозы для плода более 50 мЗв за весь период внутриутробного развития плода [16].

В качестве критериев предупреждения или сведения к минимуму возникновения серьезных детерминированных эффектов, которые предполагают проведение защитных мероприятий при любых обстоятельствах развития РА, МАГАТЭ рекомендует использование взвешенной с учетом относительной биологической эффективности (ОБЭ) поглощенной дозы в ткани или органе (AD) от внешнего и внутреннего (за счет поступления радионуклидов в организм) облучения [15]. При этом диапазон ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы при остром (10 часов) внешнем облучении находится в пределах от 1 Гр ($AD_{\text{костный мозг}}$) до 10 Гр на площади 100 см² ($AD_{\text{кожа}}$). Диапазон ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы при остром (30 суток) внутреннем облучении в результате острого поступления радионуклидов находится в пределах от 0,2 Гр ($AD_{\text{костный мозг}}$) для радионуклидов с атомным числом более 90 и 2 Гр ($AD_{\text{костный мозг}}$) для радионуклидов с атомным числом менее 89 до 2 Гр ($AD_{\text{щитовидная железа}}$) и 30 Гр ($AD_{\text{легкие}}$) для щитовидной железы и легких соответственно [16, 29]. Меры медико-санитарного реагирования (лечение, длительное медицинское наблюдение, декорпорация, дезактивация и пр.) в случае указанных прогнозируемых доз острого внешнего или полученных доз острого внутреннего облучения проводятся в обязательном и безотлагательном порядке.

Критериями для снижения риска возникновения стохастических эффектов в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ являются:

- для применения срочных защитных мер (йодное блокирование щитовидной железы, укрытие, эвакуация, предотвращение перорального поступления радионуклидов с пищевыми продуктами и питьевой водой, ограничения в отношении продовольственных и непродовольственных товаров, контроль радиоактивного загрязнения, дезактивация, регистрация доз и облученных лиц): прогнозируемая эквивалентная доза за 7 суток на щитовидную железу – 50 мЗв и эффективная доза облучения человека за 7 суток – 100 мЗв.

- для применения ранних защитных мер (временное отселение, предотвращение перорального поступления радионуклидов с пищевыми продуктами и питьевой водой, ограничения в отношении непродовольственных товаров, контроль радиоактивного загрязнения, дезактивация, регистрация доз и облученных лиц): прогнозируемая эффективная доза облучения человека в течение первого года – 100 мЗв;

- для применения долгосрочных медицинских мер (скрининг для выявления долгосрочных эффектов и лечение радиационно-индуцированных последствий): эффективная доза облучения человека в течение месяца – 100 мЗв;

- для применения мер ограничения в отношении продуктов питания, в первую очередь молока и питьевой воды (только при наличии альтернативных источников водоснабжения или при условии обеспечения достаточного количества чистых продуктов питания), или непродовольственных потребительских товаров: прогнозируемая эффективная доза облучения – 10 мЗв за первый год. При отсутствии альтернативных источников питьевой воды или путей замещения радиоактивно-загрязненных основных продуктов питания этот критерий применяется для решения вопроса о временном отселении или для решения вопроса о прекращении действия ограничений на потребление продуктов питания и питьевой воды.

- для применения мер ограничения в отношении транспортных средств, оборудования и других предметов, находившихся на территории, подвергшейся воздействию ядерной или радиационной аварийной ситуации: прогнозируемая эффективная доза облучения – 10 мЗв за первый год. Условием применения ограничений в отношении этой группы товаров является то, что эти ограничения не будут мешать проведению срочных или других мер защиты, включая медико-санитарные меры; при этом должен соблюдаться общий дозовый критерий проведения ранних защитных мер (100 мЗв в год).

Гигиеническое нормирование и обеспечение системы аварийного реагирования в Российской Федерации

В Российской Федерации основополагающие принципы и вопросы АР закреплены федеральными законами и отражены в Указе Президента Российской Федерации от 13.10.2018 года № 585¹.

В соответствии с Указом Президента потенциальная возможность возникновения РА и катастроф как на территории страны, так и за ее пределами, включая риски трансграничных негативных последствий, отнесены к основным проблемам в области обеспечения ядерной и РБ. При этом предотвращение РА и катастроф, локализация и минимизация их последствий, минимизация радиационных рисков для населения Российской Федерации, возникающих вследствие РА и катастроф, испытаний ядерного оружия на территориях иностранных государств, четко определены в качестве целей государственной политики в области обеспечения ядерной и РБ. Соответствующей задачей в этой области является поддержание постоянной готовности сил и средств, предназначенных для ликвидации последствий РА и катастроф, при постоянном совершенствовании мер аварийной готовности и реагирования как основного направления реализации государственной политики.

¹ Указ Президента РФ от 13.10.2018 № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» [Presidential Decree No. 585 of 13.10.2018 "On Approval of the Fundamentals of State Policy in the Field of Nuclear and Radiation Safety of the Russian Federation for the Period until 2025 and Beyond" (In Russ.)]

Основными документами, регламентирующими требования по обеспечению реагирования и гигиеническое нормирование в Российской Федерации в случае РА, являются:

- Федеральный закон «О радиационной безопасности населения»² (3-ФЗ);
- Федеральный закон «Об использовании атомной энергии»³ (170-ФЗ);
- Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»⁴ (68-ФЗ);
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)⁵.

Все вышеуказанные документы разработаны с учетом рекомендаций 60 Публикации МКРЗ [10] и Международного базового стандарта по безопасности МАГАТЭ 1996 года и гармонизированы с ними [30, 31].

Федеральный закон «О радиационной безопасности населения», наряду с основными принципами обеспечения РБ, определяет и принципы, на которых основывается система РБ при РА: «предполагаемые мероприятия по ликвидации последствий радиационной аварии должны приносить больше пользы, чем вреда; виды и масштаб деятельности по ликвидации последствий радиационной аварии должны быть реализованы таким образом, чтобы польза от снижения дозы ионизирующего излучения, за исключением вреда, причиненного указанной деятельностью, была максимальной». Очевидно, что эти принципы по сути являются интерпретацией одного и того же принципа обоснования, определенного в Публикации 103 МКРЗ [9] как «любое решение, изменяющее ситуацию облучения, должно приносить больше пользы, чем вреда». При этом второй принцип радиационной защиты, который, может и должен использоваться при АР и рекомендуется МКРЗ, – принцип оптимизации защиты – не имеет четкого отражения в 3-ФЗ. Вместе с тем, использование принципов обоснования и оптимизации, ориентированных на источник излучения, дает четкое понимание правовых основ использования понятий граничных доз и референтных уровней для обеспечения РБ персонала и населения при РА.

В 3-ФЗ достаточно четко определены полномочия Российской Федерации, субъектов Российской Федерации, права и обязанности эксплуатирующих организаций и граждан; кроме того, закон содержит основы к применению референтных уровней облучения в условиях РА (могут быть превышены основные пределы доз), но детальной проработки и подробного описания различных ситуаций облучения условий установления граничных доз и референтных уровней не содержит.

В связи с принятием Технического регламента Таможенного союза⁶ (ТР ТС) и переводом требований к содержанию техногенных радионуклидов в пищевых продуктах из российских Санитарных норм и правил⁷ в требования ТР ТС, в 2023 году в редакцию 3-ФЗ внесены изменения о необходимости соответствия обязательным требованиям, установленным правом Евразийского экономического союза, сельскохозяйственной продукции, продовольственного (пищевого) сырья, пищевой продукции, питьевой воды и контактирующим с ними в процессе производства (изготовления), хранения, перевозки (транспортирования) и реализации материалов и изделий. Вместе с тем, при реализации мер аварийного реагирования может потребоваться оперативное внедрение временных допустимых уровней [32] содержания техногенных радионуклидов в пищевых продуктах, что может создать определенные правовые коллизии.

Вопросы АР также регламентированы Федеральным законом «Об использовании атомной энергии» (170-ФЗ), в соответствии с которым государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии предусматривает деятельность соответствующих федеральных органов исполнительной власти и Государственной корпорации по атомной энергии Росатом, направленную на организацию разработки, утверждение и введение в действие норм и правил в области использования атомной энергии, а также контроля за разработкой и реализацией мероприятий по защите работников объектов использования атом-

² Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ (ред. от 18.03.2023) «О радиационной безопасности населения» [Federal Law No. 3-FZ dated 09.01.1996 (ed. 18.03.2023) "On Radiation Safety of the Public" (In Russ.)]

³ Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ (ред. от 28.06.2022) «Об использовании атомной энергии» [Federal Law of 21.11.1995 No. 170-FZ (ed. 28.06.2022) "On the Use of Atomic Energy" (In Russ.)]

⁴ Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 30.01.2024) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [Federal Law of 21.12.1994 No. 68-FZ (ed. 30.01.2024) "On Protection of Public and Territories from Natural and Technogenic Emergencies" (In Russ.)]

⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 N 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (вместе с "НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы") (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 № 14534) [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 07.07.2009 N 47 "On Approval of SanPiN 2.6.1.2523-09" (together with "NRB-99/2009. SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards. Sanitary Rules and Regulations") (Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009 N 14534) (In Russ.)]

⁶ Решение Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 № 880 (ред. от 23.06.2023) «О принятии технического регламента Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (вместе с «ТР ТС 021/2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности пищевой продукции») [Decision of the Customs Union Commission of 09.12.2011 N 880 (ed. from 23.06.2023) "On Adoption of Technical Regulations of the Customs Union "On the Safety of Food Products" (together with "TR TS 021/2011. Technical Regulation of the Customs Union. On the safety of food products") (In Russ.)]

⁷ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 № 36 (ред. от 06.07.2011) «О введении в действие Санитарных правил» (вместе с «СанПиН 2.3.2.1078-01. 2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 22.03.2002 № 3326) [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation from 14.11.2001 N 36 (ed. from 06.07.2011) "On the introduction of sanitary rules" (together with "SanPiN 2.3.2.1078-01. 2.3.2 Food raw materials and food products. Hygienic requirements of safety and nutritional value of food products. Sanitary-epidemiological rules and regulations", approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 06.11.2001) (Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation on 22.03.2002 N 3326) (In Russ.)]

ной энергии, населения и охране окружающей среды в случае аварии при использовании атомной энергии. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации⁸ государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии осуществляют Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и Федеральное медико-биологическое агентство России.

Закон 170-ФЗ предусматривает, что эксплуатирующая организация, которая несет всю полноту ответственности за безопасность ядерной установки, радиационного источника и пункта хранения, за надлежащее обращение с ядерными материалами и радиоактивными веществами, должна обеспечить разработку и реализацию мер по предотвращению аварий на ядерной установке, на радиационном источнике и в пункте хранения и по снижению их негативных последствий, разработку и реализацию мер по защите в случае аварии на ядерной установке для работников (персонала) указанных объектов, для населения и окружающей среды.

Общие организационно-правовые нормы в области защиты населения, объектов производственного и социального назначения, а также окружающей среды от чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера определены Федеральным законом «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (68-ФЗ), который определяет границы зон ЧС в соответствии с классификацией, утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации⁹, а также границы зон экстренного оповещения населения о ЧС. При этом, классификация ЧС от ЧС локального характера до ЧС федерального уровня основывается на трех критериях: территориальная принадлежность зоны, где нарушены условия жизнедеятельности людей (территория эксплуатирующей организации, территория одного или более муниципальных образований, одного или более субъектов Российской Федерации); количество людей, погибших и (или) получивших ущерб здоровью и величины материального ущерба, причиненного ЧС. Границы зон экстренного оповещения населения определяются органами власти субъектов Российской Федерации по согласованию с территориальными органами федеральных органов исполнительной власти, в полномочия которых входит решение задач в области защиты населения и территорий от ЧС, органами местного самоуправления и организациями, на территориях которых может возникнуть ЧС.

С учетом изложенного, представляется абсолютно актуальным вопрос аварийной готовности, АР, адекватного экстренного оповещения населения или обеспечения согласованного информационного сопровождения ЧС при запроектных авариях на ядерных энергетических установках за пределами субъектов Российской Федерации, в которых указанные установки размещены, а также на территориях, которые могут быть затронуты радиоактивными выпадениями при трансграничной ядерной или РА.

Национальные гигиенические требования по ограничению облучения персонала и населения в условиях РА определены в Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Для предотвращения детерминированных эффектов обоснованы срочные меры защиты при превышении уровней вмешательства по прогнозируемым поглощенным дозам за 2 суток на все тело человека (1 Гр) или в органах и тканях (0,1 Гр на плод, 2 Гр на хрусталик глаза, по 3 Гр в коже или гонадах, 5 Гр в щитовидной железе и 6 Гр в легких), или превышение уровней годовых поглощенных доз при хроническом облучении (0,1 Гр/год на хрусталик, 0,2 Гр/год на гонады и 0,4 Гр/год на красный костный мозг). Эти уровни вмешательства также полностью согласуются с рекомендациями по критериям вмешательства в ядерной или радиационной аварийной ситуации МАГАТЭ [33].

Решения о мерах защиты населения в случае крупной РА принимаются на основании сравнения предотвращаемых принимаемыми мерами прогнозируемых доз, а также сравнения уровней загрязнения продуктов питания с уровнями А и Б, отличающимися на один порядок величины. Критерии предотвращаемой дозы, на основании которых принимаются решения об укрытии, йодной профилактики, эвакуации, отселении, отталкиваются от цели предотвращения детерминированных эффектов. Решения по ограничению потребления продуктов питания принимаются с целью снижения риска возникновения стохастических эффектов.

В качестве защитной меры в виде обязательного (более уровня Б) укрытия населения, используются уровни облучения за 10 суток всего тела 50 мГр или 500 мГр для щитовидной железы, легких и кожи. Для проведения обязательной йодной профилактики – превышение критерия облучения щитовидной железы за 10 суток более 2,5 Гр (взрослые) и 1 Гр (дети). Для принятия решения об обязательной эвакуации дозовым критерием является предотвращаемая за 10 суток доза на все тело 500 мГр, для щитовидной железы, легких и кожи – 5 Гр.

Для предотвращения внутреннего облучения за счет потребления загрязненных пищевых продуктов и воды, ограничения их потребления вводятся в обязательном порядке при предотвращаемой эффективной дозе более 50 мЗв за первый год после аварии и 10 мЗв/год в последующие годы. Если предотвращаемые дозы превышают 500 мЗв за первый год и 1 Зв за все время, то принимается решение об отселении.

⁸ Постановление Правительства РФ от 03.07.2006 № 412 (ред. от 28.09.2018) «О федеральных органах исполнительной власти и уполномоченных организациях, осуществляющих государственное управление использованием атомной энергии и государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии» [Resolution of the Government of the Russian Federation of 03.07.2006 No. 412 (ed. 28.09.2018) "On Federal Executive Authorities and Authorised Organisations Performing State Management of Atomic Energy Use and State Regulation of Safety in the Use of Atomic Energy" (In Russ.)]

⁹ Постановление Правительства РФ от 21.05.2007 № 304 (ред. от 20.12.2019) «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [Resolution of the Government of the Russian Federation of 21.05.2007 No. 304 (ed. 20.12.2019) "On the classification of natural and man-made emergencies" (In Russ.)]

Используемая в НРБ-99/2009 система зонирования территории при РА (приложение 5 к НРБ-99/2009), по сути дела, является системой ретроспективного зонирования и предусматривает определение зон по величине годовых эффективных доз облучения населения по факту произошедшей аварии и сложившейся радиационной обстановки в результате аварийного выброса или сброса. Зонирование на ранней и промежуточной стадии РА подразумевает зону временного отселения (начало отселения – при эффективной дозе более 30 мЗв/месяц, окончание временного отселения – 10 мЗв/месяц). На восстановительной стадии РА, в соответствии с НРБ-99/2009, определяются зона радиационного контроля (годовая эффективная доза облучения – от 1 до 5 мЗв), зона ограничения проживания населения (от 5 до 20 мЗв/год), зона отселения (от 20 до 50 мЗв/год), зона отчуждения (годовая эффективная доза облучения населения – более 50 мЗв/год). Определение этих зон в проектной документации радиационного объекта, как конкретных зон и расстояний АР, затруднительно. Такой принцип зонирования не дает заблаговременного представления о необходимой степени аварийной готовности, зонах и расстояниях АР до факта аварии.

Из представленных материалов следует, что в Российской Федерации законодательно выстроена эффективная система реагирования и нормирования на случай РА, однако до настоящего времени она не учитывает новых рекомендаций, изложенных в 103 Публикации МКРЗ [9] и Стандартах МАГАТЭ [14–17].

В последнее десятилетие предпринимаются определенные шаги по гармонизации российского законодательства и нормативных документов с современными рекомендациями МКРЗ и МАГАТЭ. В 2018 году рабочей группой из представителей заинтересованных министерств и ведомств, Российской научной комиссии по радиологической защите и научных учреждений, созданной приказом Руководителя Роспотребнадзора, был разработан проект НРБ, учитывающий рекомендации 103 Публикации МКРЗ [9] и Стандартов МАГАТЭ [14–17]. Однако данный проект НРБ вступил в противоречие с Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» и не был утвержден.

В настоящее время во исполнение пункта 39 Плана мероприятий по реализации основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и на дальнейшую перспективу, утвержденного распоряжением Правительства Российской Федерации от 02.02.2019 № 139-р, разработан Проект федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» (законопроект).

Законопроектом предлагается введение новых понятий и терминов, необходимых для максимально возможной гармонизации российской системы обеспечения РБ с международными рекомендациями и стандартами безопасности МАГАТЭ. Вводятся понятия ситуаций облучения (существующее, планируемое и аварийное), а также, наряду с гигиеническими нормативами, – понятия граничных доз и референтных уровней, без которых невозможна гармонизация российской системы государственного регулирования РБ с рекомендациями международных организаций. Принятие законопроекта позволит на законодательном уровне использовать новые понятия и термины при разработке новых НРБ, гармонизированных с современными международными рекомендациями.

Кроме того, специалистами ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» разработан проект новых методических рекомендаций (МР) «Санитарно-гигиенические мероприятия Роспотребнадзора по организации радиационной защиты населения и персонала при радиационных авариях».

В связи с многократно возросшим уровнем радиационного терроризма и вероятности аварии на АЭС, разработаны и предложены в проекте МР операционные уровни, которые не требуют длительного пробоотбора, пробоподготовки, выполнения радиометрических и спектрометрических измерений, расчетов прогнозируемых и предотвращаемых доз облучения, а основаны на измерении мощности амбиентного эквивалента дозы. Оперативные критерии связаны с дозовыми уровнями вмешательства и критериями принятия неотложных мер, в соответствии с действующими НРБ-99/2009. Указанные производные величины имеют понятную и зачастую достаточно значимую долю неопределенности, но позволяют быстро оценить необходимость и начать подготовку к применению защитных мер реагирования.

Выводы

1. Система нормирования в случае аварийного облучения персонала радиационных объектов и населения Российской Федерации выстроена с учетом рекомендаций Публикации 60 МКРЗ и Международного базового стандарта по безопасности МАГАТЭ 1996 года и до выхода новой базовой Публикации 103 МКРЗ и разработанных на ее основе новых базовых Стандартов МАГАТЭ соответствовала международным подходам с учетом практики реагирования на крупномасштабные радиационные аварии и до настоящего времени надежно обеспечивает радиационную безопасность населения страны.

2. В Российской Федерации на протяжении последнего десятилетия проводится работа по гармонизации отечественного законодательства и нормативных документов с Публикацией 103 МКРЗ и действующими Стандартами МАГАТЭ. С этой целью разработан Проект федерального закона «О внесении изменений в Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» и проект новых НРБ.

3. С целью гармонизации международных и национальных подходов и практик аварийной готовности и аварийного реагирования, требует проработки и последующего внесения в нормативные правовые акты вопрос определения четких критериев категорирования видов деятельности с источниками ионизирующего излучения и радиационных объектов по степени аварийной готовности, включающих транспортирование ядерных или радиоактивных материалов, работу объектов с судовыми реакторными двигателями, установки, нестационарные работы с источниками ионизирующего излучения, выявление продукции, товаров или участков территорий имеющих техногенное радиоактивное загрязнение выше установленных нормативов, ядерные или радиационные аварии в других государствах с трансграничным перемещением радиоактивного загрязнения.

4. Для совершенствования готовности к применению мер радиационной защиты, в том числе при разработке органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации планов мероприятий по защите населения в случае крупномасштабной радиационной аварии, необходимо четкое определение в системе национальных нор-

мативных правовых актов критериев зон и расстояний аварийного реагирования с учетом необходимости обеспечения требований по предотвращению или сведению к минимуму детерминированных эффектов облучения и снижения риска возникновения стохастических эффектов как одной из целей аварийного реагирования.

5. Требуется дальнейшего изучения и решения вопроса порядка обеспечения аварийной готовности к применению мер радиационной защиты населения в субъектах Российской Федерации, на территории которых отсутствуют объекты 1 категории потенциальной радиационной опасности по действующей системе категорирования объектов, но которые должны обеспечить планирование и проведение мер радиационной защиты населения с учетом зон и расстояний аварийного реагирования при крупномасштабной радиационной аварии.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Горский Г.А. – разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, поиск и анализ литературы, обработка, анализ и интерпретация полученных результатов, обсуждение результатов, написание текста статьи.

Романович И.К. – научное руководство исследованием, определение цели исследования, обсуждение результатов, написание и редактирование текста статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021-2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России».

Литература

1. Ушаков Г.Н. Первая атомная электростанция: опыт строительства и эксплуатации. М., Л.: Госэнергоиздат, 1959. 224 с. URL: https://elbib.biblioatom.ru/text/ushakov_pervaya-atomnaya-elektrostantsiya_1959/ (Дата обращения: 25.06.2024).
2. Первая в мире атомная электростанция: Документы, статьи, воспоминания, фотографии. Гос. науч. центр Рос. Федерации — Физ.-энергет. ин-т им. А.И. Лейпунского; под общ. ред. А.А. Говердовского. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2014. 212 с.
3. IAEA. The Power Reactor Information System (PRIS). URL: <https://pris.iaea.org/pris/> (Дата обращения: 26.06.2024).
4. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 год. Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2023. 130 с.
5. Грачев В.А. Взаимосвязь глобальных экологических проблем, здоровья населения и развития атомной энергетики // Экология человека. 2018. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimosvyaz-globalnyh-ekologicheskikh-problem-zdorovya-naseleniya-i-razvitiya-atomnoy-energetiki> (Дата обращения: 26.06.2024).
6. Иванцова Е.Д., Цыро Ю.С., Пыжев А.И. Экономические аспекты участия атомной энергетики в решении проблемы глобального изменения климата // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, № 9. С. 1632–1648.
7. Кочетков О.А., Панфилов А.П., Усольцев В.Ю. и др. Радиационная гигиена и безопасность атомной отрасли // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 9. С. 868–874. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionnaya-gigiena-i-bezopasnost-atomnoy-otrasli> (Дата обращения: 17.07.2024).
8. Мухамеджанова Е.Р., Акатьев В.А. Анализ крупнейших аварий на радиационных объектах и их влияние на темпы развития атомной энергетики в мире // Глобальная ядерная безопасность. 2017. № 3 (24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-krupneyshih-avariyna-radiatsionnyh-obektah-i-ih-vliyaniye-na-tempy-razvitiya-atomnoy-energetiki-v-mire> (Дата обращения: 26.06.2024).
9. 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).
10. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1991. No 21. 90 p.
11. ICRP. Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency. ICRP Publication 63 // Annals of the ICRP. 1992. No 22 (4). URL: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2063> (Дата обращения: 16.06.2024).
12. ICRP. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96 // Annals of the ICRP. 2005. No 35 (1). URL: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2096> (Дата обращения: 16.06.2024).
13. 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.
14. IAEA Safety Fundamentals: Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1. STI/PUB/1273. IAEA: Vienna, 2006. 21 p.
15. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna, 2014. 436 p. DOI: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
16. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 7. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. STI/PUB/1708. IAEA: Vienna, 2015. 102 p. DOI: 10.61092/iaea.3dbe-055p.
17. IAEA Considerations in the Development of a Protection Strategy for a Nuclear or Radiological Emergency, Emergency Preparedness and Response. IAEA: Vienna, 2021. 218 p.
18. IAEA Safety Standards Series. No. GS-R-2. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. STI/PUB/1133. IAEA: Vienna, 2002. 72 p.
19. Николаенко Е.В., Телицына Н.В., Куц Е.П. Научное обоснование категорий угроз в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации в Республике Беларусь // Здоровье и окружающая среда. 2014. № 24–1. С. 72–75.
20. Кутыков В.А., Ткаченко В.В., Саакян С.П. Основы стратегии защиты населения в случае запроектной аварии на атомной станции. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 4. С. 5–14. DOI: 10.26583/npe.2015.4.01.
21. Ильин Л.А. Реалии и мифы Чернобыля. М.: НПП «ALARA», 1996. 473 с. URL: https://elbib.biblioatom.ru/text/ilyin_realii-mify-chernobylya_1996/p0/ (Дата обращения: 01.06.2024).
22. International Atomic Energy Agency, INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual, Non-serial Publications, IAEA, Vienna, 2013. 206 p.
23. Власова Н.Г. Радиационные аварии // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2019. № 1(21). С. 43–50.

24. Webb G.A., Anderson R.W., Gaffney M.J. Classification of events with an off-site radiological impact at the Sellafield site between 1950 and 2000, using the International Nuclear Event Scale // Journal of Radiological Protection. 2006. Vol. 26, No 1. P. 33–49.
25. Горский Г.А. К вопросу использования Международной шкалы ядерных и радиологических событий для гигиенической оценки радиационных аварий // Актуальные вопросы радиационной гигиены: материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 10–11 октября 2023 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2023. С. 104–107.
26. IAEA. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, Emergency Preparedness and Response, EPR-NPP-PPA, Vienna, 2013. 135 p.
27. Романович И.К., Брук Г.Я., Барковский А.Н. и др. Обоснование концепции перехода населенных пунктов, отнесенных в результате аварии на Чернобыльской АЭС к зонам радиоактивного загрязнения, к условиям нормальной жизнедеятельности населения // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 1. С. 6–18.
28. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Романович И.К. и др. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 3. С. 322–335.
29. IAEA. Dangerous Quantities of Radioactive Material (D-values), Emergency Preparedness and Response Series, EPR-D-VALUES 2006. IAEA: Vienna: 2006. P. 145. URL: <https://www.iaea.org/publications/7568/dangerous-quantities-of-radioactive-material-d-values> (Дата обращения: 15.07.2024).
30. IAEA. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996. 354 p. URL: https://nssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_115_1996_Pub996_EN.pdf (Дата обращения: 01.06.2024).
31. Онищенко Г.Г., Романович И.К., Историк О.А. и др. К 125-летию открытия радиоактивности: история становления и текущее состояние нормативного обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 6–16.
32. Константинов Ю.О. Чернобыльская авария: обоснование и реализация решений по защите населения // Радиационная гигиена. 2011. Т. 4, № 2. С. 59–67.
33. International Atomic Energy Agency, Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, IAEA Safety Series № 109, IAEA: Vienna, 1994. 117 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/5159/intervention-criteria-in-a-nuclear-or-radiation-emergency> (Дата обращения: 15.07.2024).

Поступила: 05.08.2024

Горский Григорий Анатольевич – кандидат медицинских наук, заместитель директора по инновационной работе 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 условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197101, ул. Мира 8, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: Gorskii@niirg.ru

ORCID: 0000-0001-7310-9718

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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-0668-459X

Для цитирования: Горский Г.А., Романович И.К. Радиационно-гигиенические аспекты аварийной готовности и аварийного реагирования на крупные радиационные аварии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 43–54. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-43-54

Radiation hygienic aspects of emergency response to major radiation accidents

Grigory A. Gorsky^{1,2}, Ivan K. Romanovich¹

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

² North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia

The pace of development of nuclear technologies is inextricably linked to the need to improve and update approaches to the preparedness of effective and adequate response to emergencies. The introduction of new solutions, which over the last few decades have significantly reduced the risks of severe consequences

Grigory A. Gorsky

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

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

of major radiation accidents, cannot guarantee their absolute absence. Improvement of the systems of deep echelon radiation protection, radiation monitoring and control, the level of training of staff of radiation facilities cannot go separately from the development of a set of emergency preparedness and emergency response measures. The aim of the work is to review the systems of response to major radiation accidents recommended by ICRP and IAEA, and Russian federal laws and regulations. The results of the work have shown that when updating and revising sanitary norms and rules in the field of radiation safety, it is recommended to consider the need to supplement the current system of classification of radiation facilities by potential radiation hazard, with system criteria for categorisation of activities by the degree of emergency preparedness. These criteria would cover not only the operation of stationary radiation facilities for which a sanitary protection zone is established, but also operations with sources of ionising radiation outside stationary conditions, including transport of radioactive substances, operation of ships with nuclear propulsion systems, as well as radiation hazardous facilities located outside the country. The introduction of such categorisation creates a basis for determining emergency response zones and distances, which will make it possible to determine an effective set of radiation protection measures for the population planned by the authorities of the constituent entities of the Russian Federation together with the operating organisations and the authorities carrying out state regulation of safety in the field of the use of atomic energy.

Key words: radiation accident, emergency preparedness category, emergency response zones and distances, radiation protection, deterministic effects.

Authors' personal contribution

Gorsky G.A. - development of the research design, formulation of scientific hypotheses, literature search and analysis, processing, analysis and interpretation of the obtained results, discussion of the results, drafting of the article.

Romanovich I.K. - scientific supervision of the research, definition of the research objective, discussion of the results, drafting and editing of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The article was prepared as part of the implementation of the Rospotrebnadzor industry research programme for 2021-2025. "Scientific justification of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, health risk management and improving the quality of life of the Russian population".

References

1. Ushakov GN. The First Nuclear Power Plant: Construction and Operation Experience. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat; 1959. 224 p. Available from: https://elbib.biblioatom.ru/text/ushakov_pervaya-atomnaya-elektrostantsiya_1959/ (Accessed 25.06.2024) (In Russian).
2. The World's First Nuclear Power Plant: Documents, Articles, Memories, Photos. The State Scientific Centre of the Russian Federation. State Scientific Centre of the Russian Federation – AI Leipunsky Institute of Physics and Energy. AI Leipunsky; ed. by A Goverdovsky. Obninsk: State Research Centre of the Russian Federation – FEI; 2014. 212 p. (In Russian).
3. IAEA. The Power Reactor Information System (PRIS). Available from: <https://pris.iaea.org/pris/> (Accessed 26.06.2024).
4. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportisation in the subjects of the Russian Federation for 2022. Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Centre of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2023. 130 p. (In Russian).
5. Grachev VA. Interrelation of global environmental problems, public health and nuclear power development. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2018;2. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/vzaimosvyaz-globalnyh-ekologicheskikh-problem-zdorovya-naseleniya-i-razvitiya-atomnoy-energetiki> (Accessed 26.06.2024) (In Russian).
6. Ivantsova E., Tsyro YuS, Pyzhev AI. Economic aspects of nuclear power participation in addressing global climate change. *Natsionalnye interesy: priority i bezopasnost = National Interests: Priorities and Security*. 2018;14(9): 1632–1648 (In Russian).
7. Kochetkov OA, Panfilov AP, Usoltsev VYu, Klochkov VN, Shinkarev SM, Simakov AV, et al. Radiation hygiene and safety of the nuclear industry. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*. 2017;96(9): 868–874. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionnaya-gigiena-i-bezopasnost-atomnoy-otrasli> (Accessed 17.07.2024) (In Russian).
8. Mukhamedzhanova ER, Akatiev VA. Analysis of the largest accidents at radiation facilities and their impact on the pace of nuclear power development in the world. *Globalnaya yadernaya bezopasnost = Global Nuclear Safety*. 2017;3(24). Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-krupneyshih-avariy-na-radiatsionnyh-obektah-i-ih-vliyaniya-na-tempy-razvitiya-atomnoy-energetiki-v-mire> (Accessed 26.06.2024) (In Russian).
9. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English / edited by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: «Alana»; 2009. 312 p. (In Russian).
10. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991;21: 90.
11. ICRP. Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency. ICRP Publication 63. *Annals of the ICRP*. 1992;22(4). Available from: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2063> (Accessed 16.06.2024).
12. ICRP. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96. *Annals of the ICRP*. 2005;35(1). Available from: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2096> (Accessed 16.06.2024).
13. Romanovich IK, Repin VS. On the new ICRP Recommendations Part 1: Fundamentals of Radiation Safety. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 47–52 (In Russian).
14. IAEA Safety Fundamentals: Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1. STI/PUB/1273. IAEA: Vienna; 2006. 21 p.
15. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna; 2014. 436 p. DOI: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
16. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 7. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency. STI/PUB/1708. IAEA: Vienna; 2015. 102 p. DOI: 10.61092/iaea.3dbe-055p.
17. IAEA Considerations in the Development of a Protection Strategy for a Nuclear or Radiological Emergency, Emergency Preparedness and Response. IAEA: Vienna; 2021. 218 p.
18. IAEA Safety Standards Series. No. GS-R-2. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. STI/PUB/1133. IAEA: Vienna; 2002. 72 p.
19. Nikolaenko EV, Telitsyna NV, Kuts EP. Scientific substantiation of threat categories in case of a nuclear or radiological emergency in the Republic of Belarus. *Zdorovie i okruzhayushchaya sreda = Health and Environment*. 2014;24-1: 72–75 (In Russian).

20. Kutkov VA, Tkachenko VV, Saakyan CP. Fundamentals of the strategy of population protection in case of beyond design basis accident at a nuclear power plant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika = News of universities. Nuclear Power Engineering*. 2015;4: 5–14. DOI: 10.26583/npe.2015.4.01 (In Russian).
21. Ilyin LA. Realities and myths of Chernobyl. Moscow: NPP "ALARA"; 1996. 473 p. Available from: https://elbib.biblioatom.ru/text/ilyin_realii-i-mify-chernobylya_1996/p0/ (Accessed 01.06.2024) (In Russian).
22. International Atomic Energy Agency, INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual, Non-serial Publications, IAEA: Vienna; 2013. 206 p.
23. Vlasova NG. Radiation accidents. *Mediko-biologicheskoe problemy zhiznedeyatel'nosti = Medico-biological problems of life activity*. 2019;1(21): 43–50 (In Russian).
24. Webb GA, Anderson RW, Gaffney MJ. Classification of events with an off-site radiological impact at the Sellafield site between 1950 and 2000, using the International Nuclear Event Scale. *Journal of Radiological Protection*. 2006;26(1): 33–49.
25. Gorsky GA. To the issue of using the International Nuclear and Radiological Event Scale for hygienic assessment of radiation accidents. Actual issues of radiation hygiene: materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, St. Petersburg, 10–11 October 2023. St. Petersburg: St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev; 2023. P. 104–107 (In Russian).
26. IAEA. Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor, Emergency Preparedness and Response, EPR-NPP-PPA, Vienna; 2013. 135 p.
27. Romanovich IK, Bruk GYa, Barkovsky AN, Bratilova AA, Gromov AV, Kaduka MV. Justification of the concept of transition of settlements classified as radioactive contamination zones as a result of the Chernobyl NPP accident to the conditions of normal life activity of the population. *Radiatsionnaya gigiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(1): 6–18 (In Russian).
28. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of returning the territories of the Russian Federation, affected by the Chernobyl NPP accident, to the conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(3): 322–335 (In Russian).
29. IAEA. Dangerous Quantities of Radioactive Material (D-values), Emergency Preparedness and Response Series, EPR-D-VALUES 2006. IAEA: Vienna; 2006. P. 145. Available from: <https://www.iaea.org/publications/7568/dangerous-quantities-of-radioactive-material-d-values> (Accessed 15.07.2024).
30. IAEA. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1996. 354 p. Available from: https://gssn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_115_1996_Pub996_EN.pdf (Accessed 01.06.2024).
31. Onischenko GG, Romanovich IK, Istorik OA, Vodovatov AV, Biblin AM, Kormanovskaya TA. On the 125th anniversary of the discovery of radioactivity: history of development and current state of regulation of the provision of the radiation safety of the public. *Radiatsionnaya Gigiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 6–16 (In Russian).
32. Konstantinov YuO. Chernobyl accident: justification and implementation of solutions to protect the population. *Radiatsionnaya Gigiena = Radiation Hygiene*. 2011;4(2): 59–67 (In Russian).
33. International Atomic Energy Agency, Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, IAEA Safety Series № 109, IAEA: Vienna; 1994. 117 p. Available from: <https://www.iaea.org/publications/5159/intervention-criteria-in-a-nuclear-or-radiation-emergency> (Accessed 15.07.2024).

Received: August 05, 2024

For correspondence: Grigory A. Gorsky – Candidate of Medical Sciences, Deputy Director of Innovation Work, 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, Department of Hygiene of Conditions of Education, Training, Work and Radiation Hygiene, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: Gorski@niirg.ru)

ORCID: 0000-0001-7310-9718

Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the 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

ORCID: 0000-0003-0668-459X

For citation: Gorsky G.A., Romanovich I.K. Radiation hygienic aspects of emergency response to major radiation accidents. *Radiatsionnaya Gigiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 43–54. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-43-54

Полиморфизм гена *hOGG1* и предрасположенность к злокачественным новообразованиям у людей, подвергшихся длительному облучению с низкой мощностью дозы

М.А. Янишевская¹, Е.А. Блинова^{1,2}, Е.А. Шишкина^{1,2}, А.В. Аклеев^{1,2}

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

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

В проведенном ранее исследовании [1] мы показали повышенный риск развития злокачественных новообразований у носителей минорного аллеля rs1052133*G гена *hOGG1*, подвергшихся хроническому низкоинтенсивному радиационному воздействию на реке Тече (Южный Урал) в широком диапазоне доз (максимально до 3507 мГр на красный костный мозг) в результате деятельности производственного объединения «Маяк» в 1950-х годах. Целью настоящего исследования являлась оценка вклада радиационного фактора в риск развития злокачественных новообразований у лиц, подвергшихся хроническому облучению на реке Тече. Для этого нами был проведен анализ фоновой генетически обусловленного риска в генеральной популяции необлученных людей на основе мета-анализа данных мировой литературы, посвященных поиску ассоциации rs1052133 гена *hOGG1* с риском развития злокачественных новообразований. На последнем этапе результаты мета-анализа сопоставлены с данными по облученным людям. В результате исследования установлено, что необлученные и облученные носители аллеля rs1052133*G имели сопоставимый повышенный риск развития злокачественных новообразований, отношение шансов 1,20; 95% доверительный интервал [1,06–1,35], $p=0,01$ и отношение шансов 1,38; 95% доверительный интервал [1,05–1,83], $p=0,023$ соответственно.

Ключевые слова: мета-анализ, фоновый уровень, генетически обусловленный риск, полиморфизм, *hOGG1*, rs1052133, Ser326Cys, злокачественные новообразования, ионизирующее излучение, Теча, Южный Урал.

Введение

В последние десятилетия в центре внимания исследователей находится вопрос индивидуальной предрасположенности к повышенному риску развития радиационно-индуцированных онкологических заболеваний у лиц, подвергшихся облучению.

Можно предполагать, что в условиях радиационного воздействия у лиц, имеющих генетическую предрасположенность к развитию рака будет зарегистрирована более высокая частота радиационно-индуцированных злокачественных новообразований (ЗНО), в отличие от лиц, не имеющих данной предрасположенности [2].

Современные исследования генетических факторов риска развития ЗНО сосредоточены на выявлении эффектов отдельных однонуклеотидных полиморфизмов (ОНП) и/или их сочетаний в генах-кандидатах, среди которых все чаще изучаются гены репарации ДНК из-за их решающей роли в поддержании целостности и стабильности генома [3–5].

Так, в недавно проведенном нами исследовании [1] хронически облучавшихся людей в результате многолетних сбросов жидких радиоактивных отходов в реку Течу [6] и радиационной аварии 1957 года [7] в диапазоне доз от нескольких десятков мГр до нескольких Гр было показано, что

носители минорного аллеля rs1052133*G, согласно доминантной модели наследования, имеют повышенный риск развития ЗНО. Значение отношения шансов у данных лиц составило 1,38, 95% ДИ [1,05–1,83], $p=0,02$.

Результаты проведенного исследования не противостоят ряду ранее опубликованных данных мировой литературы по поиску ассоциации rs1052133 с риском развития отдельных типов ЗНО [8–10], в которых также сообщается, что минорный аллель rs1052133*G снижает активность восстановления ДНК и связан с повышенным риском развития рака [11, 12].

Полиморфизм в гене *hOGG1* может влиять на индивидуальные различия в эффективности репарации повреждений, изменяя функциональные свойства ферментов, тем самым оказывая влияние на активность репарации 8-оксогуанина [13, 14]. Однонуклеотидная замена rs1052133 (Ser326Cys), представляющая трансверсию C→G в положении 1245, приводит к замене аминокислоты серина на цистеин в кодоне 326. В результате синтезируется вариант белка Ogg1, склонный к окислению и димеризации и не подвергающийся фосфорилированию по остатку Ser326, что изменяет его активность [15]. Кроме того, повреждения оснований типа 8-оксогуанина часто не распознаются ферментами репарации ДНК и, тем не менее, не блокируют синтез ДНК. Так как при синтезе ДНК напро-

Янишевская Мария Александровна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

тив их происходит ошибочная вставка оснований, они являются потенциально мутагенными и канцерогенными.

Накопление повреждений ДНК, вызванных воздействием ионизирующего излучения (ИИ), связанное с пониженной ферментативной активностью белков репарации, может привести к возникновению мутаций и, следовательно, к индукции канцерогенеза [16].

ИИ обладает канцерогенным действием, а носительство рискованного аллеля/генотипа может модифицировать риск развития ЗНО у облученных лиц.

Для установления возможного модифицирующего влияния ИИ на риск развития ЗНО среди облученных лиц, было принято решение оценить фоновый уровень генетически обусловленного риска в генеральной популяции необлученных людей на основе мета-анализа данных мировой литературы, а полученные результаты сопоставить с данными по облученным лицам, полученными в нашем предыдущем исследовании.

Материалы и методы

Выбор данных для мета-анализа

Источниками информации служили доступные статьи, опубликованные в период с 2007 по 2020 год, в которых оценивался риск развития ЗНО у носителей различных аллелей/генотипов rs1052133 гена *hOGG1*, находящиеся

в базах данных NCBI, PubMed, Web of Science, SNPedia. Процесс поиска осуществлялся на русском и английском языках. В анализ включались оригинальные статьи, согласно рекомендациям по представлению систематических обзоров и мета-анализов – PRISMA [17], удовлетворяющие следующим критериям: 1) исследования «случай-контроль», сфокусированные на ассоциации между исследуемым полиморфным участком и предрасположенностью к ЗНО различных локализаций; 2) исследования, предоставляющие достаточно данных для оценки отношения шансов (ОШ) и 95% доверительных интервалов (95% ДИ); 3) обязательное наличие данных о распределении генотипов и аллелей в контрольной и основной группах.

Мы не рассматривали: обзорные статьи, статьи без первичных данных о генотипах, исследования только лиц с ЗНО и, если распределение генотипов контрольной и/или основной группы не соответствовало равновесию Харди-Вайнберга.

Из отобранных исследований извлекалась следующая информация: имя первого автора, год публикации статьи, страна, в которой проводились исследования, тип ЗНО, размер выборки исследуемых лиц в группе с ЗНО и в группе здорового контроля с определенным генотипом.

Блок-схема проведенного мета-анализа представлена на рисунке 1.

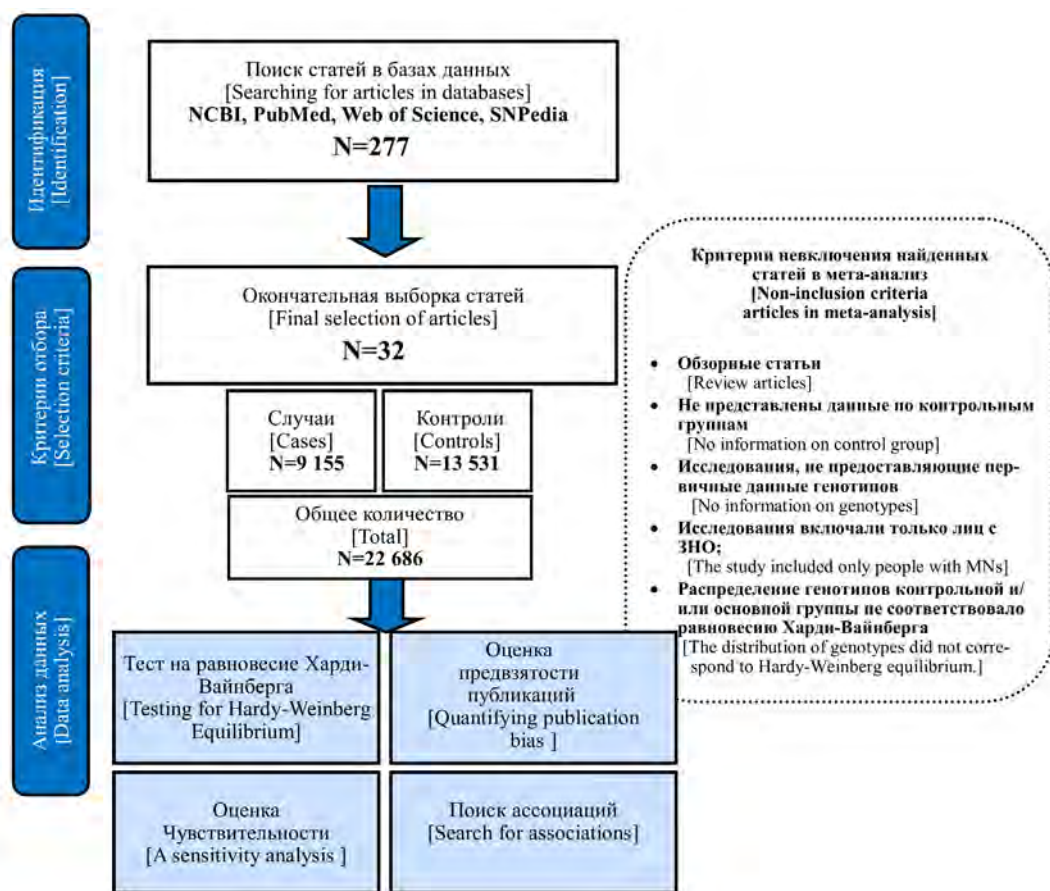


Рис. 1. Блок-схема проведенного мета-анализа
[Fig. 1. Flowchart of the meta-analysis]

Всего в результате поиска статей в базах данных было выявлено 227 потенциальных публикаций, из которых только 32 исследования подходили по заданным критериям. Характеристика исследований, включенных в мета-анализ, представлена в Приложении А.

В мета-анализ были включены в общей сложности 22 686 человек. В состав данной группы входили лица обоих полов, чуть менее половины из которых составляли представители стран Восточной Азии (Китай, Япония, Тайвань) – 49,89%, Европейских стран (Италия, Франция, Польша, Дания) – 20,10%, Южной Азии (Пакистан, Индия) – 11,07%, Среднего востока (Турция, Иран) – 2,75%, Центральной Азии (Туркменистан) – 1,97%, доля представителей стран латинской Америки составила – 7,32%, а доля представителей Африканских стран – 3,91%. Доля русских в данной выборке не превысила 2,99%. Данная группа имела широкий возрастной диапазон от 25 до 90 лет со средним возрастом, составляющим 59 лет. Количество человек

в группе «случай» составило 9 155 человек и 13 531 человек вошли в группу «контроля».

Подавляющее большинство лиц, включенных в мета-анализ, имели ЗНО органов пищеварительной системы – 43% (4250 человек). Реже встречались ЗНО органов мочевыделительной системы – 10% (1023 человек).

Среди 32 релевантных исследований в мета-анализе в группу «случай» были отобраны пациенты со следующими диагнозами: колоректальный рак (7 исследований), рак пищевода (3 исследования), рак поджелудочной железы (1 исследование), рак печени (1 исследование), гастроинтестинальные стромальные опухоли (1 исследование), рак легких (8 исследований), рак гортани (1 исследование), рак молочной железы (4 исследования), рак желчного пузыря (3 исследования), рак мочевого пузыря (2 исследования), рак почки (1 исследование). Структура заболеваемости ЗНО у лиц, включенных в мета-анализ, была схожей со структурой ЗНО у облученных жителей Уральского региона (рис. 2).

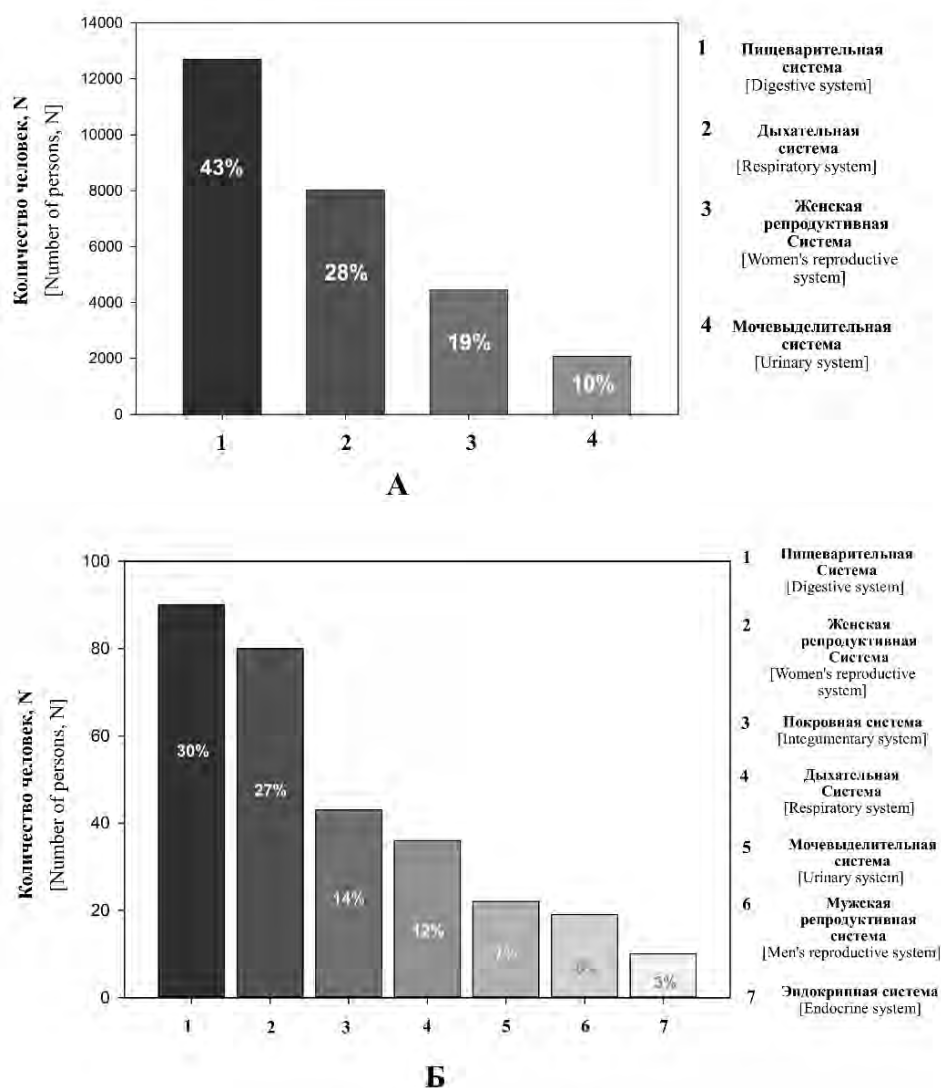


Рис.2. Структура ЗНО у лиц, включенных (А) в мета-анализ; (Б) структура ЗНО у облученных жителей Уральского региона [1]

[Fig. 2. Structure of MNs in the individuals included (A) in the meta-analysis; (B) exposed population of Urals region [1]]

Описание группы облученных лиц

Группа облученных [1] состояла из 888 людей, среди которых 300 человек имели подтвержденные случаи ЗНО различных локализаций в отдаленные сроки после облучения. Для них была обнаружена связь rs1052133 гена *hOGG1* с повышенным риском развития ЗНО. Структура ЗНО в группе облученных лиц [1] представлена на рисунке 2.

Облучение было хроническим, низкоинтенсивным со снижающейся со временем мощностью дозы. Из-за остеотропного ^{90}Sr дозы внутреннего облучения исследуемых были распределены крайне неравномерно по органам и дозы на красный костный мозг (ККМ) могли на порядок превышать дозы на внескелетные органы и ткани. В таблице 1 приведена информация по распределению накопленных доз в исследуемых группах.

Таблица 1

Дозовые характеристики исследуемых групп облученных лиц

[Table 1]

Dose characteristics of the studied groups of exposed individuals

Показатели [Parameters]	Облученные с ЗНО [Exposed with MNs] N=300	Облученные без ЗНО [Exposed without MNs] N=588	Объединенная группа [Joint group] N=888
Среднее значение и диапазон доз облучения ККМ, мГр [Mean value and range of RBM doses, mGy]	523,1 ± 33,89 (0,74 – 3507,1)*	592,83 ± 26,14 (0,70 – 3393,5)*	569,28 ± 20,77 (0,70 – 3507,1)*
Число и доля лиц с дозой облучения ККМ [Number and proportion of persons with RBM dose]			
<100 мГр [mGy]	98 (32,7%)	193 (32,8%)	291 (32,8%)
100 – 1000 мГр [mGy]	139 (46,3%)	259 (44,1%)	398 (44,8%)
>1000 мГр [mGy]	63 (21%)	136 (23,1%)	199 (22,4%)

* Среднее значение ± ошибка среднего (минимум – максимум) [Mean ± standard error of mean (minimum – maximum)].

Важно отметить, что исследуемые имели накопленные дозы облучения ККМ в диапазоне от 0,70 до 3507,07 мГр, а средняя доза облучения ККМ не превышала 570 мГр. Из таблицы 1 хорошо видно, что в исследованных группах распределение доз практически совпадало.

Облученное население Уральского региона так же, как и в данных для мета-анализа, не мононационально. Оно состоит из европеоидной группы (главным образом, русские) и монголоидной (главным образом, татары и башкиры). Подробная информация о половозрастном и этническом составе исследуемых групп представлена в публикации [1].

Статистический анализ

Мета-анализ проводился с использованием веб-инструмента MetaGenyo¹. Для проверки равновесия Харди-Вайнберга в исследуемых группах применялся тест χ^2 . Значение p рассчитывалось с поправкой Бонферрони. Неоднородность публикаций оценивали с использованием статистики I^2 и интерпретировались на основе исследования [18], где 25, 50 и 75% представляют собой низкую, умеренную и высокую степень неоднородности соответственно. При значении $I^2 \geq 50\%$ использовалась модель случайных эффектов (модель ДерСимониана и Лэрда).

Для исследуемой выборки лиц оценка влияния rs1052133 гена *hOGG1* на риск развития ЗНО проводилась при использовании расчёта объединенного коэффициента ОШ с 95% ДИ в рецессивной и доминантной генетических моделях. Для визуализации полученных результатов в генеральной популяции и у облученных людей использовалась диаграмма типа «лесной участок».

Для оценки надежности полученных результатов был проведен анализ чувствительности и предвзятости публикаций. Чувствительность анализировали путем последовательного исключения отдельных исследований. Предвзятость публикаций проверялась с помощью воронкообразного графика и теста линейной регрессии Эггера [19, 20]. Систематическая ошибка публикации считалась значимой при $p < 0,10$.

Результаты и обсуждение

Оценка ассоциации rs1052133 гена *hOGG1* с риском развития ЗНО различных локализаций на основе мета-анализа данных

В ходе проведенного мета-анализа была выявлена статистически значимая связь минорного аллеля rs1052133*G с повышенным риском развития злокачественных опухолей у необлученных людей (табл. 2).

Поскольку p -значение для I^2 теста в исследуемых моделях были менее 0,10, а значения I^2 находились в диапазоне от 70% до 79%, что свидетельствовало о наличии статистической неоднородности среди исследований, в мета-анализе была использована модель случайных эффектов. Была выявлена статистически значимая связь между минорным аллелем rs1052133*G и риском развития ЗНО для исследуемых моделей наследования. Для доминантной модели ОШ=1,20, 95% ДИ [1,06–1,35], $p=0,01$; для рецессивной модели наследования ОШ=1,34, 95% ДИ [1,11–1,62]; $p=0,01$.

¹ Доступно по ссылке [Available from]: <http://bioinfo.genyo.es/metagenyo/>

Таблица 2

Результаты ассоциации rs1052133 гена *hOGG1* с риском развития ЗНО различных локализаций на основе мета-анализа данных

[Table 2

Results of the association of rs1052133 of the *hOGG1* gene with the risk of developing MNs of various locations based on the meta-analysis]

Модель [Model]	Тест на гетерогенность [Test for heterogeneity]		Модель случайных эффектов [Random effects model]	
	I^2	p_1^*	ОШ [95% ДИ] [OR [95% CI]]	p_2^*
Рецессивная модель [Recessive model] G/G C/G-C/C	79%	< 0,01	1,34 [1,11–1,62]	0,01
Доминантная модель [Dominant model] C/C C/G-G/G	70%	< 0,01	1,20 [1,06–1,35]	0,01

* p_1 – значение p для I^2 статистики; p_2 – значение p для ОШ в модели случайных эффектов с поправкой Бонферрони [p_1 – value for I^2 statistics; p_2 – value for OR in random effects model with Bonferroni correction].

Анализ предвзятости
и чувствительности публикаций

Для полученных статистически значимых данных был проведен анализ чувствительности и предвзятости публикаций.

Оценка систематической ошибки публикаций на предмет асимметрии данных была выполнена путем визуальной оценки воронкообразного графика (рис. 3), а также с использованием теста линейной регрессии Эггера.

Обнаружена статистически значимая асимметрия для публикаций, относящихся к доминантной модели наследования ($p=0,003$). При этом не обнаружено каких-либо этнических отличий или разницы в локализациях ЗНО для выпадающих из «графика-воронки» и остальных публикаций. Это означает, что с большой долей вероятности имеются ошибки в публикациях. Для рецессивной модели вероятность ошибки публикаций не является статистически значимой.

Следует отметить, что публикации, выпадающие из «воронки» и представляющие потенциальную возможность

привнесения ошибки в мета-анализ, включают 16% от общего количества исследованных разными авторами человек.

Анализ чувствительности был проведен методом Leave-One-Out (кросс-валидация по отдельным объектам). Данный анализ повторяется каждый раз, исключая одно исследование, чтобы проверить, вносит ли какое-либо отдельное исследование наибольший вклад в общую статистику, чем остальные.

Проведенный анализ чувствительности не показал значимого влияния какого-либо отдельного исследования на ОШ. Результаты оставались стабильными как для доминантной, так и для рецессивной модели. На рисунке 4 показаны оценки ОШ за исключением каждого отдельного исследования в сравнении с оценкой на основе всех работ. Максимальное отклонение в рецессивной модели демонстрирует исключение из анализа работы Romanowicz et al. (2017) [45], однако оно не превышает 12%; в то же время, в доминантной модели максимальное отклонение наблюдается при исключении исследования Krupa et al. (2017) [35], которое также является незначительным – 5%.

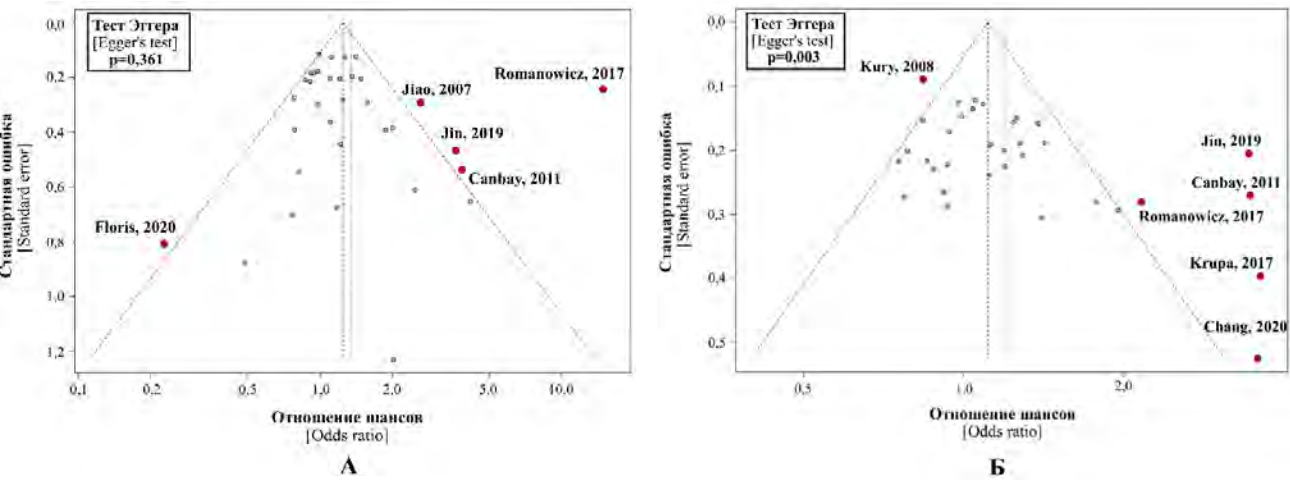


Рис. 3. Анализ графика воронки для выявления предвзятости публикации в рецессивной модели (А) и в доминантной модели (Б)

[Fig. 3. Funnel plot analysis to detect publication bias in the recessive model (A) and in the dominant model (B)]

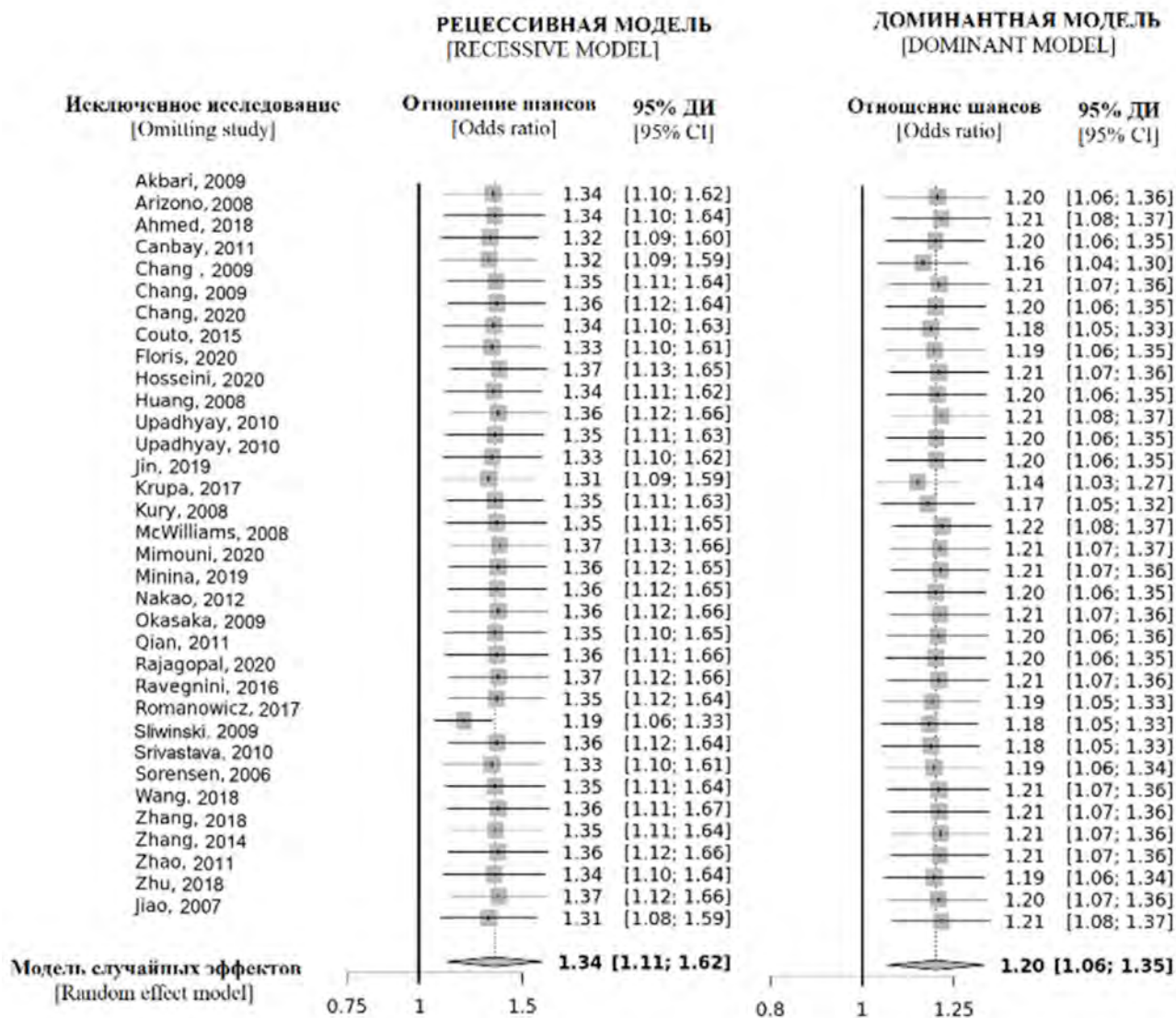


Рис.4. Анализ чувствительности обобщенных коэффициентов ОШ ассоциации между rs1052133 гена *hOGG1* с риском развития ЗНО. Ромбом обозначается оценка ОШ по всем публикациям

[Fig. 4. Sensitivity analysis of generalized OR coefficients for the association between rs1052133 of the *hOGG1* gene and the risk of developing MNs. The diamond represents the overall effect estimate of the meta-analysis]

Таким образом, результаты оценки ОШ, полученные как для доминантной, так и рецессивной модели наследования (табл. 2), мы рассматриваем как релевантные, характеризующие связь между минорным аллелем rs1052133*G и риском развития ЗНО в генеральной популяции.

*Сравнение ОШ для риска развития ЗНО в генеральной популяции и у хронически облученных носителей rs1052133*G*

В соответствии с доминантной моделью наследования было установлено, что риск развития ЗНО у облученных носителей минорного аллеля rs1052133*G был статистически значимо выше ОШ=1,38; 95% ДИ [1,05-3,83], $p=0,02$. Примем ОШ для риска развития ЗНО в генеральной популяции, полученное выше по данным мета-анализа, за ОШ, характерное для необлученных лиц.

На рисунок 5 представлен график «лесного участка», включающий как литературные данные, так и ОШ для облу-

ченных [1] в доминантной модели наследования. Красная пунктирная линия – ОШ, характерное для необлученных.

У облученных в доминантной модели наследования ОШ в среднем на 15% выше, чем в генеральной популяции. Из рисунка 5 видно, что существует перекрытие доверительных интервалов более чем на 30% у облученных лиц и людей, включенных в мета-анализ, что указывает на отсутствие статистически значимых отличий между рисками развития ЗНО у хронически облученных людей в накопленных дозах на ККМ, не превышающих 3507 мГр и необлученных людей. При этом 95% ДИ у облученных почти в 3 раза шире такового для необлученных. Это может быть как результатом малой статистики, так и большей индивидуальной вариабельности в ответ на воздействие хронического низкоинтенсивного ионизирующего излучения. Для уточнения этого вопроса требуются дальнейшие исследования.

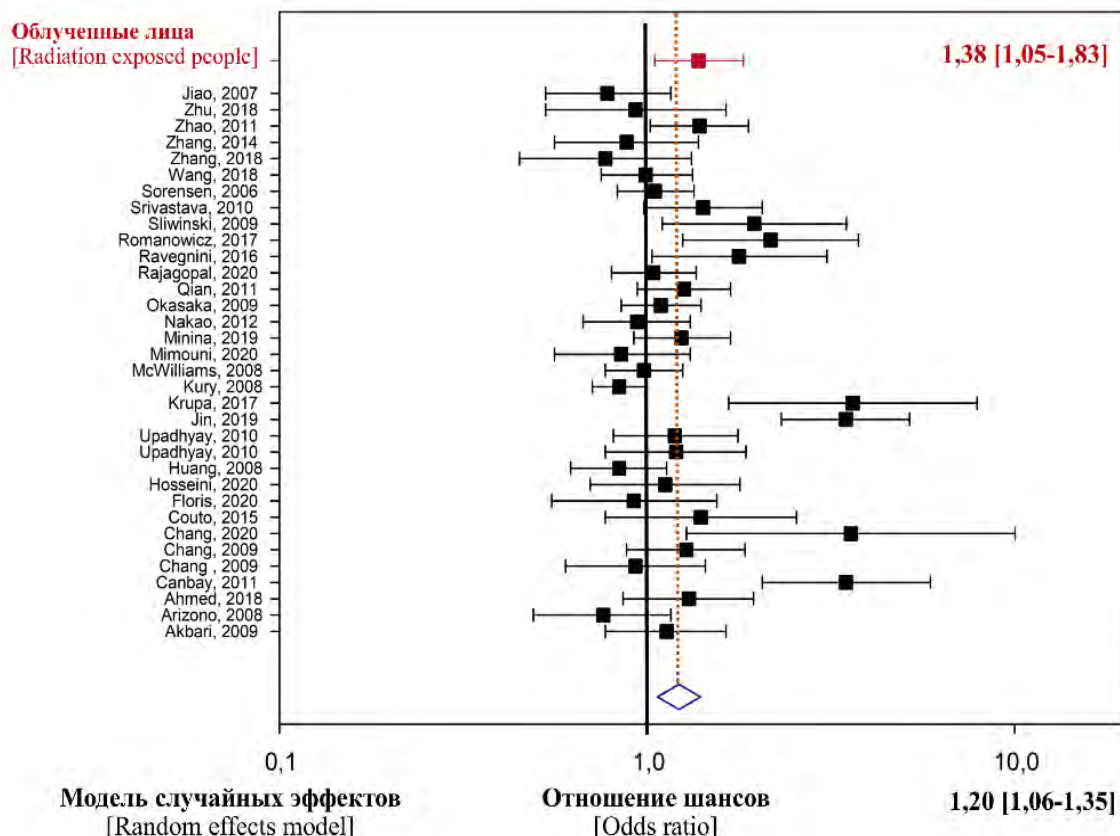


Рис. 5. График «лесного участка», построенный по данным мета-анализа по поиску ассоциации rs1052133 гена *hOGG1* с риском развития ЗНО в доминантной модели наследования

Обозначения: ось абсцисс (логарифмическая) – lgОШ; lgОШ=1,0 – линия нулевого эффекта; точки в виде квадратов – значения lgОШ для каждого отдельного исследования в мета-анализе; горизонтальные «усы» – десятичные логарифмы 95% ДИ; ромбом обозначается обобщенная оценка эффекта – 95% ДИ в мета-анализе с поправками на случайные эффекты

[Fig. 5. Graph of a «Forest plot» based on data meta-analysis to search for the association of rs1052133 of the *hOGG1* gene with the risk of developing MNs in the dominant model]

Designations: abscissa axis (logarithmic) – lgOR; logOR=1.0 – line of zero effect; dots in the form of squares – logOR values for each individual study in the meta-analysis; horizontal «whiskers» – decimal logarithms of 95% CI; The diamond denotes the pooled effect estimate – 95% CI in meta-analysis adjusted for random effects

Заключение

На основе проведенного мета-анализа по поиску ассоциации rs1052133 гена *hOGG1* с заболеваемостью ЗНО был оценен фоновый уровень риска у необлученных людей. Нами были найдены и обобщены все доступные релевантные исследования, опубликованные в период с 2007 по 2020 гг., посвященные оценке риска развития ЗНО в генеральной совокупности необлученных людей.

Проведенный мета-анализ, включающий 9155 «случаев» и 13531 «контролей» из 32 оригинальных исследований, показал, что аллель rs1052133*G является фактором повышенного риска развития ЗНО. В доминантной модели наследования отношения шансов у облученных – в раннее проведенном нами исследовании и необлученных – по результатам мета-анализа оказались близкими по величине и статистически значимых отличий между облученными и необлученными не обнаружено. Важно подчеркнуть, что средние дозы облучения ККМ у лиц когорты реки Течи составили порядка 570 мГр (0,70 – 3507,07 мГр).

Отсутствие статистически значимых различий в значении риска между облученными и необлученными людьми, вероятно, связано с тем, что при хроническом воздействии радиации с низкой мощностью на первый план выходят именно генетически детерминированные особенности организма, в отличие от острого радиационного воздействия с высокой мощностью дозы облучения.

Таким образом, по результатам данного исследования можно сделать вывод о возможности использования rs1052133 гена *hOGG1* в качестве биологического предиктора ЗНО как у облученных, так и у необлученных людей. Исследование также показало, что определяющими факторами риска ЗНО при хроническом облучении человека в широком диапазоне доз с низкой мощностью являются преимущественно индивидуальные особенности организма человека, природу которых предстоит исследовать. Принимая во внимание данные литературы [21, 22], определенное значение может иметь участие гена *hOGG1* в распознавании и репарации первичных радиационных повреждений ядерной ДНК по типу 8-оксигуанина, которые являются потенциально канцерогенными.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Янишевская М.А. – разработка дизайна исследования, сбор, анализ и интерпретация полученных результатов, написание текста статьи.

Блинова Е.А. – разработка дизайна исследования, редактирование текста статьи.

Шишкина Е.А. – статистическая обработка и интерпретация полученных данных, редактирование текста статьи.

Аклеев А.В. – научное руководство, редактирование текста статьи, интерпретация полученных данных, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года».

Литература

- Янишевская М.А., Блинова Е.А., Кореченкова А.В., Аклев А.В. Анализ связи полиморфного локуса rs1052133 гена *OGG1* с риском развития злокачественных новообразований у людей, подвергшихся радиационному воздействию // Бюллетень Радиация и риск. 2023. Т. 32, № 3. С. 97–108.
- Chakraborty R., Sankaranarayanan K. Cancer predisposition, radiosensitivity and the risk of radiation-induced cancers. II. A Mendelian single-locus model of cancer predisposition and radiosensitivity for predicting cancer risks in populations // Radiation research. 1995. Vol. 143. P. 293–301.
- Yin J., Vogel U., Ma Y. et al. The DNA repair gene XRCC1 and genetic susceptibility of lung cancer in a northeastern Chinese population // Lung cancer (Amsterdam, Netherlands). 2007. Vol. 56. P. 153–160. DOI: 10.1016/j.lungcan.2006.12.012.
- Yen C.Y., Liu S.Y., Chen C.H. et al. Combinational polymorphisms of four DNA repair genes XRCC1, XRCC2, XRCC3, and XRCC4 and their association with oral cancer in Taiwan // Journal of Oral Pathology and Medicine. 2008. Vol. 37. P. 271–277.
- Xue X., Yin Z., Lu Y. et al. The joint effect of hOGG1, APE1, and ADPRT polymorphisms and cooking oil fumes on the risk of lung adenocarcinoma in Chinese non-smoking females // PloS One. 2013. Vol. 8. P. e71157.
- Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И., Толстых Е.И. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949 – 1956 гг. // Радиационная биология. Радиозология. 2016. Т. 56, № 5. С. 523–534.
- Силкин С.С., Крестнина Л.Ю., Старцев В.Н., Аклев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21, № 3. С. 393–402.
- Kabzinski J., Walczak A., Dzik A. et al. Impact of the Ser326Cys polymorphism of the OGG1 gene on the level of oxidative DNA damage in patients with colorectal cancer // Polski Przegląd Chirurgiczny. 2018. Vol. 90, No 2. P. 13–15. DOI: 10.5604/01.3001.0011.7486.
- Hatt L., Loft S., Risom L. et al. OGG1 expression and OGG1 Ser326Cys polymorphism and risk of lung cancer in a prospective study // Mutation Research. 2008. Vol. 639, No 1–2. P. 45–54. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2007.11.002
- Alanazi M., Pathan A.A.K., Shaik J.P. et al. The hOGG1 Ser326Cys Gene Polymorphism and Breast Cancer Risk in Saudi Population // Pathology and Oncology Research. 2017. Vol. 23, No 3. P. 525–535. DOI: 10.1007/s12253-016-0146-6.
- Weiss J.M., Goode E.L., Ladiges W.C., Ulrich C.M. Polymorphic variation in hOGG1 and risk of cancer: a review of the functional and epidemiologic literature // Molecular Carcinogenesis. 2005. Vol. 42, No 3. P. 127–141. DOI: 10.1002/mc.20067.
- Kohno T., Shinmura K., Tosaka M. et al. Genetic polymorphisms and alternative splicing of the hOGG1 gene, that is involved in the repair of 8-hydroxyguanine in damaged DNA // Oncogene. 1998. Vol. 16, No 25. P. 3219–3225. DOI: 10.1038/sj.onc.1201872.
- Lunn R.M., Langlois R.G., Hsieh L.L. et al. XRCC1 polymorphisms: Effects on aflatoxin B1-DNA adducts and glycoprotein A variant frequency // Cancer Research. 1999. Vol. 59, No 11. P. 2557–2561.
- Park Y.J., Choi E.Y., Choi J.Y. et al. Genetic changes of hOGG1 and the activity of oh8Gua glycosylase in colon cancer // European Journal of Cancer. 2001. Vol. 37, No 3. P. 340–346. DOI: 10.1016/s0959-8049(00)00388-9.
- Ендуткин А.В., Жарков Д.О. GO-система: путь репарации ДНК для борьбы с окислительными повреждениями // Молекулярная биология. 2021. Т. 55, № 2. С. 223–242.
- Yuan S.S., Hou M.F., Hsieh Y.C. et al. Role of MRE11 in cell proliferation, tumor invasion, and DNA repair in breast cancer // Journal of the National Cancer Institute. 2012. Vol. 104, No 19. P. 1485–1502. DOI: 10.1093/jnci/djs355.
- Moher D., Liberati A., Tetzlaff J., Altman D.G. The PRISMA Group. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement // Open Medicine Journal. 2009. Vol. 3, No 3. P. 123–130. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.005.
- Higgins J.P.T., Altman, D.G., Gotzsche P.C. et al. Cochrane Bias Methods Group. The Cochrane Collaboration's tool for assessing risk of bias in randomised trials // British Medical Journal. 2011. Vol. 18, No 343. P. (7829):d5928. DOI: 10.1136/bmj.d5928.
- Egger M., Davey Smith G., Schneider M., Minder C. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test // British Medical Journal. 1997. Vol. 315, No 7109. P. 629–634. DOI: 10.1136/bmj.315.7109.629.
- Stuck A.E., Rubenstein L.Z., Wieland D. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. Asymmetry detected in funnel plot was probably due to true heterogeneity // British Medical Journal. 1998. Vol. 316, No 7129. P. 469–471. DOI: 10.1136/bmj.316.7129.469.
- Klaunig J.E., Kamendulis L.M., Hocevar B.A. Oxidative stress and oxidative damage in carcinogenesis // Toxicologic Pathology. 2010. Vol. 38, No 1. P. 96–109. DOI: 10.1177/0192623309356453.
- Cooke M.S., Evans M.D., Dizdaroglu M., Lunec J. Oxidative DNA damage: mechanisms, mutation, and disease // FASEB journal: official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology. 2003. Vol. 17, No 10. P. 1195–1214. DOI: 10.1096/fj.02-0752rev.
- Akbari M.R., Malekzadeh R., Shakeri R. et al. Candidate gene association study of esophageal squamous cell carcinoma in a high-risk region in Iran // Cancer Research. 2009. Vol. 69, No 20. P. 7994–8000. DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-09-1149.
- Arizono K., Osada Y., Kuroda Y. DNA repair gene *hOGG1* codon 326 and *XRCC1* codon 399 polymorphisms and bladder cancer risk in a Japanese population // Japanese Journal of Clinical Oncology. 2008. Vol. 38, No 3. P. 186–191. DOI: 10.1093/jjco/hym176.

25. Ahmed T., Nawaz S., Noreen R. et al. A 3' untranslated region polymorphism rs2304277 in the DNA repair pathway gene *OGG1* is a novel risk modulator for urothelial bladder carcinoma // *Annals of Human Genetics*. 2018. Vol. 82, No 2. P. 74–87. DOI: 10.1111/ahg.12225.
26. Canbay E., Cakmakoglu B., Zeybek U. et al. Association of *APE1* and *hOGG1* polymorphisms with colorectal cancer risk in a Turkish population // *Current Medical Research and Opinion*. 2011. Vol. 27, No 7. P. 1295–1302. DOI: 10.1185/03007995.2011.573544.
27. Chang J.S., Wrensch M.R., Hansen H.M. et al. Base excision repair genes and risk of lung cancer among San Francisco Bay Area Latinos and African-Americans // *Carcinogenesis*. 2009. Vol. 30, No 1. P. 78–87. DOI: 10.1093/carcin/bgn261.
28. Chang W.S., Shen T.C., Liao J.M. et al. Significant Contribution of DNA Repair Human 8-Oxoguanine DNA N-Glycosylase 1 Genotypes to Renal Cell Carcinoma // *Oncotargets and Therapy*. 2020. No 13. P. 1583–1591. DOI: 10.2147/OTT.S231733.
29. Couto P.G., Bastos-Rodrigues L., Carneiro J.G. et al. DNA Base-Excision Repair Genes *OGG1* and *NTH1* in Brazilian Lung Cancer Patients // *Molecular Diagnosis and Therapy*. 2015. Vol. 19, No 6. P. 389–395. DOI: 10.1007/s40291-015-0164-1.
30. Floris M., Sanna D., Castiglia P. et al. *MTHFR*, *XRCC1* and *OGG1* genetic polymorphisms in breast cancer: a case-control study in a population from North Sardinia // *BMC Cancer*. 2020. Vol. 20, No 1. P. 234. DOI: 10.1186/s12885-020-06749-w.
31. Hosseini S.M., Mohammadiasl J., Talaiezhadeh A. et al. Influence of Two DNA Repair Pathway Polymorphisms in Colorectal Cancer Risk in Southwest Iran // *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2020. Vol. 21, No 7. P. 1919–1924. DOI: 10.31557/APJCP.2020.21.7.1919.
32. Huang W.Y., Gao Y.T., Rashid A. et al. Selected base excision repair gene polymorphisms and susceptibility to biliary tract cancer and biliary stones: a population-based case-control study in China // *Carcinogenesis*. 2008. Vol. 29, No 1. P. 100–105. DOI: 10.1093/carcin/bgm247.
33. Upadhyay R., Malik M.A., Zargar S.A., Mittal B. *OGG1* Ser326Cys polymorphism and susceptibility to esophageal cancer in low and high at-risk populations of northern India // *Journal of Gastrointestinal Cancer*. 2010. Vol. 41, No 2. P. 110–115. DOI: 10.1007/s12029-009-9124-5.
34. Jin D., Zhang M., Hua H. Impact of polymorphisms in DNA repair genes *XPD*, *hOGG1* and *XRCC4* on colorectal cancer risk in a Chinese Han Population // *Bioscience Reports*. 2019. Vol. 39, No 1. P. BSR20181074. DOI: 10.1042/BSR20181074.
35. Krupa R., Czarny P., Wigner P. et al. The Relationship Between Single-Nucleotide Polymorphisms, the Expression of DNA Damage Response Genes, and Hepatocellular Carcinoma in a Polish Population // *DNA and Cell Biology*. 2017. Vol. 36, No 8. P. 693–708. DOI: 10.1089/dna.2017.3664.
36. Kury S., Buecher B., Robiou-du-Pont S. et al. Low-penetrance alleles predisposing to sporadic colorectal cancers: a French case-controlled genetic association study // *BMC Cancer*. 2008. Vol. 7, No 8. P. 326. DOI: 10.1186/1471-2407-8-326.
37. McWilliams R.R., Bamlet W.R., Cunningham J.M. et al. Polymorphisms in DNA repair genes, smoking, and pancreatic adenocarcinoma risk // *Cancer Research*. 2008. Vol. 68, No 12. P. 4928–4935. DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-07-5539.
38. Mimouni A., Rouleau E., Saulnier P. et al. Association of TERT, *OGG1*, and *CHRNA5* Polymorphisms and the Predisposition to Lung Cancer in Eastern Algeria // *Pulmonary Medicine*. 2020. P. 1–12. DOI: 10.1155/2020/7649038.
39. Minina V.I., Bakanova M.L., Soboleva O.A. et al. Polymorphisms in DNA repair genes in lung cancer patients living in a coal-mining region // *European Journal of Cancer Prevention*. 2019. Vol. 28, No 6. P. 522–528. DOI: 10.1097/CEJ.0000000000000504.
40. Nakao M., Hosono S., Ito H. et al. Selected polymorphisms of base excision repair genes and pancreatic cancer risk in Japanese // *Journal of Epidemiology*. 2012. Vol. 22, No 6. P. 477–483. DOI: 10.2188/jea.JE20120010.
41. Okasaka T., Matsuo K., Suzuki T. et al. *hOGG1* Ser326Cys polymorphism and risk of lung cancer by histological type // *Journal of Human Genetics*. 2009. Vol. 54, No 12. P. 739–745. DOI: 10.1038/jhg.2009.108.
42. Qian B., Zhang H., Zhang L. et al. Association of genetic polymorphisms in DNA repair pathway genes with non-small cell lung cancer risk // *Lung Cancer*. 2011. Vol. 73, No 2. P. 138–146. DOI: 10.1016/j.lungcan.2010.11.018.
43. Rajagopal T., Seshachalam A., Rathnam K.K. et al. DNA repair genes *hOGG1*, *XRCC1* and *ERCC2* polymorphisms and their molecular mapping in breast cancer patients from India // *Molecular Biology Reports*. 2020. Vol. 47, No 7. P. 5081–5090. DOI: 10.1007/s11033-020-05577-2.
44. Ravegnini G., Nannini M., Simeon V. et al. Polymorphisms in DNA repair genes in gastrointestinal stromal tumours: susceptibility and correlation with tumour characteristics and clinical outcome // *Tumor Biology*. 2016. Vol. 37, No 10. P. 13413–13423. DOI: 10.1007/s13277-016-5276-7.
45. Romanowicz H., Pyziak L., Jablonski F. et al. Analysis of DNA Repair Genes Polymorphisms in Breast Cancer // *Pathology and oncology research*. 2017. No 1. P. 117–123. DOI: 10.1007/s12253-016-0110-5.
46. Sliwinski T., Krupa R., Wisniewska-Jarosinska M. et al. Common polymorphisms in the *XPD* and *hOGG1* genes are not associated with the risk of colorectal cancer in a Polish population // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. 2009. Vol. 218, No 3. P. 185–191.
47. Srivastava K., Srivastava A., Mittal B. Polymorphisms in *ERCC2*, *MSH2*, and *OGG1* DNA repair genes and gallbladder cancer risk in a population of Northern India // *Cancer*. 2010. Vol. 116, No 13. P. 3160–3169. DOI: 10.1002/cncr.25063.
48. Sorensen M., Raaschou-Nielsen O., Hansen R.D. et al. Interactions between the *OGG1* Ser326Cys polymorphism and intake of fruit and vegetables in relation to lung cancer // *Free Radical Research*. 2006. Vol. 40, No 8. P. 885–891. DOI: 10.1080/10715760600733129.
49. Wang T., Wang H., Yang S. et al. Association of *APEX1* and *OGG1* gene polymorphisms with breast cancer risk among Han women in the Gansu Province of China // *BMC Medical Genetics*. 2018. Vol. 19, No 1. P. 67. DOI: 10.1186/s12881-018-0578-9.
50. Zhang Q., Zheng X., Li X. et al. The polymorphisms of miRNA-binding site in *MLH3* and *ERCC1* were linked to the risk of colorectal cancer in a case-control study // *Cancer Medicine*. 2018. Vol. 7, No 4. P. 1264–1274. DOI: 10.1002/cam4.1319.
51. Zhang S.H., Wang L.A., Li Z. et al. *APE1* polymorphisms are associated with colorectal cancer susceptibility in Chinese Hans // *World Journal of Gastroenterology*. 2014. Vol. 20, No 26. P. 8700–8708. DOI: 10.3748/wjg.v20.i26.8700.
52. Zhao H., Qin C., Yan F. et al. *hOGG1* Ser326Cys polymorphism and renal cell carcinoma risk in a Chinese population // *DNA and Cell Biology*. 2011. Vol. 30, No 5. P. 317–321. DOI: 10.1089/dna.2010.1135.
53. Zhu Y., Guo L., Wang S. et al. Association of Smoking and *XPG*, *CYP1A1*, *OGG1*, *ERCC5*, *ERCC1*, *MMP2*, and *MMP9* Gene Polymorphisms with the early detection and occurrence of Laryngeal Squamous Carcinoma // *International Journal of Cancer*. 2018. Vol. 9, No 6. P. 968–977. DOI: 10.7150/ijca.22841.
54. Jiao X., Huang J., Wu S. et al. *hOGG1* Ser326Cys polymorphism and susceptibility to gallbladder cancer in a Chinese population // *International Journal of Cancer*. 2007. Vol. 121, No 3. P. 501–505. DOI: 10.1002/ijc.22748.

Поступила: 01.02.2024

Янишевская Мария Александровна – младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-клеточной радиобиологии Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: yanishevskaya@urcrm.ru
ORCID: 0000-0002-2649-5123

Блинова Евгения Андреевна – кандидат биологических наук, заведующая лабораторией молекулярно-клеточной радиобиологии Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России; доцент кафедры радиационной биологии Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия
ORCID: 0000-0002-2567-7945

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, заведующая биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России; доцент кафедры радиационной биологии Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия
ORCID: 0000-0003-4464-0889

Аклеев Александр Васильевич – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России; заведующий кафедрой радиационной биологии Челябинского государственного университета, Челябинск, Россия
ORCID: 0000-0003-2583-5808

Для цитирования: Янишевская М.А., Блинова Е.А., Шишкина Е.А., Аклеев А.В. Полиморфизм гена *hOGG1* и предрасположенность к злокачественным новообразованиям у людей, подвергшихся длительному облучению с низкой мощностью дозы // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 55–67. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-55-67

Polymorphism of *hOGG1* gene and susceptibility to malignant neoplasms in people affected by long-term low dose rate exposure

Mariya A. Yanishevskaya¹, Evgenia A. Blinova^{1,2}, Elena A. Shishkina^{1,2}, Alexander V. Akleyev^{1,2}

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

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

*In the previous study [1], we showed an increased risk of malignant neoplasms in carriers of the minor allele rs1052133*G of the hOGG1 gene who were affected by chronic radiation exposure at a wide range of doses (up to 3,507 mGy to the red bone marrow) at the Techa River (Southern Urals) contaminated due to the activities of the Mayak Production Association in the 1950s. The objective of the present study was to assess the contribution of radiation factor to the risk of malignant neoplasms development in persons chronically exposed at the Techa River. For this purpose, we analyzed the background level of genetically determined risk in the general population of unexposed people on the basis of meta-analysis of the world literature data on the search for the association of rs1052133 of the hOGG1 gene with the risk of malignant neoplasms development. At the final stage, the results of the meta-analysis were compared with data on exposed people. The study found that unexposed and exposed carriers of the rs1052133*G allele had a comparable increased risk of developing malignant neoplasms, odds ratio 1.20; 95% confidence interval [1.06–1.35], $p=0.01$ and odds ratio =1.38; 95% confidence interval [1.05–1.83], $p=0.023$, respectively.*

Key words: meta-analysis, background level, genetically determined risk, polymorphisms, *hOGG1*, rs1052133, Ser326Cys, malignant neoplasms, ionizing radiation, the Techa River, Southern Urals.

Authors' personal contribution

Yanishevskaya M.A. – development of research design. Collection, analysis and interpretation of the results obtained, writing the text of the article.

Blinova E.A. – development of research design, article editing. Shishkina E.A. – statistical processing and interpretation of the data obtained, editing the text of the article.

Akleyev A.V. – scientific supervision, article editing, interpretation of the results obtained, final approval of the published version of the research.

Acknowledgments

The authors are grateful to anonymous reviewers for their work.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Sources of funding

The work was carried out with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, within

Mariya A. Yanishevskaya

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky Str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: yanishevskaya@urcrm.ru

the framework of the Federal target program “Ensuring nuclear and radiation safety for 2016-2020 and for the period up to 2030”.

References

1. Yanishevskaya MA, Blinova EA, Korechenkova AV, Akleyev AV. Association of the rs1052133 polymorphism of the *OGG1* gene with the risk of malignant neoplasms development in people in people exposed to radiation exposure. *Byulleten Radiatsiya i risk = Bulletin Radiation and Risk*. 2023;32(3): 97–108. (In Russian).
2. Chakraborty R, Sankaranarayanan K. Cancer predisposition, radiosensitivity and the risk of radiation-induced cancers. II. A Mendelian single-locus model of cancer predisposition and radiosensitivity for predicting cancer risks in populations. *Radiation research*. 1995;143(3): 293–301.
3. Yin J, Vogel U, Ma Y, Qi R, Sun Z, Wang H. The DNA repair gene *XRCC1* and genetic susceptibility of lung cancer in a northeastern Chinese population. *Lung Cancer*. 2007;56(2): 153–160.
4. Yen CY, Liu SY, Chen CH, Tseng HF, Chuang LY, Yang CH, et al. Combinational polymorphisms of four DNA repair genes *XRCC1*, *XRCC2*, *XRCC3*, and *XRCC4* and their association with oral cancer in Taiwan. *Journal of Oral Pathology and Medicine*. 2008;37(5): 271–277. DOI: 10.1111/j.1600-0714.2007.00608.x.
5. Xue X, Yin Z, Lu Y, Zhang H, Yan Y, Zhao Y, et al. The joint effect of *hOGG1*, *APE1*, and *ADPRT* polymorphisms and cooking oil fumes on the risk of lung adenocarcinoma in Chinese non-smoking females. *PLoS One*. 2013;8(8): e71157. DOI: 10.1371/journal.pone.0071157.
6. Degteva MO, Shagina NB, Shishkina EA, Tolstykh EI. Current status of the radioactive contamination of the Tcha river in 1949-1956. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioekology*. 2016;56(5): 523–534. (In Russian).
7. Silkin SS, Krestinina LY, Startsev VN, Akleev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393–402. (In Russian).
8. Kabzinski J, Walczak A, Dziki A, Mik M, Majsterek I. Impact of the Ser326Cys polymorphism of the *OGG1* gene on the level of oxidative DNA damage in patients with colorectal cancer. *Polski Przegląd Chirurgiczny*. 2018;90(2): 13–15. DOI: 10.5604/01.3001.0011.7486.
9. Hatt L, Loft S, Risom L, Moller P, Sorensen M, Raaschou-Nielsen O. *OGG1* expression and *OGG1* Ser326Cys polymorphism and risk of lung cancer in a prospective study. *Mutation Research*. 2008;639(1-2): 45–54. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2007.11.002.
10. Alanazi M, Pathan AAK, Shaik JP, Alhadheq A, Khan Z, Khan W, et al. The *hOGG1* Ser326Cys gene polymorphism and breast cancer risk in Saudi population. *Pathology and Oncology Research*. 2017;23(3): 525–535. DOI: 10.1007/s12253-016-0146-6.
11. Weiss JM, Goode EL, Ladiges WC, Ulrich CM. Polymorphic variation in *hOGG1* and risk of cancer: a review of the functional and epidemiologic literature. *Molecular carcinogenesis*. 2005;42(3): 127–141. DOI: 10.1002/mc.20067.
12. Kohno T, Shinmura K, Tosaka M, Tani M, Kim SR, Sugimura H, et al. Genetic polymorphisms and alternative splicing of the *hOGG1* gene, that is involved in the repair of 8-hydroxyguanine in damaged DNA. *Oncogene*. 1998;16: 3219–3225. DOI: 10.1038/sj.onc.1201872.
13. Lunn RM, Langlois RG, Hsieh LL, Thompson CL, Bell DA. *XRCC1* polymorphisms: Effects on aflatoxin B1-DNA adducts and glycoprotein A variant frequency. *Cancer Research*. 1999;59: 2557–2561.
14. Park YJ, Choi EY, Choi JY, Park JG, You HJ, Chung MH. Genetic changes of *hOGG1* and the activity of *oh8Gua* glycosylase in colon cancer. *European journal of cancer*. 2001;37(3): 340–346. DOI: 10.1016/s0959-8049(00)00388-9.
15. Endutkin AV, Zharkov DO. GO System, a DNA repair pathway to cope with oxidative damage. *Molekulyarnaya biologiya = Molecular Biology*. 2021;55(2): 223–242. DOI: 10.31857/S0026898421020063. (In Russian).
16. Yuan SS, Hou MF, Hsieh YC, Huang CY, Lee YC, Chen YJ, et al. Role of *MRE11* in cell proliferation, tumor invasion, and DNA repair in breast cancer. *Journal of the National Cancer Institute*. 2012;104(19): 1485–1502. DOI: 10.1093/jnci/djs355.
17. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG. The PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Open Medicine Journal*. 2009;3(2): 123–130. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.005.
18. Higgins JPT, Altman DG, Gotzsche PC, Jüni P, Moher D, Oxman AD, et al. Cochrane Bias Methods Group. The Cochrane Collaboration's tool for assessing risk of bias in randomised trials. *British Medical Journal*. 2011;18(343): 7829–d5928. DOI: 10.1136/bmj.d5928.
19. Egger M, Davey Smith G, Schneider M, Minder C. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. *British Medical Journal*. 1997;315: 629–634. DOI: 10.1136/bmj.315.7109.629.
20. Stuck AE, Rubenstein LZ, Wieland D. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. Asymmetry detected in funnel plot was probably due to true heterogeneity. *British Medical Journal*. 1998;316: 469. DOI: 10.1136/bmj.316.7129.469.
21. Klaunig JE, Kamendulis LM, Hoocevar BA. Oxidative stress and oxidative damage in carcinogenesis. *Toxicologic Pathology*. 2010;38(1): 96–109. DOI: 10.1177/0192623309356453.
22. Cooke MS, Evans MD, Dizdaroglu M, Lunec J. Oxidative DNA damage: mechanisms, mutation, and disease. *FASEB journal: official publication of the Federation of American Societies for Experimental Biology*. 2003;17(10): 1195–1214. DOI: 10.1096/fj.02-0752rev.
23. Akbari MR, Malekzadeh R, Shakeri R, Nasrollahzadeh D, Fomani M, Sun Y, et al. Candidate gene association study of esophageal squamous cell carcinoma in a high-risk region in Iran. *Cancer Research*. 2009;69(20): 7994–8000. DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-09-1149.
24. Arizono K, Osada Y, Kuroda Y. DNA repair gene *hOGG1* codon 326 and *XRCC1* codon 399 polymorphisms and bladder cancer risk in a Japanese population. *Japanese Journal of Clinical Oncology*. 2008;38(3): 186–191. DOI: 10.1093/jjco/hym176.
25. Ahmed T, Nawaz S, Noreen R, Bangash KS, Rauf A, Younis M, et al. A 3' untranslated region polymorphism rs2304277 in the DNA repair pathway gene *OGG1* is a novel risk modulator for urothelial bladder carcinoma. *Annals of Human Genetics*. 2018;82(2): 74–87. DOI: 10.1111/ahg.12225.
26. Canbay E, Cakmakoglu B, Zeybek U, Sozen S, Cicina C, Gulluoglu M, et al. Association of *APE1* and *hOGG1* polymorphisms with colorectal cancer risk in a Turkish population. *Current Medical Research and Opinion*. 2011;27(7): 1295–1302. DOI: 10.1185/03007995.2011.573544.
27. Chang JS, Wrensch MR, Hansen HM, Sison JD, Aldrich MC, Quesenberry CP Jr, et al. Base excision repair genes and risk of lung cancer among San Francisco Bay Area Latinos and African-Americans. *Carcinogenesis*. 2009;30(1): 78–87. DOI: 10.1093/carcin/bgn261.
28. Chang WS, Shen TC, Liao M, Tsai YT, Hsia TC, Wu HC, et al. Significant contribution of DNA repair human 8-oxoguanine DNA N-glycosylase 1 genotypes to renal cell carcinoma. *Oncotargets and Therapy*. 2020;13: 1583–1591. DOI: 10.2147/OTT.S231733.

29. Couto PG, Bastos-Rodrigues L, Carneiro JG, Guieiro F, Bicalho MA, Leidenz FB, et al. DNA base-excision repair genes *OGG1* and *NTH1* in Brazilian lung cancer patients. *Molecular Diagnosis and Therapy*. 2015;19(6): 389–395. DOI: 10.1007/s40291-015-0164-1.
30. Floris M, Sanna D, Castiglia P, Putzu C, Sanna V, Pazzola A, et al. *MTHFR*, *XRCC1* and *OGG1* genetic polymorphisms in breast cancer: a case-control study in a population from North Sardinia. *BMC Cancer*. 2020;20(1): 234. DOI: 10.1186/s12885-020-06749-w.
31. Hosseini SM, Mohammadiasl J, Talaiezhadeh A, Alidadi R, Bijanzadeh M. Influence of two DNA repair pathway polymorphisms in colorectal cancer risk in Southwest Iran. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2020;21(7): 1919–1924. DOI: 10.31557/APJCP.2020.21.7.1919.
32. Huang WY, Gao YT, Rashid A, Sakoda LC, Deng J, Shen MC, et al. Selected base excision repair gene polymorphisms and susceptibility to biliary tract cancer and biliary stones: a population-based case-control study in China. *Carcinogenesis*. 2008;29(1): 100–105. DOI: 10.1093/carcin/bgm247.
33. Upadhyay R, Malik MA, Zargar SA, Mittal B. *OGG1* Ser326Cys polymorphism and susceptibility to esophageal cancer in low and high at-risk populations of northern India. *Journal of Gastrointestinal Cancer*. 2010;41(2): 110–115. DOI: 10.1007/s12029-009-9124-5.
34. Jin D, Zhang M, Hua H. Impact of polymorphisms in DNA repair genes *XPD*, *hOGG1* and *XRCC4* on colorectal cancer risk in a Chinese Han Population. *Bioscience Reports*. 2019;39(1): BSR20181074. DOI: 10.1042/BSR20181074.
35. Krupa R, Czarny P, Wigner P, Wozny J, Jablowski M, Kordek R, et al. The relationship between single-nucleotide polymorphisms, the expression of DNA damage response genes, and hepatocellular carcinoma in a Polish population. *DNA and Cell Biology*. 2017;36(8): 693–708. DOI: 10.1089/dna.2017.3664.
36. Kury S, Buecher B, Robiou-du-Pont S, Scoul C, Colman H, Le Neel T, et al. Low-penetrance alleles predisposing to sporadic colorectal cancers: a French case-controlled genetic association study. *BMC Cancer*. 2008;8: 326. DOI: 10.1186/1471-2407-8-326.
37. McWilliams RR, Bamlet WR, Cunningham JM, Goode EL, de Andrade M, Boardman A, et al. Polymorphisms in DNA repair genes, smoking, and pancreatic adenocarcinoma risk. *Cancer Research*. 2008;68(12): 4928–4935. DOI: 10.1158/0008-5472.CAN-07-5539.
38. Mimouni A, Rouleau E, Saulnier P, Marouani A, Abdelali ML, Filali T, et al. Association of *TERT*, *OGG1*, and *CHRNA5* polymorphisms and the predisposition to lung cancer in Eastern Algeria. *Pulmonary Medicine*. 2020;2020: 7649038. DOI: 10.1155/2020/7649038.
39. Minina VI, Bakanova ML, Soboleva OA, Ryzhkova AV, Titov RA, Savchenko YA, et al. Polymorphisms in DNA repair genes in lung cancer patients living in a coal-mining region. *European Journal of Cancer Prevention*. 2019;28(6): 522–528. DOI: 10.1097/CEJ.0000000000000504.
40. Nakao M, Hosono S, Ito H, Watanabe M, Mizuno N, Sato S, et al. Selected polymorphisms of base excision repair genes and pancreatic cancer risk in Japanese. *Journal of Epidemiology*. 2012;22(6): 477–483. DOI: 10.2188/jea.JE20120010.
41. Okasaka T, Matsuo K, Suzuki T, Ito H, Hosono S, Kawase T, et al. *hOGG1* Ser326Cys polymorphism and risk of lung cancer by histological type. *Journal of Human Genetics*. 2009;54(12): 739–745. DOI: 10.1038/jhg.2009.108.
42. Qian B, Zhang H, Zhang L, Zhou X, Yu H, Chen K. Association of genetic polymorphisms in DNA repair pathway genes with non-small cell lung cancer risk. *Lung Cancer*. 2011;73(2): 138–146. DOI: 10.1016/j.lungcan.2010.11.018.
43. Rajagopal T, Seshachalam A, Rathnam KK, Jothi A, Viswanathan S, Talluri S, et al. DNA repair genes *hOGG1*, *XRCC1* and *ERCC2* polymorphisms and their molecular mapping in breast cancer patients from India. *Molecular Biology Reports*. 2020;47(7): 5081–5090. DOI: 10.1007/s11033-020-05577-2.
44. Ravegnini G, Nannini M, Simeon V, Musti M, Sammarini G, Saponara M, et al. Polymorphisms in DNA repair genes in gastrointestinal stromal tumours: susceptibility and correlation with tumour characteristics and clinical outcome. *Tumor Biology*. 2016;37(10): 13413–13423. DOI: 10.1007/s13277-016-5276-7.
45. Romanowicz H, Pyziak L, Jablonski F, Brys M, Forma E, Smolarz B. Analysis of DNA Repair Genes Polymorphisms in Breast Cancer. *Pathology and oncology research*. 2017;23(1): 117–123. DOI: 10.1007/s12253-016-0110-5.
46. Sliwinski T, Krupa R, Wisniewska-Jarosinska M, Pawlowska E, Lech J, Chojnacki J, et al. Common polymorphisms in the *XPD* and *hOGG1* genes are not associated with the risk of colorectal cancer in a Polish population. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. 2009;218(3): 185–191.
47. Srivastava K, Srivastava A, Mittal B. Polymorphisms in *ERCC2*, *MSH2*, and *OGG1* DNA repair genes and gallbladder cancer risk in a population of Northern India. *Cancer*. 2010;116(13): 3160–3169. DOI: 10.1002/cncr.25063.
48. Sorensen M, Raaschou-Nielsen O, Hansen RD, Tjonneland A, Overvad K, Vogel U. Interactions between the *OGG1* Ser326Cys polymorphism and intake of fruit and vegetables in relation to lung cancer. *Free Radical Research*. 2006;40(8): 885–891. DOI: 10.1080/10715760600733129.
49. Wang T, Wang H, Yang S, Guo H, Zhang B, Guo H, et al. Association of *APEX1* and *OGG1* gene polymorphisms with breast cancer risk among Han women in the Gansu Province of China. *BMC Medical Genetics*. 2018;19(1): 67. DOI: 10.1186/s12881-018-0578-9.
50. Zhang Q, Zheng X, Li X, Sun D, Xue P, Zhang G, et al. The polymorphisms of miRNA-binding site in *MLH3* and *ERCC1* were linked to the risk of colorectal cancer in a case-control study. *Cancer Medicine*. 2018;7(4): 1264–1274. DOI: 10.1002/cam4.1319.
51. Zhang H, Wang L.A, Li Z, Peng Y, Cun YP, Dai N, et al. *APE1* polymorphisms are associated with colorectal cancer susceptibility in Chinese Hans. *World Journal of Gastroenterology*. 2014;20(26): 8700–8708. DOI: 10.3748/wjg.v20.i26.8700.
52. Zhao H, Qin C, Yan F, Wu B, Cao Q, Wang M, et al. *hOGG1* Ser326Cys polymorphism and renal cell carcinoma risk in a Chinese population. *DNA and Cell Biology*. 2011;30(5): 317–321. DOI: 10.1089/dna.2010.1135.
53. Zhu Y, Guo L, Wang S, Yu Q, Lu J. Association of smoking and *XPG*, *CYP1A1*, *OGG1*, *ERCC5*, *ERCC1*, *MMP2*, and *MMP9* gene polymorphisms with the early detection and occurrence of laryngeal squamous carcinoma. *International Journal of Cancer*. 2018;9(6): 968–977. DOI: 10.7150/ijca.22841.
54. Jiao X, Huang J, Wu S, Lv M, Hu Y, Jianfu Su, et al. *hOGG1* Ser326Cys polymorphism and susceptibility to gallbladder cancer in a Chinese population. *International Journal of Cancer*. 2007;121(3): 501–505. DOI: 10.1002/ijc.22748.

Received: February 01, 2024

For correspondence: Mariya A. Yanishevskaya – Junior Researcher, Laboratory of Molecular and Cellular Radiobiology, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: yanishevskaya@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0002-2649-5123

Evgenia A. Blinova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Molecular Cellular Radiobiology, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency; Assoc. Prof. of the Department of Radiation Biology of the Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0002-2567-7945

Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Senior Researcher of the Biophysics laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Assoc. Prof. of the Department of Radiation Biology of the Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0003-4464-0889

Alexander V. Akleyev – Doctor of Medical Sciences, Professor, Honoured Science Worker of the Russian Federation, Director of the Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency; Head of the Department of Radiation Biology of the Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0003-2583-5808

For citation: Yanishevskaya M.A., Blinova E.A., Shishkina E.A., Akleyev A.V. Polymorphism of *hOGG1* gene and susceptibility to malignant neoplasms in people affected by long-term low dose rate exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P.55–67. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-55-67

Итоги функционирования Федерального банка данных доз облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения в 2022–2024 гг.

Т.А. Кормановская

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 выполнен анализ данных Федерального Банка данных доз облучения граждан Российской Федерации за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона, функционирующего в рамках Единой государственной системы контроля и учета доз облучения, за период 2022–2024 гг. Проанализированы результаты 598 604 измерений мощности амбиентного эквивалентной дозы гамма-излучения в жилых и общественных зданиях и на открытой местности в регионах страны, 155 249 измерений эквивалентной равновесной объемной активности изотопов радона в воздухе помещений, 58 804 исследований удельной активности природных радионуклидов в питьевой воде. На основе перечисленных данных выполнена гигиеническая оценка состояния радиационной безопасности населения Российской Федерации при воздействии природных источников ионизирующего излучения в период 2021–2023 гг. Анализ материалов показал, что в ряде регионов России (Республика Алтай, Республика Саха (Якутия), Республика Тыва, Забайкальский край, Иркутская область и др.) в исследуемый период были зафиксированы превышения гигиенических нормативов по содержанию радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий. Анализ данных об удельной активности природных радионуклидов в питьевой воде выявил значительные (более чем на порядок) превышения уровня вмешательства по удельной активности радона в воде отдельных источников питьевого водоснабжения Челябинской области и Забайкальского края. Выполненные оценки доз облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона показали, что в ряде субъектов Российской Федерации (Республика Алтай, Республика Башкортостан, Республика Тыва, Иркутская область, Ставропольский край и др.) средняя годовая эффективная доза за счет природных источников ионизирующего излучения характеризует повышенное природное облучение населения (более 5 мЗв/год), облучение жителей Забайкальского края в 2021 и 2023 гг. квалифицируется как высокое (более 10 мЗв/год).

Ключевые слова: природные источники ионизирующего излучения, дозы облучения населения, радон в воздухе помещений, Федеральный банк данных доз облучения населения за счет природного и техногенно измененного радиационного фона.

Введение

Функционирующий в Российской Федерации в рамках Единой государственной системы контроля и учета доз облучения граждан (ЕСКИД)¹ более 20 лет [1] Федеральный Банк данных доз облучения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ)² является основным инструментом долговременного контроля и учета данных об уровнях облучения населения страны

за счет природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ). ФБДОПИ аккумулирует в себе данные многолетних исследований факторов природного облучения населения и результаты мониторинга радиационной обстановки в части ПИИИ в коммунальных условиях и производственной среде в различных регионах России.

В соответствии с Приказом Росстата от 16.10.2013 г. № 411³ сбор данных в субъектах Российской Федерации ежегодно выполняется специалистами ФБУЗ «Центр гигие-

¹ Постановление Правительства РФ от 16.06.1997 № 718 «О порядке создания единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан». [Decree of the Government of the Russian Federation of 16.06.1997 No. 718 "On the procedure for creating a Unified State System for Monitoring and Accounting for Individual Doses of Radiation to the Citizens". (In Russ.)]

² Приказ Минздрава России от 21.06.2003 № 268 «Об утверждении положений о федеральных банках данных». [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation of 21.06.2003 No. 268 "On Approval of Regulations on Federal Databanks". (In Russ.)]

³ Приказ Росстата от 16.10.2013 № 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 the Federal State Statistics Service No. 411 of 16.10.2013 "On approval of statistical tools for the organization by the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing of federal statistical monitoring of the sanitary condition of territories, occupational diseases (poisonings), radiation doses"). (In Russ.)]

Кормановская Татьяна Анатольевна

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: f4dos@mail.ru

ны и эпидемиологии в субъектах Российской Федерации», передача информации из Региональных банков данных доз облучения населения за счет природного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ)⁴ в электронном виде в ФБДОПИ производится к сроку 15 мая года, следующего за отчетным. Таким образом, в период 2022–2024 гг. (срок действия государственного контракта от 15 июля 2022 г. № 81.001.22.2 «Подготовка информационных материалов о радиационной обстановке на территории Российской Федерации на основе анализа результатов радиационного мониторинга и доз облучения персонала и населения» (шифр: «Состояние РБ–22»)) в ФБДОПИ поступили данные об уровнях параметров природного облучения и дозах облучения населения России в 2021–2023 гг.

Цель исследования – дать гигиеническую оценку состояния радиационной безопасности населения Российской Федерации при воздействии ПИИИ в период 2021–2023 гг. на основе данных об уровнях природного облучения населения, накопленных в ФБДОПИ в период 2022–2024 гг.

Задачи исследования

1. Выполнить анализ данных об уровнях облучения населения за счет ПИИИ, накопленных в ФБДОПИ в период 2022–2024 гг. по итогам исследований 2021–2023 гг.;
2. Выделить регионы и отдельные группы населения с повышенными и высокими уровнями природного облучения населения в исследуемый период;
3. Проанализировать причины повышенных и высоких доз облучения за счет ПИИИ населения ряда регионов России;
4. Дать гигиеническую оценку состояния радиационной безопасности населения субъектов Российской Федерации (и отдельных групп населения) при воздействии ПИИИ в данный период.

Материалы и методы

Основой для решения поставленных задач и достижения заявленной цели являются материалы ФБДОПИ, содержащие сведения об уровнях природного облучения населения субъектов Российской Федерации в период 2021–2023 гг. Всего за исследуемый период в ФБДОПИ из РБДОПИ субъектов Российской Федерации поступили

данные о результатах 812 657 измерений параметров радиационной обстановки в части природного облучения, в том числе:

- 598 604 значения мощности AMBIENTного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения по итогам дозиметрических измерений в жилых и общественных зданиях различных типов (деревянных (Д), каменных одноэтажных (1К), каменных многоэтажных (МК)) и на открытой местности (ОМ) на территории населенных пунктов страны;
- 155 249 значения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона по итогам измерений уровней содержания радона в воздухе помещений в жилых и общественных зданиях;
- 58 804 значения удельной активности (УА) природных радионуклидов (ПРН) в питьевой воде по итогам радиохимических исследований содержания ПРН в воде источников питьевого водоснабжения.

Распределение количества выполненных исследований факторов природного облучения населения на территории Российской Федерации в каждом отчетном году представлено в таблицах 1–3. В таблицах 1 и 2 представлены сведения о числе исследований в жилых и общественных зданиях каждого типа (Д, 1К, МК), таблица 1 также содержит данные о выполненных измерениях МАЭД гамма-излучения на ОМ в населенных пунктах страны.

В 2021 г. специалистами лабораторий радиационного контроля страны было выполнено 237 518 измерений МАЭД гамма-излучения в зданиях и на ОМ, в 2022 г. – 140 329 измерений, в 2023 г. – 220 757. В целом за 3 года было проведено 15 596 исследований показателей внешнего облучения в Д-зданиях, 25 908 – в 1К-зданиях и 159 827 – в МК-зданиях; 397 273 измерения МАЭД гамма излучения было выполнено на ОМ на территории населенных пунктов страны.

В 2021 г. в стране было выполнено 51 707 измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений зданий жилого и общественного назначения, в 2022 г. – 54 255 измерений, в 2023 г. – 49 287. Всего за период 2021–2023 гг. было проведено 10 897 исследований уровней содержания радона в воздухе в Д-зданиях, 13 298 – в 1К-зданиях, 131 054 – в МК-зданиях.

Таблица 1

Число измерений МАЭД гамма-излучения в зданиях разных типов и на открытой местности в 2021–2023 гг.

[Table 1]

Number of ambient gamma dose rate measurements taken indoors in various types of buildings and outdoors in 2021–2023]

Год [Year]	Число измерений МАЭД гамма-излучения [Number of ambient gamma dose rate measurements]			
	Жилые и общественные здания [Dwellings and public buildings]			ОМ [Outdoors]
	Д* [Wooden buildings*]	1К* [One-storey buildings*]	МК* [Multi-storey buildings*]	
2021	6 239	7 976	82 832	140 471
2022	5 247	10 345	109 145	124 737
2023	4 110	7 587	76 995	132 065

* Д – деревянные здания любой этажности; 1К – одноэтажные каменные здания; МК – многоэтажные каменные здания.

[* Wooden houses of any number of storeys are classified as "Wooden buildings" (W). "One-storey buildings" (1S) and "Multi-storey buildings" (MS) types include corresponding buildings constructed from any material (all types of brick, concrete, blocks, etc.) except wood.]

⁴ Приказ Минздрава России от 21.06.2003 № 268 «Об утверждении положений о федеральных банках данных». [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation of 21.06.2003 No. 268 "On Approval of Regulations on Federal Data Banks". (In Russ.)]

Таблица 2

Число измерений ЭРОА изотопов радона в зданиях разных типов в 2021–2023 гг.

[Table 2]

Number of indoor radon isotopes EEC measurements taken in various types of buildings in 2021–2023

Год [Year]	Число измерений ЭРОА изотопов радона в зданиях [Number of indoor radon isotopes EEC measurements]			
	Всего [Total]	Д [W]	1К [1S]	МК [MS]
2021	51 707	3 836	4 541	43 330
2022	54 255	3 789	4 175	46 291
2023	49 287	3 272	4 582	41 433

Таблица 3

Число исследований УА ПРН в воде источников питьевого водоснабжения в 2021–2023 гг.

[Table 3]

Number of measurements of activity concentrations of natural radionuclides in drinking water taken in 2021–2023

Год [Year]	Число исследований УА ПРН в питьевой воде [Number of measurements of activity concentrations of natural radionuclides in drinking water]					
	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³⁸ U + ²³⁴ U	²²² Rn
2021	846	744	740	855	706	13 131
2022	653	572	558	638	453	15 820
2023	818	683	668	746	562	19 611

В 2022–2024 гг. от субъектов Российской Федерации в ФБДОПИ поступили сведения об уровнях облучения за счет ПИИИ в производственных условиях в период 2021–2023 гг. работников неядерных отраслей промышленности, чья профессиональная деятельность подразумевает возможность дополнительного природного облучения людей (за счет повышенного содержания ПРН в минеральном сырье, материалах, производственных отходах, работе в подземных условиях и пр.). Получены данные о дозах облучения в 2021 г. 692 работников 17 предприятий в 10 регионах страны, в 2022 г. – 881 работников 23 предприятий в 11 регионах, в 2023 г. – 1046 работников 217 предприятий в 12 субъектах Российской Федерации.

Исследования, результаты которых поступили в ФБДОПИ, выполнялись персоналом аккредитованных испытательных лабораторий по аттестованным методикам (методам) измерений, средствами измерений, внесенными в Государственный реестр средств измерений (ГРСИ РФ) и поверенными в установленном порядке. Оценки доз облучения населения за счет внешнего облучения, внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона, внутреннего облучения за счет потребления питьевой воды, суммарных доз облучения населения за счет ПИИИ в коммунальной сфере и производственных условиях выполнялись в соответствии с рекомендациями МР 2.6.1.0088–14⁵.

Таким образом, объем и релевантность данных, поступивших в ФБДОПИ в 2022–2024 гг., в полной мере позволяют им стать основой для проведения гигиенической

оценки состояния радиационной безопасности населения Российской Федерации при воздействии ПИИИ в период 2021–2023 гг.

Результаты и обсуждение

В соответствии с рекомендациями МР 2.6.1.0088–14, оценка годовых эффективных доз облучения населения за счет ПИИИ проводится по результатам радиационного мониторинга следующих факторов природного облучения:

- МАЭД гамма-излучения в жилых и общественных зданиях и на ОМ;
- среднегодовое ЭРОА изотопов в воздухе помещений;
- содержание ПРН в питьевой воде и продуктах питания.

Уровни поступления в организм человека ⁴⁰K, параметры космического излучения на поверхности земли для конкретной местности, содержание радона в атмосферном воздухе, как и среднегодовое содержание пыли (аэрозолей) в приземном слое атмосферного воздуха и удельная активность долгоживущих ПРН в пыли, не контролируются (для этих факторов в Российской Федерации не установлены гигиенические нормативы), но учитываются при оценке суммарных эффективных доз облучения с использованием среднемировых данных.

В таблице 4 представлены являющиеся основой оценки доз внешнего облучения населения субъектов Российской Федерации данные 2021–2023 гг. о диапазоне средних по регионам значений МАЭД гамма-излучения на ОМ и в зданиях различных типов (Д, 1К, МК). Необходимо отметить,

⁵ Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088–14. Утверждены врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 18.03.2014. [Federal statistical form No. 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background. Guidelines MR 2.6.1.0088–14. Approved by the acting Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.03.2014. (In Russ.)]

что поскольку задачей сбора информации в ФБДОПИ не является оценка соответствия показателей радиационной безопасности гигиеническим нормативам, все изме-

ренные значения, характеризующие параметры природного облучения, вносятся в программу без указаний неопределенности измерений.

Таблица 4

Диапазон средних по регионам значений МАЭД гамма-излучения в зданиях разных типов в 2021–2023 гг.

[Table 4

Ranges of regional averages of ambient gamma dose rates in various types of buildings in 2021–2023]

Год [Year]	Диапазон средних по регионам МАЭД гамма-излучения, мкЗв/ч [Ranges of regional averages of ambient gamma dose rates, $\mu\text{Sv/h}$]			
	Д [W]	1К [1S]	МК [MS]	ОМ [Outdoors]
2021	0,05–0,16	0,07–0,20	0,04–0,20	0,05–0,18
2022	0,05–0,16	0,05–0,19	0,02–0,21	0,05–0,17
2023	0,05–0,21	0,07–0,20	0,05–0,19	0,03–0,15

Наименьшие средние по регионам значения МАД гамма-излучения в деревянных зданиях в период 2021–2023 гг. были получены в Ленинградской области, Республике Марий Эл, Республике Хакасия, Камчатском крае и Ненецком АО; к регионам с наибольшими значениями данного показателя относятся Пензенская область, Республика Бурятия, Еврейская АО и Забайкальский край. Наименьшие показатели МАЭД гамма-излучения для каменных зданий жилого и общественного назначения (как малоэтажных, так и многоэтажных) получены в Республике Дагестан, Чеченской Республике, Кировской области, Республике Хакасия и Ненецком АО, наибольшие – в Кабардино-Балкарской Республике и Еврейской АО. Необходимо отметить, что даже в регионах с максимальными значениями МАЭД гамма-излучения в зданиях превышений установленного санитарными правилами гигиенического норматива по данному показателю зафиксировано не было.

Наименьшие средние по регионам значения МАЭД гамма-излучения на ОМ в период 2021–2023 гг. были получены в Камчатском крае, Астраханской области, наибольшие показатели характерны для Забайкальского края и Брянской области. В отдельных районах и населенных пунктах Брянской области (наиболее пострадавшего региона России от последствий аварии на Чернобыльской АЭС) показатели внешнего облучения на территориях значительно превышают среднерегиональный показатель: средние значения МАЭД гамма-излучения

на ОМ для Гордеевского, Клинцовского, Злынковского, Новозыбковского и Красногорского районов области составляют 0,25–0,30 мкЗв/ч (почти в 2 раза больше, чем средние по региону значения). На территории отдельных населенных пунктов (н.п.) этих районов МАЭД гамма-излучения, обусловленная остаточным радиоактивным загрязнением, еще выше – в н.п. Серовка Злынковского района она достигает 0,56 мкЗв/ч, в н.п. Малый Кривец Новозыбковского района – 0,55 мкЗв/ч, в н.п. Заборье Красногорского района – 0,82 мкЗв/ч.

В целом, внешнее облучение на территории Российской Федерации, обусловленное природной составляющей, остается достаточно стабильным; исключение, как уже говорилось, составляют отдельные районы Брянской области – однако там повышенные значения МАЭД гамма-излучения являются следствием радиационной аварии и квалифицируются как техногенно измененный радиационный фон.

Значительно большей вариабельностью обладает другой компонент природного облучения населения – содержание радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) и их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР) в воздухе помещений зданий.

В таблице 5 приведены данные о диапазоне средних по регионам значений ЭРОА изотопов радона в жилых и общественных зданиях разных типов (Д, 1К, МК) в 2021–2023 гг.

Таблица 5

Диапазон средних по регионам значений ЭРОА изотопов радона в зданиях разных типов в 2021–2023 гг.

[Table 5

Ranges of regional averages of indoor radon isotopes EEC in various types of buildings in 2021–2023]

Год [Year]	Диапазон средних по регионам значений ЭРОА изотопов радона, Бк/м³ [Ranges of regional averages of indoor radon isotopes EEC, Bq/m³]		
	Д [W]	1К [1S]	МК [MS]
2021	4,3–323,2	4,5–173,3	4,5–93,1
2022	3,3–149,6	6,9–198,7	7,9–111,2
2023	4,6–249,0	7,6–175,5	4,7–132,8

К субъектам Российской Федерации со стабильно низкими показателями содержания радона в жилых и общественных зданиях всех типов в означенный период относятся Хабаровский край, Астраханская, Липецкая, Орловская и Тверская области, Чукотский и Ямало-Ненецкий автономные округа; к регионам с высокими уровнями воздействия данного фактора – Республики Алтай, Саха (Якутия) и Тыва, Забайкальский край, Иркутская область. Поскольку основным путем поступления радона в помещения является его эксхалация из грунта под зданием (что, как правило, определяется геологическими характеристиками территории), низкое или высокое содержание радона в воздухе помещений в конкретном населенном пункте значительно меньше зависит от строительных характеристик здания, чем показатели внешнего облучения. Таким образом, в регионах с высоким уровнем выделения радона из грунта характерны высокие значения ЭРОА изотопов радона в жилых и общественных зданиях любых типов при отсутствии проведения в них радонозащитных мероприятий.

Как видно из представленных в таблице 5 данных, даже усредненные по каждому региону показатели содержания радона и ДПР в воздухе помещений зданий всех типов отличаются друг от друга в десятки раз. В отдельных же населенных пунктах ряда субъектов Российской Федерации стабильно фиксируются высокие значения ЭРОА изотопов радона в воздухе, значительно (иногда – более чем на порядок) превышающие гигиенические нормативы содержания радона для вновь построенных и эксплуатируемых жилых и общественных зданий, установленные санитарными правилами (НРБ-99/2009⁶, СанПиН 2.6.1.2800-10⁷).

В качестве примеров, в таблице 6 приведены максимальные из измеренных значений ЭРОА изотопов радона в отдельных населенных пунктах страны, полученные в период 2021–2023 гг., в таблице 7 – максимальные измеренные ЭРОА изотопов радона в регионах с высокими уровнями содержания радона в каждый отчетный год в зданиях разного типа.

Таблица 6

Максимальные ЭРОА изотопов радона в зданиях отдельных населенных пунктов в 2021–2023 гг.

[Table 6]

Maximum values of indoor radon isotopes EEC in certain settlements in 2021–2023]

Субъект РФ, район, населенный пункт [Region, district, settlement]	Макс. ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Max indoor radon isotopes EEC, Bq/m ³]
Республика Алтай [The Altai Republic]	
Турочакский район, с. Озеро-Куреево [Turochakskiy district, Ozero-Kureevo]	823
Турочакский район, с. Тондошка [Turochakskiy district, Tondoshka]	733
Турочакский район, с. Тулой [Turochakskiy district, Tuloy]	1 007
Турочакский район, с. Турочак [Turochakskiy district, Turochak]	710
Чойский район, с. Ынырга [Choyskiy district, Ynyrga]	418
Онгудайский район, с. Иня [Ongudayskiy district, Inya]	1 366
Онгудайский район, с. Каярлык [Ongudayskiy district, Kayarlyk]	569
Усть-Канский район, с. Усть-Кан [Ust'-Kanskiy district, Ust'-Kan]	2 090
Республика Тыва [The Republic of Tyva]	
Чаа-Хольский район, д. Чаа-Холь [Chaa-Khol'skiy district, Chaa-Khol']	425
Овюрский район, д. Солчур [Ovyurskiy district, Solchur]	387
Монгун-Тайгинский район, д. Мугур-Аксы [Mongun-Tayginskiy district, Mugur-Aksy]	429
Сут-Хольский район, д. Суг-Аксы [Sut-Khol'skiy district, Sug-Aksy]	289
Республика Саха (Якутия) [The Republic of Sakha (Yakutia)]	
Алданский район, г. Алдан [Aldanskiy district, Aldan]	797
Алданский район, с. Нижний Куранах [Aldanskiy district, Nizhniy Kuranakh]	1 511

⁶ 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 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, 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 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

⁷ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 № 171 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, регистрационный № 19587). [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 27.01.2011, registration No. 19587). (In Russ.)]

Субъект РФ, район, населенный пункт [Region, district, settlement]	Макс. ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Max indoor radon isotopes EEC, Bq/m ³]
Ивановская область [Ivanovo Oblast]	
г. Шуя [Shuya]	464
Приволжский район, г. Приволжск [Privolzhskiy district, Privolzhsk]	609
Гаврилово-Посадский район, г. Гаврилов-Посад [Gavrilovo-Posadskiy district, Gavrilov-Posad]	795
Гаврилово-Посадский район, с. Шекшово [Gavrilovo-Posadskiy district, Shekshovo]	537
Оренбургская область [Orenburg Oblast]	
Саракташский район, г. Саракташ [Saraktashskiy district, Saraktash]	840
Беляевский район, с. Донское [Belyaevskiy district, Donskoe]	312
Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	
Балейский район, г. Балей [Baleyskiy district, Baley]	1 520

Таблица 7

**Максимальные ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений зданий разных типов
в ряде субъектов Российской Федерации в 2021–2023 гг.**

[Table 7]

Maximum values of indoor radon isotopes EEC in various types of buildings in certain regions of Russia in 2021–2023

Субъект Российской Федерации [Region]	Максимальная ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Maximum indoor radon isotopes EEC, Bq/m ³]								
	2021			2022			2023		
	Д [W]	1К [1S]	МК [MS]	Д [W]	1К [1S]	МК [MS]	Д [W]	1К [1S]	МК [MS]
Республика Алтай [The Altai Republic]	518	733	823	1 007	1 206	2 138	1 437	1 366	2 137
Республика Саха (Якутия) [The Republic of Sakha (Yakutia)]	190	515	427	128	198	1 511	199	467	530
Республика Тыва [The Republic of Tyva]	388	429	501	343	483	425	351	149	546
Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	1 520	—*	1 425	585	—	644	945	—	825

* Измерений ЭРОА изотопов радона в 2021–2023 гг. в данном типе зданий в регионе не проводилось.

[* In 2021–2023 no indoor radon isotopes EEC measurements were taken in this type of buildings in the region.]

Проблема высоких уровней облучения населения этих субъектов Российской Федерации за счет ингаляции изотопов радона известна не первый год [2–5]; в качестве путей ее решения рассматривались различные варианты, вплоть до переселения жителей целых городов (г. Балей Забайкальского края). Исследования уровней содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в указанных регионах в 2021–2023 гг. подтвердили полученные ранее данные, а также выявили новые группы зданий с высокими значениями ЭРОА изотопов радона в воздухе.

Как свидетельствуют данные таблицы 3, при оценке показателей радиационной безопасности питьевой воды в субъектах Российской Федерации в 2021–2023 гг. более 80% иссле-

дований – 48 562 из 58 804 – приходится на определение УА радона (²²²Rn); общее число анализов содержания остальных ПРН (²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²³⁸U+²³⁴U) составило 10 242.

В таблице 8 приведены данные о диапазоне средних по регионам значений УА ПРН в воде источников питьевого водоснабжения в 2021–2023 гг. в единицах мБк/кг.

Формат сбора данных в ФБДОПИ (как и в форме федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона»⁸) не учитывает результаты тех измерений проб питьевой воды, которые по суммарным показателям удельной альфа- и бета-активности не превысили установленные критерии первич-

⁸ Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона». Утверждена приказом Федеральной службы государственной статистики от 16.10.2013 № 411. [Federal statistical form No. 4-DOZ "Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background". Approved by the order of the Federal State Statistics Service of 16.10.2013 No. 411. (In Russ.)]

ной оценки качества, и для которых, в соответствии с требованиями нормативных документов, дальнейший анализ воды с определением содержания отдельных радионуклидов не проводился. Таким образом, можно говорить о том, что в целом в стране выполняется значительно большее

число анализов питьевой воды на соответствие показателям радиационной безопасности, однако для оценки доз внутреннего облучения населения за счет потребления питьевой воды используются только данные полных радионуклидных исследований.

Таблица 8

Диапазон средних по регионам значений УА ПРН в питьевой воде в 2021–2023 гг.

[Table 8]

Ranges of regional averages of activity concentrations of natural radionuclides in drinking water in 2021–2023]

Год [Year]	Диапазон УА ПРН в питьевой воде, мБк/кг [Ranges of activity concentrations of natural radionuclides in drinking water, mBq/kg]					
	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³⁸ U+ ²³⁴ U	²²² Rn
2021	0,5–263,0	0,5–243,3	2,0–96,0	2,0–56,4	2,0–957,3	857,4–137 459,8
2022	0,5–277,6	0,5–242,7	1,5–106,5	2,0–42,5	7,3–7 648,0	1 000,0–131 885,5
2023	0,5–173,3	0,5–232,5	3,1–52,0	2,1–41,4	6,5–5 516,0	1 000,0–111 809,6

Из таблицы 8 видно, что даже средний показатель содержания ²²²Rn в воде источников питьевого водоснабжения отдельных субъектов Российской Федерации в 2 и более раз превышает уровень вмешательства (60 Бк/кг), установленный санитарными правилами; речь идет о Челябинской области и Забайкальском крае. В питьевой

воде отдельных районов и населенных пунктов этих регионов уровни содержания ²²²Rn еще выше; это отражено в таблице 9, где приведены максимальные из измеренных значений УА ²²²Rn в питьевой воде отдельных населенных пунктов Челябинской области и Забайкальского края в 2021–2023 гг.

Таблица 9

Результаты измерений УА ²²²Rn в питьевой воде отдельных населенных пунктов Челябинской области и Забайкальского края в 2021–2023 гг.

[Table 9]

Maximum values of activity concentration of ²²²Rn in drinking water in certain settlements of two regions (Chelyabinsk Oblast and Zabaykalsky Krai) in 2021–2023]

Субъект РФ, район, населенный пункт [Region, district, settlement]	Макс. УА ²²² Rn, Бк/кг [Max activity concentration of ²²² Rn, Bq/kg]
Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]	
Челябинск [Chelyabinsk]	684
Сосновский район, н.п. Белые Росы [Sosnovskiy district, Belye Rosy]	608
Сосновский район, н.п. Кременкуль [Sosnovskiy district, Kremenkul']	1 196
Сосновский район, н.п. Лесной Остров [Sosnovskiy district, Lesnoy Ostrov]	1 047
Сосновский район, н.п. Прудный [Sosnovskiy district, Prudnyy]	1 085
Сосновский район, н.п. Родной [Sosnovskiy district, Rodnoy]	1 629
Аргаяшский район, н.п. Халитова [Argayashskiy district, Khalitova]	578
Аргаяшский район, н.п. Южный Горняк [Argayashskiy district, Yuzhnyy Gornyak]	535
Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]	
Хилокский район, н.п. Хилок [Khilokskiy rayon, Khilok]	237
Балейский район, г. Балей [Baleyskiy district, Baley]	858
Оловянинский район, н.п. Оловянная [Olovyanninskiy district, Olovyannaya]	605
Агинский район, н.п. Орловский [Aginskiy district, Orlovskiy]	530

Высокие уровни содержания ²²²Rn в питьевой воде отдельных населенных пунктов фиксировались в период 2021–2023 гг. и в тех регионах, где средний показатель УА ²²²Rn не превышает уровня вмешательства:

– Республика Карелия: Лоухский район: п. Чупа – 209 Бк/кг, Калевальский район: п. Юшкозеро – 220 Бк/кг,

Муезерский район: п. Тикша – 106 Бк/кг;

– Хабаровский край: Верхнебуреинский район: п. Алонка – 138 Бк/кг, п. Этыркэн – 186 Бк/кг, п. Новый Ургал – 204 Бк/кг;

– Республика Саха (Якутия): Алданский район, г. Алдан – 326 Бк/кг;

– Оренбургская область: Адамовский район: с. Аниховка – 638 Бк/кг, п. Джасай – 701 Бк/кг, п. Нововинницкое – 468 Бк/кг; Кваркенский район: с. Кваркено – 226 Бк/кг, с. Екатериновка – 236 Бк/кг, с. Аландское – 256 Бк/кг.

По остальным ПРН, данные о которых поступили в ФБДОПИ в период 2021–2023 гг., превышение уровней вмешательства было зафиксировано в п. Новый Чарыш Усть-Калманского района Алтайского края: при уровнях вмешательства для ^{234}U и ^{238}U на уровне 2,8 и 3,0 Бк/кг, суммарное содержание этих радионуклидов в питьевой воде подземного источника водоснабжения составило 35 Бк/кг. По итогам выполненных детальных исследований источник водоснабжения в п. Новый Чарыш был признан непригодным для питьевого использования, в поселке осуществлен переход на альтернативное водоснабжение населения питьевой водой: сразу после закрытия источника население было обеспечено привозной питьевой водой, затем в населенном пункте был организован новый источник водоснабжения, соответствующий требованиям санитарных правил по показателям радиационной безопасности.

Дозы облучения за счет ПИИИ в производственных условиях 2 619 работников предприятий неядерных отраслей промышленности, сведения о которых были представлены в ФБДОПИ, в исследуемый период находились в диапазоне от 0,01 до 5,82 мЗв/год; превышение порогового значения дозы в 5,0 мЗв/год, было зафиксировано в 2022 и

2023 гг. для 3 и 8 работников предприятия водоподготовки в Рязанской области соответственно.

На основе измерительных данных о параметрах радиационной обстановки в части ПИИИ, поступивших в ФБДОПИ в 2022–2024 гг., была выполнена оценка годовых индивидуальных эффективных доз облучения населения субъектов Российской Федерации за 2021, 2022 и 2023 гг. В зависимости от мест проведения исследований в каждом отчетном году оценка дозы природного облучения населения в одном и том же регионе (и в стране в целом) в разные годы может существенно различаться.

В таблице 10 приведены данные о диапазоне средних по регионам годовых индивидуальных эффективных доз облучения за счет ПИИИ, оцененных по исследованиям 2021–2023 гг.: дозы внешнего терригенного облучения (ВТО), дозы внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона, дозы внутреннего облучения за счет поступления ПРН с питьевой водой и полная доза облучения, рассчитанная с учетом дозы, обусловленной космическим излучением, и среднемировых значений доз за счет ^{40}K , содержания ПРН в продуктах питания и атмосферном воздухе.

Данные последнего столбца таблицы 10 свидетельствуют о том, что в период 2021–2023 гг. в ряде регионов Российской Федерации жители получали повышенные (от 5 до 10 мЗв/год) и высокие (свыше 10 мЗв/год) дозы облучения за счет ПИИИ; их перечень приведен в таблице 11.

Таблица 10

Диапазон средних по регионам годовых доз облучения за счет ПИИИ в 2021–2023 гг.

[Table 10]

Ranges of regional average annual effective doses from exposure to natural sources of ionizing radiation in 2021–2023]

Год [Year]	Диапазон средних годовых эффективных доз, мЗв [Ranges of regional average annual effective doses, mSv]			
	ВТО [External terrestrial radiation]	Радон [Radon]	Вода [Drinking water]	Полная [Total]
2021	0,33–1,20	0,41–12,12	0,01–0,21	1,77–13,82
2022	0,33–0,99	0,63–8,00	0,01–0,33	1,89–9,47
2023	0,34–1,13	0,48–11,21	0,01–0,24	1,74–13,00

Таблица 11

Субъекты Российской Федерации с повышенными и высокими уровнями природного облучения по результатам исследований 2021–2023 гг.

[Table 11]

Regions of Russia with increased and high public doses from exposure to natural sources of ionizing radiation in 2021–2023]

Год [Year]	Средняя годовая эффективная доза, мЗв [Average annual effective dose, mSv]	
	5–10 мЗв [mSv]	>10 мЗв [mSv]
2021	Республика Алтай, Республика Башкортостан, Республика Тыва, Иркутская область [The Altai Republic, The Republic of Bashkortostan, The Republic of Tyva, Irkutsk Oblast]	Забайкальский край [Zabaykalsky Krai]
2022	Республика Алтай, Республика Башкортостан, Республика Тыва, Иркутская область, Ленинградская область, Забайкальский край [The Altai Republic, The Republic of Bashkortostan, The Republic of Tyva, Irkutsk Oblast, Leningrad Oblast, Zabaykalsky Krai]	—
2023	Республика Башкортостан, Ставропольский край, Ивановская область, Оренбургская область [The Republic of Bashkortostan, Stavropol Krai, Ivanovo Oblast, Orenburg Oblast]	Республика Алтай Забайкальский край [The Altai Republic, Zabaykalsky Krai]

Основной вклад в полную дозу облучения населения всех регионов России за счет ПИИИ вносит доза внутреннего облучения за счет ингаляции изотопов радона, торона и ДПР; этот же фактор в 100% случаев является причиной повышенных и высоких уровней природного облучения жителей отдельных территорий.

На основании выполненных оценок доз природного облучения населения субъектов Российской Федерации

в 2021–2023 гг. была оценена средняя по стране доза облучения россиян при воздействии ПИИИ, и дозы за счет различных компонентов природного облучения. В таблице 12 представлены оценки годовых эффективных доз за счет ПИИИ в расчете на 1 жителя Российской Федерации, полученные по результатам исследований каждого отчетного года.

Таблица 12

Средние годовые дозы облучения за счет ПИИИ в 2021–2023 гг. в расчете на 1 жителя РФ

[Table 12]

Average annual individual effective doses to the population of Russia from exposure to natural sources of ionizing radiation in 2021–2023]

Год [Year]	Средняя годовая эффективная доза, мЗв [Average annual effective dose, mSv]			
	ВТО [External terrestrial radiation]	Радон [Radon]	Вода [Drinking water]	Полная [Total]
2021	0,68	1,89	0,03	3,30
2022	0,68	1,85	0,05	3,27
2023	0,69	1,86	0,04	3,28

Таким образом, несмотря на имеющуюся ежегодную вариабельность оценок доз природного облучения населения ряда субъектов Российской Федерации (особенно это характерно для регионов с неравномерно распределенными по местности радоноопасными участками территории), средняя по стране доза облучения населения за счет ПИИИ является довольно стабильной, изменяясь от года к году в пределах не более 1%.

Выводы

Проведенный анализ данных об уровнях облучения населения за счет ПИИИ, накопленных в ФБДОПИ в период 2022–2024 гг. по итогам исследований 2021–2023 гг., позволяет сделать следующие выводы:

- в Российской Федерации планомерно и регулярно выполняется мониторинг радиационной обстановки в части ПИИИ;
- уровни МАЭД гамма-излучения в жилых и общественных зданиях и на открытой местности на территории России, обусловленные природной компонентой, соответствуют требованиям нормативных документов; повышенные значения МАЭД гамма-излучения на территории отдельных районов Брянской области обусловлены остаточным радиоактивным загрязнением вследствие аварии на ЧАЭС;
- уровни содержания радона (^{222}Rn) и торона (^{220}Rn) и ДПР в воздухе помещений зданий жилого и общественного назначения на территории отдельных населенных пунктов регионов превышают установленные гигиенические нормативы;
- в воде ряда источников питьевого водоснабжения населения фиксируются значения УА радона, превышающие уровень вмешательства для данного радионуклида;

– средние годовые эффективные дозы облучения жителей за счет ПИИИ ряда субъектов Российской Федерации характеризуют повышенный и высокий уровень природного облучения населения;

– основной причиной повышенных и высоких доз облучения населения в субъектах Российской Федерации при воздействии ПИИИ является содержание радона, торона и ДПР в воздухе помещений;

– годовая эффективная доза облучения за счет ПИИИ в расчете на 1 жителя Российской Федерации находится на уровне 3,3 мЗв/год.

Заключение

Развитие Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан наряду с развитием системы Радиационно-гигиенической паспортизации организаций и территорий приведено в перечне основных направлений реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, утвержденной Указом Президента Российской Федерации № 585 от 13.10.2018⁹.

Благодаря функционированию в рамках ЕСКИД Федерального Банка данных по дозам облучения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона в России накоплен (и ежегодно увеличивается) уникальный массив информации о показателях природного облучения населения страны, дающий возможность проведения радиационно-гигиенической оценки уровней природного облучения жителей и являющийся информационной основой принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации при воздействии ПИИИ [6, 7].

⁹ Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу. Утверждены Указом Президента Российской Федерации № 585 от 13.10.2018. [Fundamentals of state policy in the field of nuclear and radiation safety of the Russian Federation for the period up to 2025 and beyond. Approved by the Decree of the President of the Russian Federation No. 585 of 13.10.2018. (In Russ.)]

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при поддержке средств государственного контракта от 15 июля 2022 г. № 81.001.22.2 «Подготовка информационных материалов о радиационной обстановке на территории Российской Федерации на основе анализа результатов радиационного мониторинга и доз облучения персонала и населения» (шифр: «Состояние РБ–22»).

Литература

1. Кормановская Т.А., Ахматдинов Р.Р., Горский Г.А. Итоги 20 лет функционирования Федерального банка данных по дозам природного облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 112–125. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125.
2. Венков В.А., Световидов А.В., Стамат И.П. и др. Оценка доз облучения жителей Республики Алтай за счет содержания радона в воздухе зданий / Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности населения на территориях с повышенным уровнем радиации: сб. тезисов Международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 15–17 сентября 2008 г.). СПб., 2008. С. 30–32.
3. Михайлютина С.И., Дубина Л.Е., Иванникова Г.А. и др. О результатах радиологического мониторинга в г. Бaley / Актуальные вопросы радиационной гигиены: сб. тез. междунар. науч.-практ. конф., посвященной 85-летию со дня рождения П.В. Рамзаева, Санкт-Петербург, 1–3 октября 2014 г. СПб., 2014. С. 146–149.
4. Кендиван О.Д., Бичеол С.Х., Монгуш С.Д. Исследование содержания радона в жилых помещениях Улуг-Хемского района Республики Тыва // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-6. С. 1242–1244.
5. Чевычелов А.П., Собакин П.И., Горохов А.Н., Кузнецова Л.И. Основы экологической безопасности (радионуклиды и тяжелые металлы) в Алданском районе Республики Саха (Якутия) / География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока: матер. II Всеросс. науч.-практ. конф., посвященной 100-летию Якутской Автономной Советской Социалистической Республики (ЯАССР), Якутск, 25–26 марта 2022 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2022. С. 114–119.
6. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 1. Основные достижения и задачи по совершенствованию // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17.
7. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Радиационно-гигиеническая паспортизация и ЕСКИД – информационная основа принятия управленческих решений по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации. Сообщение 2. Характеристика источников и доз облучения населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 3. С. 18–35. DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35.

Поступила: 09.10.2024

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, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru
ORCID: 0009-0005-7922-7367

Для цитирования: Кормановская Т.А. Итоги функционирования Федерального банка данных доз облучения населения Российской Федерации за счет природных источников ионизирующего излучения в 2022–2024 гг. // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 68–78. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-68-78

Results of functioning of the Federal databank of radiation doses to the population of the Russian Federation due to natural sources of ionizing radiation in 2022–2024

Tatyana A. Kormanovskaya

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

The paper presents results of analysis of data accumulated during 2022–2024 in the Federal databank of radiation doses to the public from exposure to natural and technologically enhanced background radiation, which functions within the framework of the Unified State System for Monitoring and Accounting for Individual Doses of Radiation to the Citizens. The results of 598,604 measurements of ambient gamma

Tatyana A. Kormanovskaya

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

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru

dose rate in dwellings and public buildings and outdoors in various regions of the country, 155,249 measurements of indoor radon isotopes equilibrium equivalent concentration, 58,804 measurements of activity concentrations of natural radionuclides in drinking water were analyzed. Based on these data, a hygienic assessment of the radiation safety of the population of the Russian Federation due to exposure to natural sources of ionizing radiation in the period 2021–2023 was performed. The analysis of data on indoor radon isotopes equilibrium equivalent concentration showed that in a number of regions of Russia (the Altai Republic, the Republic of Sakha (Yakutia), the Republic of Tyva, Zabaykalsky Krai, Irkutsk Oblast, etc.), in the study period, hygienic norms (action levels) for dwellings and public buildings were exceeded. The analysis of data on activity concentrations of natural radionuclides in drinking water revealed significant (more than an order of magnitude) exceedances of the intervention level for radon in drinking water of certain sources of drinking water supply in Chelyabinsk Oblast and Zabaykalsky Krai. The assessment of public doses due to natural sources of ionizing radiation showed that in several regions of Russia (the Altai Republic, the Republic of Bashkortostan, the Republic of Tyva, Irkutsk Oblast, Stavropol Krai, etc.) public exposure to natural sources can be classified as “increased” (average annual effective dose is in the range 5–10 mSv), and in Zabaykalsky Krai public exposure can be classified as “high” (average annual effective dose exceeds 10 mSv/year) in 2021 and 2023.

Key words: natural sources of ionizing radiation, public doses, indoor radon, Federal databank of radiation doses to the public from exposure to natural and technologically enhanced background radiation.

Conflict of interests

The author declares no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out with the support of funds from the state contract No. 81.001.22.2 dated July 15, 2022 “Preparation of information materials on the radiation situation in the territory of the Russian Federation based on the analysis of the results of radiation monitoring and radiation doses to personnel and the public” (cipher: “The state of RS–22”).

References

1. Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR, Gorsky GA. Results of the 20-year period of functioning of the Federal Databank on the natural radiation doses to the population of the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021; 14(3): 112–125. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-112-125.
2. Venkov VA, Svetovidov AV, Stamat IP, Obukhov IP, Trubitsin SE. Estimation of radiation dose to the population of the Altai Republic from exposure to indoor radon. In: Hygienic aspects of ensuring radiation safety of the population in the territories with elevated radiation levels: Proceedings of the International scientific and practical conference, 15–17 September 2008, St. Petersburg. St. Petersburg; 2008. P. 30–32. (In Russian).
3. Mikhaylyutina SI, Dubina LE, Ivannikova GA, Belozerova TA, Sanzhieva AM, Rabichko IV, et al. On the results of radiological monitoring in Baley. In: Current issues of radiation hygiene. Proceedings of the scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of P.V. Ramzaev, 1–3 October 2014, St. Petersburg. St. Petersburg; 2014. P. 146–149. (In Russian).
4. Kendivan OD, Bicheool SK, Mongush SD. Study the content of radon in dwellings Ulug-Khem district, Tuva Republic. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*. 2014; 9-6: 1242–1244. (In Russian).
5. Chevychelov AP, Sobakin PI, Gorokhov AN, Kuznetsova LI. Fundamentals of environmental safety (radionuclides and heavy metals) in the Aldan district of the Republic of Sakha (Yakutia). In: Geography and local history in Yakutia and adjacent territories of Siberia and the Far East. Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic (YAASSR), 25–26 March 2022, Yakutsk. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022. P. 114–119. (In Russian).
6. Onishchenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 1. Main achievements and challenges to improve. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 7–17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-7-17.
7. Onishchenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Barkovsky AN, Kormanovskaya TA, Shevkun IG. Radiation-hygienic passportization and USIDC-information basis for management decision making for radiation safety of the population of the Russian Federation. Report 2. Characteristics of the sources and exposure doses of the population of the RF. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(3): 18–35. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-3-18-35.

Received: October 09, 2024

For correspondence: Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Leading researcher, 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 Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: f4dos@mail.ru)

ORCID: 0009-0005-7922-7367

For citation: Kormanovskaya T.A Results of functioning of the Federal databank of radiation doses to the population of the Russian Federation due to natural sources of ionizing radiation in 2022–2024. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 68–78. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-68-78

Оценка геогенного радонового потенциала с использованием активации адвективного потока воздуха из грунта

И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, И.А. Юрков, В.С. Изгагин

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

Прогнозирование радоноопасности и обоснование мер по снижению объемной активности радона в зданиях требует изучения закономерностей переноса радона из грунта. В статье описан подход к оценке геогенного радонового потенциала площадки на основе исследования зависимости потока радона из грунта от градиента давления. На примере экспериментального полигона выполнена апробация метода измерения плотности потока радона при искусственной активации контролируемого адвективного потока воздуха из грунта в накопительную камеру. Измерительная установка состояла из накопительной камеры большого объема (200 л), системы помп, расходомеров и дифференциального манометра. По результатам измерений в 12 точках полигона получены ряды значений, включающие адвективную плотность потока радона в зависимости от разности давлений между измерительной камерой и атмосферой (в диапазоне 4–20 Па), объемную активность радона в почвенном воздухе, сопротивление потоку воздуха в системе грунт-измерительная камера. Показано, что на исследованном полигоне потенциальная адвективная плотность потока радона значительно превосходит диффузионную плотность потока радона, соответствующие диапазоны значений составляют 23–870 мБк/(м²·с) и 5,5–7,0 мБк/(м²·с). Сопротивление потоку воздуха в системе грунт-измерительная камера изменяется в зависимости от метеоусловий в диапазоне значений 93–2400 кПа/(м³·с⁻¹). В среднем при сухих условиях сопротивление потоку воздуха в 4,8 раза ниже, чем при дожде. Величина объемной активности радона в почвенном воздухе варьируется в диапазоне от 0,6 до 3,2 кБк/м³ при среднем арифметическом 1,4 кБк/м³. Зависимость адвективной плотности потока радона, нормированной на разность давления 1 Па, от сопротивления потоку воздуха подчиняется закону Дарси. Эта зависимость с учетом объемной активности радона в почвенном воздухе характеризует геогенный радоновый потенциал на площадке. Проанализированы преимущества и недостатки метода оценки геогенного радонового потенциала на основе искусственной активации градиента давления в измерительной системе.

Ключевые слова: радон, геогенный радоновый потенциал, плотность потока, адвекция, метод измерения.

Введение

Исследование закономерностей поступления и накопления радона в помещениях зданий обусловлено необходимостью решения следующих задач: определение признаков радоноопасности территорий, определение признаков радоноопасности зданий; формирование научных основ разработки методов снижения объемной активности (ОА) радона в зданиях.

Основные факторы, влияющие на уровень ОА радона в здании, могут быть отнесены к геогенным, антропогенным и климатическим. Геогенные факторы определяют образование и перенос радона в геологической среде, примыкающей к зданию. К антропогенным факторам относятся конструкция здания, режим содержания помещения. Климатические факторы определяют градиент давления в системе грунт–здание–атмосфера.

Для количественной оценки геогенной составляющей поступления радона в здание из грунта используется концепция геогенного радонового потенциала (ГРП), которая описывает геологическое пространство под зданием как источник радона [1–3]. В общем смысле величина ГРП про-

порциональна некоторой мощности генерации радона (радоновыделению) и обратно пропорциональна сопротивлению переносу радона в геологической среде. В качестве физически строгой меры ГРП может рассматриваться адвективная плотность потока радона, нормированная на градиент давления в почвенном воздухе и атмосфере [2].

Образование радона и его выход в поровое пространство грунта связаны, соответственно, с содержанием ²²⁶Ra в породах и грунтах и коэффициентом эманирования. Транспорт радона в пористых средах и его эксхалация с поверхности грунта происходит за счет диффузионного и адвективного механизмов. Диффузия определяется градиентом концентрации радона на границе пористой среды и атмосферы и зависит от пористости среды, адвекция – градиентом давления, проницаемостью среды и вязкостью воздушного флюида. Дополнительными факторами, которые локально повышают ГРП, являются разломы и современная тектоническая активность. Одним из ключевых элементов концепции ГРП является его независимость от конструкции здания и режима содержания помещений. Качественная оценка ГРП может быть проведена с использованием предикторов, включающих комплекс геологических,

Ярмошенко Илья Владимирович

Институт промышленной экологии

Адрес для переписки: 620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: ivy@ecko.uran.ru

геохимических, литологических параметров [2, 4, 5]. Для многих территорий России, в частности Среднего Урала, на основе таких данных выполнено картирование зон повышенной радоноопасности [6, 7].

Во многих странах получил распространение метод количественной оценки ГРП, предложенный чешскими специалистами Мартином и Матеем Нежналами [1]. По методике Нежналов ГРП определяется как функция ОА радона в почве и проницаемости почв [1, 8]. По результатам сопоставления данных измерений величины ГРП и обследований накопления радона в малоэтажных зданиях обоснованы значения ГРП, соответствующие низкому, среднему и высокому радоновому потенциалу (рису). Сложность использования измерений почвенного радона и проницаемости грунта для оценки радонового потенциала связана с большой вариабельностью этих величин в пространстве и во времени, которая была продемонстрирована в ряде исследований [9–11].

Кроме метода Нежналов для количественной оценки ГРП в разных работах предлагались такие величины как концентрация урана или удельная активность (УА) ^{226}Ra в грунте (с учетом коэффициента эманирования), ОА радона в некотором образцовом здании, а также средняя ОА радона или вероятность превышения некоторого уровня ОА радона в группе однотипных стандартных зданий [12, 13]. В России, Китае и других странах получил распространение метод оценки радонового потенциала территории по плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта [14–16]. Эта величина может быть измерена с использованием угольного адсорбера, помещенного в специальную камеру, установленную открытым основанием на грунт, или накопительной камеры [17–20]. Статистическая связь ОА радона в зданиях с ГРП была продемонстрирована различными авторами с применением результатов радоновых обследований в зданиях [21–23].

Общий недостаток методов оценки ГРП на основе измерения ОА радона в почвенном воздухе и ППР состоит в том, что эти величины определяются в условиях отсутствия здания (“no building” concept) [24]. До возведения здания поток радона с поверхности грунта формируется за счет диффузии и некоторой адвективной составляющей, которая возникает за счет возможного перепада давлений на границе грунта и атмосферы. Наличие или отсутствие адвективной составляющей фактически не поддается контролю этими методами. Возведение здания сопровождается возникновением существенного стабильного разрежения в области соприкосновения грунта и здания, что приводит к возникновению постоянного адвективного потока воздуха из грунта в здание.

Для оценки скорости адвективного поступления ранее был предложен метод, основанный на использовании накопительной камеры, в которой создается разрежение [25, 26]. Разница давления активирует контролируемый адвективный перенос в системе грунт–накопительная камера. Регистрация кривой накопления в камере позволяет оценить адвективную ППР и зависимость этой величины от разницы давления. **Цель настоящей работы** – выполнить детальную апробацию метода измерения ППР при активации адвективного потока воздуха из грунта в измерительную накопительную камеру, проанализировать преимущества и недостатки метода для оценки ГРП на основе этого подхода.

Материалы и методы

Место проведения измерений

Для проведения измерений ППР был использован экспериментальный полигон на территории Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН (ИГФ УрО РАН, г. Екатеринбург). Координаты точки измерения № 1 на полигоне 56°46'44.8"N 60°33'21.7"E. Экспериментальный полигон расположен на площади развития Ширококореченского габбрового массива, являющегося частью Балтымского массива. По данным описания геологического разреза по скважине ИГФ-300 «Пономаревская» (данные ИГФ УрО РАН), которая была пробурена на расстоянии в 50 метров от полигона, от 0 до 3 метров в глубину разрез представлен светло-бурой глиной с дресвой кварца до 30%. Светло-бурая глина относится к четвертичным аллювиальным отложениям. От 3 метров и глубже наблюдается габбро средне и крупнозернистое.

Ранее в 2012 и 2013 гг. на специальных площадках вблизи и в подвале основного здания ИГФ УрО РАН проводились измерения ППР с поверхности грунта с использованием угольных адсорберов, а также измерения УА природных радионуклидов в почве [4]. Площадки располагались на лесной опушке на расстоянии 1,7 км от полигона (ЭП-1), вдоль улицы (профиль из 10 точек, вытянутый по краю леса, ЭП-2), в подвале здания с грунтовым полом. Результаты измерения ППР с поверхности грунта, УА ^{226}Ra и других параметров, ранее полученных другими исследователями, на этих экспериментальных площадках приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты измерений параметров, характеризующих природную радиоактивность грунта, выполненных в работе [4]

[Table 1

[Results of measurements of parameters characterizing the natural radioactivity of soil, according to the study [4]]

Параметр [Parameter]	Площадка [Site]		
	ЭП-1 [ES 1]*	ЭП-2 [ES 2]*	Подвал [Basement]
ППР, мБк/(м ² ·с) (среднее за год) [Annual average radon flux density, mBq/(m ² s)]	77±15	13±3	21±2
УА ^{226}Ra в грунте, Бк/кг [^{226}Ra concentration in soil, Bq/kg]	35±5	–	5,8±0,9
Плотность грунта, кг/м ³ [Soil density, kg/m ³]	1570– 1900	1400– 1600	1480– 1580
Коэффициент эманирования радона [Radon emanation coefficient]	0,14– 0,35	–	0,03–0,1

* ЭП-1 – экспериментальная площадка № 1; ЭП-2 – экспериментальная площадка № 2 [ES-1 – experimental site №1, ES-2 – experimental site №2].

Площадки ЭП-2 и экспериментальный полигон имеют схожую геологическую структуру (габбро-диабазы) в отличие от ЭП-1, сложенную продуктами выветривания гранитов. С учетом этого, результаты измерений ППР и УА ^{226}Ra на экспериментальном полигоне в данном исследовании на ЭП-2 и в подвале могут быть сопоставлены.

Метод измерения

Установка для измерения ППР с возможностью активации контролируемой разности давления в системе грунт-накопительная камера включала следующее оборудование и средства измерения: накопительная камера объемом $V=0,2 \text{ м}^3$, площадью $S=0,28 \text{ м}^2$; помпы для создания необходимой депрессии в накопительной емкости; ротаметр для определения скорости откачки воздуха из накопительной камеры; дифференциальный манометр; аппаратура для измерения ОА радона (радон-монитор AlphaGUARD PQ2000PRO). Схема установки представлена на рис. 1. Были собраны две экспериментальные установки, использовавшиеся одновременно.

При проведении измерений накопительная камера устанавливалась на грунте открытым основанием, как показано на рисунке 1. Перед началом каждого цикла измерения камера продувалась атмосферным воздухом для удаления радона, оставшегося после предыдущих измерений. После прекращения доступа атмосферного воздуха проводилась регистрация кривой накопления ОА радона в камере с использованием радон-монитора в десятиминутном режиме. С помощью помпы производилась откачка воздуха из камеры и за счет этого создавалась разность давлений ΔP в системе грунт-камера, которая контролировалась с использованием дифференциального манометра. Градиент давления активировал адвективный поток воздуха из грунта в камеру. Измерения ППР в диффузионном режиме проводились при отключенной помпе.

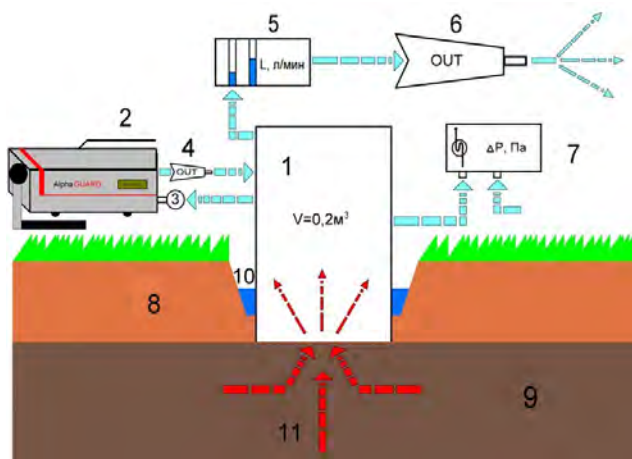


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 – накопительная камера, 2 – радон-монитор, 3 – фильтр дочерних продуктов распада радона, 4 – помпа для прокачки воздуха через радон-монитор, 5 – ротаметр, 6 – помпа для создания разности давления, 7 – дифференциальный манометр, 8 – слой дерна, 9 – суглинок, 10 – увлажненная прослойка, 11 – пути переноса радона
[Fig. 1. Scheme of the experimental setup. 1 – accumulation chamber, 2 – radon-monitor, 3 – filter for the radon progenyproducts, 4 – pump for air pumping through radon-monitor, 5 – rotameter, 6 – pump for pressure difference creation, 7 – differential manometer, 8 – turf layer, 9 – loam, 10 – moistened layer, 11 – radon pathways]

Для расчета ППР из грунта анализировалась кривая накопления радона в накопительной камере, которая описывалась уравнением [26]:

$$(dC(t, \Delta P))/dt = Q(t, \Delta P) + D - L/V C(t), \quad (1)$$

где: $C(t)$ – ОА радона в камере в момент t после начала измерения ($\text{Бк}/\text{м}^3$);

ΔP – разность давлений между камерой и наружной атмосферой (Па);

$Q(t)$ – скорость адвективного поступления радона в камеру ($\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$);

D – скорость диффузионного поступления радона в камеру ($\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$);

L – скорость откачки воздуха из камеры ($\text{м}^3/\text{с}$);

V – объем камеры (м^3).

При анализе кривых накопления ОА радона использовалось условие $Q(t=0)=0$ и модель вида [26]:

$$Q(t) = Q^{\max}(1 - e^{-\lambda t}), \quad (2)$$

где $Q^{\max}$ – максимальная скорость поступления, λ – постоянная времени (с^{-1}).

С учетом условия (2) решение дифференциального уравнения (1) имеет вид:

$$C(t) = e^{-\frac{L}{V}t} \cdot \left(e^{t(\frac{L}{V}-\lambda)} \left(\frac{-Q^{\max}\lambda e^{\lambda t} + D(\frac{L}{V}-\lambda)e^{\lambda t} + Q^{\max}\frac{L}{V}(e^{\lambda t}-1)}{\frac{L}{V}(\frac{L}{V}-\lambda)} \right) + \left(C(0) - \frac{-Q^{\max}\lambda + D(L/V-\lambda)}{\frac{L}{V}(\frac{L}{V}-\lambda)} \right) \right) \quad (3)$$

Для каждого временного ряда в программном пакете Statistica проводился подбор параметров $Q^{\max}$ и λ в уравнении (3), оценивались их стандартные отклонения. Параметр D оценивался по результатам измерений в диффузионном режиме.

Для определения диффузионной ППР ($\text{Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) и адвективной ППР, нормированной на созданную разность давлений ($\text{Бк}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$), использовались выражения (4) и (5) соответственно.

$$\text{ППР}_D = \frac{D \cdot V}{S} \quad (4)$$

$$\text{ППР}_{\Delta P} = \frac{Q^{\max} \cdot V}{S \cdot \Delta P} \quad (5)$$

Значение ОА радона в воздухе, поступающем в камеру из грунта, C_{Rn} рассчитывалось по формуле:

$$C_{\text{Rn}} = \frac{Q^{\max} \cdot V \cdot \Delta P}{L} \quad (6)$$

Отношение разности давления ΔP к скорости прокачки воздуха L рассматривалось как сопротивление системы поступлению почвенного воздуха в накопительную камеру ($R, \text{Па}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1})$):

$$R = \frac{\Delta P}{L} \quad (7)$$

Таким образом, результатом каждого эксперимента являются величины ППР_D, ППР_{ΔP}, C_{Rn} и R.

Для анализа полученных данных использовались некоторые теоретические соотношения. В соответствии с законом Дарси поток воздуха в камеру за счет градиента давления может быть определен как:

$$L = \frac{K}{\eta} \cdot \nabla P \quad (8)$$

где: K – проницаемость грунта (м²), η – динамическая вязкость воздуха (Па·с); ∇P – градиент давления (Па/м). Соответственно, поток радона в камеру равен:

$$J_{Rn} = \frac{K}{\eta} \cdot \nabla P \cdot C_{Rn} = L \cdot C_{Rn} \quad (9)$$

Тогда:

$$\frac{J_{Rn}}{\Delta P} = \frac{C_{Rn}}{R} \quad (10)$$

или

$$\text{ППР}_{\Delta P} = \frac{J_{Rn}}{S \cdot \Delta P} = \frac{C_{Rn}}{R \cdot S} \quad (11)$$

С учетом схемы эксперимента проницаемость грунта можно определить, используя формулу:

$$K = \frac{\eta \cdot L}{\nabla P \cdot S} = \frac{\eta \cdot L \cdot r}{\Delta P \cdot S} = \frac{\eta \cdot r}{R \cdot S} \quad (12)$$

где r – параметр, характеризующий расстояние, на котором реализуется разность давления (м). Для данной схемы эксперимента расстояние r можно принять равным радиусу основания камеры 0,3 м.

Для измерения УА природных радионуклидов отбирались образцы грунта на полигоне. Измерения УА природных радионуклидов проводились на гамма-, бета-спектрометре МКС-АТ1315. Для измерения ОА радона в подвале здания ИГФ УрО РАН был установлен радон-монитор AlphaGUARD PQ2000PRO. Измерения проводились в течение суток с измерительным циклом, равным 1 ч.

Результаты

Эксперименты с использованием накопительной камеры проводились в августе 2018 г. Средняя температура в период экспериментов составляла +17,6 С. Измерения проводились как в сухую погоду, так и при дожде. В случае дождя для защиты оборудования использовался зонт. Измерения ППР проведены в 12 точках, расположение которых на полигоне схематично представлено на рис. 2. Всего получено 18 кривых накопления радона, в т. ч.: четыре кривые накопления – в диффузионном режиме и 14 – в режиме накопления с активированным адвективным потоком. Диффузионная ППР варьировалась от 5,5 до 7,0 мБк/(м²·с), при этом адвективная ППР – от 23 до 870 мБк/(м²·с) при диапазоне разности давлений от 4 до 20 Па.

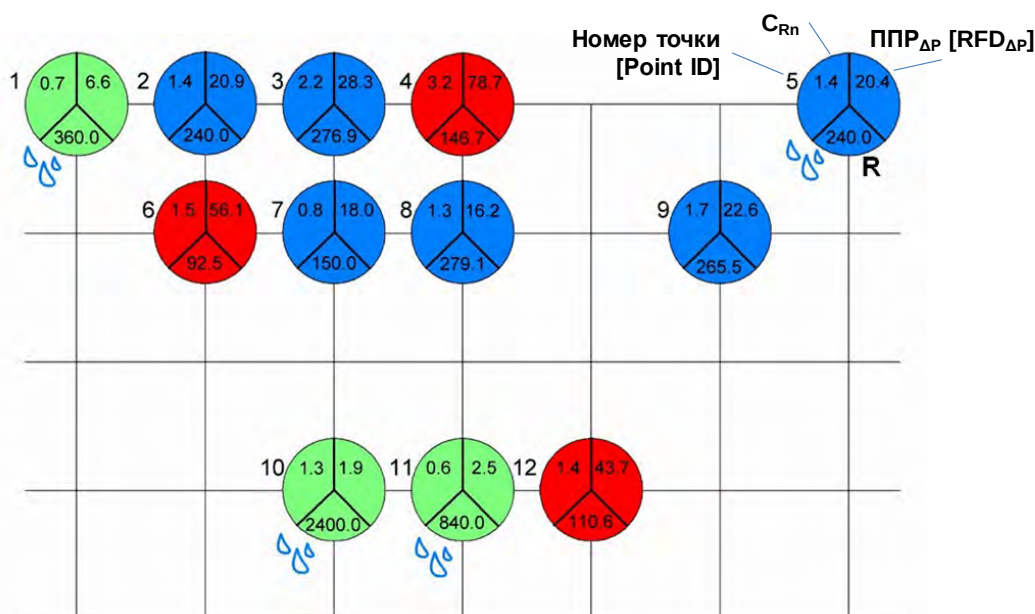


Рис. 2. Результаты расчетов ППР_{ΔP} (мБк/(м²·с·Па)), C_{Rn} (кБк/м³) и R (кПа/(м³·с⁻¹)) в точках измерений. Зеленый цвет точек – ППР_{ΔP} < 10, синий – 10 ≤ ППР_{ΔP} ≤ 40 мБк/(м²·с·Па), красный – ППР_{ΔP} > 40 мБк/(м²·с·Па).

Расстояние между осями сетки – 3 м

[Fig. 2. Results of calculations of radon flux density normalized to pressure difference RFD_{ΔP} (mBq/(m²·s·Pa)), C_{Rn} (kBq/m³) and R (kPa/(m³·s⁻¹)) at the measurement points. The green colour of the points is RFD_{ΔP} < 10, blue is 10 ≤ RFD_{ΔP} ≤ 40 mBq/(m²·s·Pa), and red is RFD_{ΔP} > 40 mBq/(m²·s·Pa). The distance between the grid axes is 3 m]

Для каждой точки на рисунке 2 представлены полученные значения ППР_{др}, R и C_{РН}. В точках № 5 и 11 было проведено несколько измерений, поэтому для них были использованы усредненные значения. Четыре измерения, проведенные при дождливых условиях, обозначены на рисунке 2 знаком «капли». Сводные данные по результатам измерений на полигоне, а также отдельно результаты, полученные при сухих и дождливых условиях, представлены в таб-

це 2. Как видно из рисунка 2 и таблицы 2, ППР радона, нормированная на разницу давлений, значительно выше, а сопротивление в системе грунт–камера значительно ниже при сухих условиях, чем при дожде. В среднем при сухих условиях ППР повышается в 4,6 раза, сопротивление понижается в 4,8 раза. Величина ОА радона в почвенном воздухе, поступающем в камеру, при этом меняется незначительно.

Таблица 2

Результаты измерения ППР на полигоне (СА – среднее арифметическое, СО – стандартное отклонение)

[Table 2

Results of radon flux density (RFD) measurement at the test site (AM – arithmetic mean, SD – standard deviation)]

Параметр [Parameter]	СА [AM]	СО [SD]	Коэффициент вариации [Coefficient of variation]	Диапазон [Range]
ППР _{др} , мБк/(м ² ·с) [Diffusion RFD, mBq/(m ² s)]	6,2	1,2	0,19	5,0–7,7
ППР _{др} , мБк/(м ² ·с·Па) [RFD _{др} , mBq/(m ² s Pa)]	26,0	22	0,85	1,9–79
то же, при осадках [same, with precipitation]	7,9	7,5	0,95	1,9–20
то же, без осадков [same, without precipitation]	36	21	0,58	17–79
R, кПа/(м ³ ·с ⁻¹) [Resistance, kPa/(m ³ s ⁻¹)]	450	617	1,4	93–2400
то же, при осадках [same, with precipitation]	960	862	0,90	240–2400
то же, без осадков [same, without precipitation]	195	73	0,38	93–279
C _{РН} , кБк/м ³ [Radon concentration in soil air, kBq/m ³]	1,4	0,7	0,50	0,6–3,2
то же, при осадках [same, with precipitation]	1,0	0,4	0,36	0,6–1,4
то же, без осадков [same, without precipitation]	1,7	0,7	0,42	0,7–3,2

На рисунке 3 представлены примеры динамики накопления ОА радона в диффузионном режиме и при активированной адвекции для нескольких разностей давлений. Как видно на рисунке 3, накопление радона в камере существенно возрастает при наличии разницы давления в системе грунт–камера. Полученные экспериментальные точки хорошо аппроксимируются с использованием уравнения (3). Анализ кривых накопления в течение четырех часов позволяет определить скорость поступления радона в камеру с неопределенностью в пределах 10%.

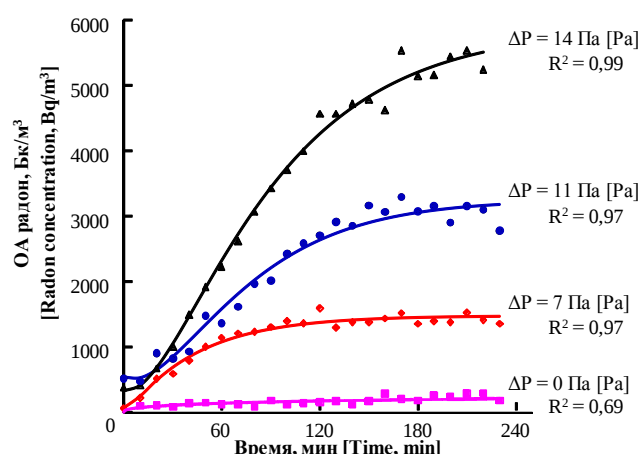


Рис. 3. Вид кривых накопления ОА радона в накопительной камере при различных значениях разности давлений в камере и атмосфере

[Fig. 3. Examples of radon accumulation curves in the accumulation chamber at different values of the pressure difference between chamber and atmosphere]

Зависимость потока радона в камеру, нормированная на разницу давлений, от сопротивления потоку воздуха в системе грунт–камера представлена на рисунке 4. Зависимость, представленная на рисунке 4, аппроксимируется степенной функцией (10), R²=0,60. В соответствии с уравнением (10), при использовании нормированной скорости поступления радона в камеру коэффициент 1440 Бк/м³ имеет физический смысл ОА радона в почвенном воздухе, поступающем в камеру.

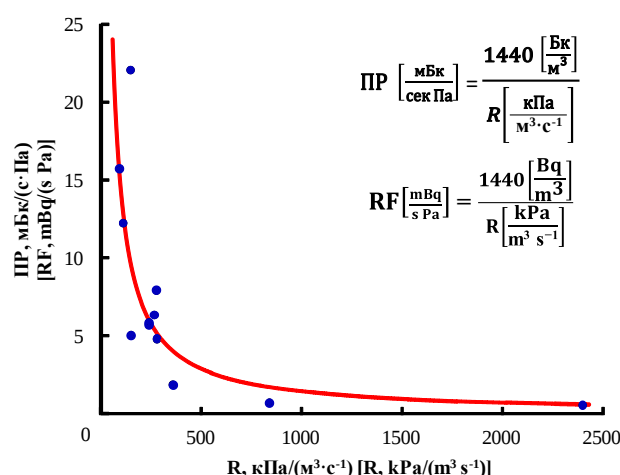


Рис. 4. Зависимость адвентивного потока радона в камеру, нормированного на разницу давлений, от сопротивления в системе грунт–накопительная камера

[Fig. 4. Dependence of the advective radon flux into the chamber, normalized to the pressure difference, on the resistance in the soil-accumulation chamber system]

Для измерения УА природных радионуклидов на полигоне были отобраны 5 образцов грунта. Образцы грунта представляли собой светло-бурую глину, характерную для геологических условий участка. Получены следующие результаты измерений УА (среднее арифметическое и диапазон): ^{226}Ra – 6,7 (4,9–8,2) Бк/кг; ^{232}Th – 12 (9,4–16) Бк/кг; ^{40}K – 194 (163–262) Бк/кг. Измерения содержания радона в воздухе подвального помещения, расположенного вблизи полигона, были проведены в течение суток в декабре 2023 г. По данным радон-монитора ОА радона в среднем составляла 159 Бк/м³ и достигала 211 Бк/м³.

Обсуждение

В ходе проведенных экспериментов получено, что при активации адвективного переноса радона из грунта ОА радона в накопительной камере увеличивается. В сухих условиях при разнице давления в системе грунт–камера 1 Па поток радона с поверхности грунта в накопительную камеру возрастает в среднем в 5,8 раза по сравнению с ППР, которая формируется за счет диффузии. Наблюдается неоднородность характеристик переноса радона из грунта в атмосферу в различных точках полигона. Наибольшие коэффициенты вариации отмечаются для ППР и сопротивления в системе грунт–камера. Одним из факторов, обуславливающих вариабельность ППР и сопротивления, является влажность грунта. Максимальные значения ППР при активации адвективного потока зарегистрированы в сухую погоду. Величина ОА радона в почвенном воздухе, поступающем в накопительную камеру, в меньшей степени зависит от погодных условий. Проницаемость грунта в среднем составляет примерно 10^{-10} м² и находится в диапазоне 10^{-11} – 10^{-9} м². Необходимо отметить, что оценка проницаемости грунта по результатам оценки сопротивления в системе грунт–накопительная камера является достаточно приближительной и может быть округлена до порядка величины.

В соответствии с законом Дарси при одинаковой проницаемости грунта поток радона в накопительную камеру пропорционален приложенной разности давления. Зависимость ППР от сопротивления в системе грунт–камера хорошо аппроксимируется степенной зависимостью при постоянной ОА радона в воздухе, поступающем из грунта (1,4 кБк/м³). Наблюдаемое значение ОА радона в почвенном воздухе соответствует расчетным значениям, которые получены для грунта плотностью 1500 кг/м³, УА ^{226}Ra в 6,7 Бк/кг, коэффициента эманирования примерно 0,03–0,05 и пористости грунта примерно 0,2–0,4. Такие параметры соответствуют полученным нами и другими исследователями данным.

Зависимость общей ППР за счет диффузионного и адвективного механизма от сопротивления при допущении постоянной ОА радона в почвенном воздухе характеризует ГРП на площадке. Преимуществом оценки ГРП как суммы диффузионной и адвективной ППР является возможность провести оценку уровня накопления радона в здании, построенном на данном участке. Расчеты показывают, что в модельном жилом помещении в доме с подвалом ($\Delta P = 2$ Па, отношение площади подвала к объему 0,33 м⁻¹, КВО в подвале 0,3 ч⁻¹, КВО в жилом помещении 0,5 ч⁻¹, доля воздухообмена, приходящегося на подвальное помещение, 10%) ОА радона не будет превышать 200 Бк/м³ при ППР 100 мБк/(м²·с·Па). При ППР 25 мБк/(м²·с·Па) ЭРОА радона в помещении не будет превышать среднее значение ЭРОА радона в жилых зданиях России, которое составляет примерно 24 Бк/м³ [27].

Данные о радоновом потенциале площадки, выраженные через зависимость ППР от сопротивления грунта могут

быть сопоставлены с подходом, разработанным М. и М. Нежналами и соавт. [1] На рис. 5 представлены зависимости между ОА радона в почвенном воздухе и сопротивлением грунта, соответствующие некоторым референтным уровням радонового потенциала по Нежналу (штрихованные линии) и по значению ППР с учетом адвективной составляющей (сплошные линии). Как показывает рис. 5, наблюдается близкое соответствие двух подходов.

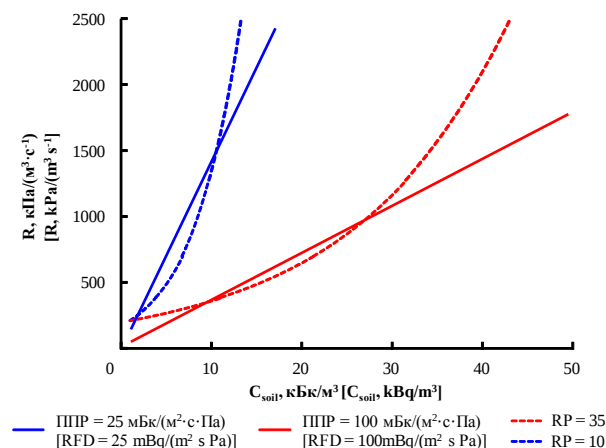


Рис. 5. Зависимость между ОА радона в почвенном воздухе и сопротивлением грунта при фиксированных значениях радонового потенциала по Neznal et al. [1] (штрихованные линии) и по ППР с учетом адвекции (сплошные линии)

[Fig. 5.] Dependence between radon concentration in soil air and soil resistance at fixed values of radon potential according to Neznal et al. [1] (dashed lines) and RFD with advective component (solid lines)]

Необходимо отметить, что, как и при измерении ОА радона в почвенном воздухе (метод Нежналов), так и при измерении с помощью накопительной камеры с откачкой, важным для достижения воспроизводимости результата измерения является качество технической реализации измерительной схемы. В обоих методах наличие дополнительных негерметичностей, щелей и т.п. повышает проницаемость системы, вследствие чего получается смещенная оценка сопротивления или проницаемости грунта.

В целом, предложенный метод исследования радоноопасности площадки с использованием накопительной камеры и активации адвективного переноса позволяет получить более развернутую оценку ГРП, включающую данные о диффузионной и адвективной ППР, проницаемости грунта и ОА радона в почвенном воздухе.

Заключение

Метод оценки ГРП, основанный на активации контролируемого адвективного потока в системе грунт–накопительная камера, обладает следующими преимуществами: возможность оценки потенциальной адвективной ППР, нормированной на разность давлений; одновременная оценка адвективной ППР, диффузионной ППР, ОА радона в почвенном воздухе и проницаемости грунта; возможность проведения исследований не только в сухую погоду; возможность прогноза ОА радона в здании, построенном на обследуемом участке. В пределах исследованного экспериментального полигона наблюдается устойчивая

зависимость между тремя параметрами: потоком радона, ОА радона в почвенном воздухе и сопротивлением грунта. На исследованном полигоне потенциальный адвективный поток радона из грунта значительно превосходит диффузионный поток. Метод оценки ГРП с использованием накопительной камеры и активации адвективного потока может использоваться для детального изучения площадок под строительство зданий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Ярмошенко И.В. – разработка концепции и планирование научной работы, анализ и интерпретация данных, составление черновика рукописи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Малиновский Г.П. – проведение экспериментов, анализ и интерпретация данных, составление черновика рукописи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Юрков И.А. – проведение экспериментов, анализ и интерпретация данных, составление черновика рукописи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Изагин В.С. – проведение экспериментов, анализ и интерпретация данных, составление черновика рукописи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено по государственному заданию ИПЭ УрО РАН (номер темы в ЕГИСУ НИОКТР в 124022800173-2).

Литература

1. Neznal M., Neznal M., Matolín M. et al. The new method for assessing the radon risk of building sites. Czech Geological Survey Special Papers 16. Prague: Czech Geological Survey, 2004. 48 p. URL: <http://www.radonvos.cz/pdf/metodika.pdf> (Дата обращения: 10.06.2024).
2. Bossew P., Cinelli G., Ciotoli G. et al. Development of a Geogenic Radon Hazard Index—Concept, History, Experiences // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17, 4134. DOI: 10.3390/ijerph17114134.
3. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Shchitov D.V. et al. Radon transport in permeable geological environments // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 852, 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
4. Маренный А.М., Цапапов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Издательство "Перо", 2016. 364 с.
5. Petermann E., Meyer H., Nussbaum M., Bossew P. Mapping the geogenic radon potential for Germany by machine learning // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 754, 142291. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142291.
6. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 231 с.
7. 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.
8. Matolin M., Neznal M. Experience from radon in soil gas comparison measurements held in Czech Republic and in other countries, 1992–2022 // Journal of the European Radon Association. 2024. DOI: 10.35815/radon.v5.9545. DOI: 10.35815/radon.v5.9545.
9. Neznal M., Neznal M., Šmarda J. Assessment of radon potential of soils—a five year experience // Environment International. 1996. Vol. 22. P. 819–828. DOI: 10.1016/S0160-4120(96)00189-4.
10. Kemske J., Klingel R., Siehl A., Valdivia-Manchego M. From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany // Environmental Geology. 2008. Vol. 56. P. 1269–1279. DOI: 10.1007/s00254-008-1226-z.
11. Font L., Baixeras C., Moreno V., Bach J. Soil radon levels across the Amer fault // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. S319–S323. DOI: 10.1016/j.radmeas.2008.04.072.
12. Bossew P. Mapping the Geogenic Radon Potential and Estimation of Radon Prone Areas in Germany. Radiation Emergency Medicine. 2015. Vol. 4. P. 13–20.
13. Cinelli G., Tollefsen T., Bossew P. et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation. Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 196. P. 240–252. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.02.008.
14. Павлов И.В. Математическая модель процесса эксгаляции радона с поверхности земли и критерии оценки потенциальной радоноопасности территории застройки // АНРИ. 1997. № 5 (11). С. 15–26.
15. Lei B., Zhao L., Girault F. et al. Overview and large-scale representative estimate of radon-222 flux data in China // Environmental Advances. 2023. Vol. 11. 100312. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100312.
16. Gavriliev S., Petrova T., Miklyaev P., Karfidova E. Predicting radon flux density from soil surface using machine learning and GIS data // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 903. 166348. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166348.
17. МАГАТЭ. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. Technical reports series, no. 474. STI/DOC/010/474. International Atomic Energy Agency, 2013.
18. Жуковский М.В., Донцов Г.И., Шориков А.О., Рогатко А.А. Модификация метода накопительной камеры для измерения плотности потока радона с поверхности почвы // АНРИ. 1999. № 3 (18). С. 9–20.
19. Tsapalov A., Kovler K., Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. Vol. 160. P. 28–35. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.016.
20. Ryzhakova N.K., Stavitskaya K.O., Plastun S.A. The problems of assessing radon hazard of development sites in the Russian Federation and the Czech Republic // Radiation Measurements. 2022. Vol. 150. 106681. DOI: 10.1016/j.radmeas.2021.106681.
21. Demoury C., Ielsch G., Hemon D. et al. A statistical evaluation of the influence of housing characteristics and geogenic radon potential on indoor radon concentrations in France // Journal of Environmental Radioactivity. 2013. Vol. 126. P. 216–225. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.08.006.
22. Petermann E., Bossew P., Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – On the effectiveness of radon priority areas // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. Vol. P. 244–245. 106833. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106833.
23. Zhukovsky M., Yarmoshenko I., Kiselev S. Combination of geological data and radon survey results for radon mapping // Journal of Environmental Radioactivity. 2012. Vol. 112. P. 1–3. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.02.013.
24. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A. Comments to special issue geogenic radiation and its potential use for developing the geogenic radon map // Journal of Environmental Radioactivity. 2017. Vol. 172. P. 143–144. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.03.023.
25. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient // Radiation Measurements. 2018. Vol. 119. P. 150–154. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.10.011.
26. Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Васильев А.В., Жуковский М.В. Метод измерения плотности потока радона из грунта, активированного градиентом давления // АНРИ. 2018. № 2(93). С. 48–55.
27. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Vasilyev A., Zhukovsky M. Reconstruction of national distribution of indoor radon concentration in Russia using results of regional indoor radon measurement programs // Journal of Environmental Radioactivity. 2015. Vol. 150. P. 99–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.08.007.

Поступила: 23.04.2024

Ярмошенко Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, директор Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук. **Адрес для переписки:** 620108, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20; E-mail: ivy@ecko.uran.ru

ORCID: 0000-0002-6591-1513

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

ORCID: 0000-0002-9543-3874

Юрков Игорь Анатольевич – младший научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

Изгагин Вячеслав Сергеевич – младший научный сотрудник Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

ORCID: 0000-0003-1033-2917

Для цитирования: Ярмошенко И.В., Малиновский Г.П., Юрков И.А., Изгагин В.С. Оценка геогенного радонового потенциала с использованием активации адвективного потока воздуха из грунта // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 79–87. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-79-87.

Assessment of geogenic radon potential with activation of advective soil air flow

Ilya V. Yarmoshenko, Georgy P. Malinovsky, Igor A. Yurkov, Vyacheslav S. Izgagin

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

Prediction of radon potential and justification of measures for reducing radon concentration in buildings necessitate the study of soil radon transport. The article presents an approach to estimating the geogenic radon potential of a site based on the study of the dependence of the radon flux from the soil on the pressure gradient. The efficacy of the method of radon flux density measurement with artificial activation of controlled advective air flow from the soil into the accumulation chamber was evaluated at an experimental site. The measuring installation consisted of a large-volume accumulation chamber (200 l), a system of pumps, flow meters, and a differential manometer. The results of measurements at 12 points on the experimental site yielded a number of values, including advective radon flux density as a function of pressure difference between the accumulation chamber and the atmosphere (in the range 4–20 Pa), radon concentration in soil air, and resistance to air flow in the soil-chamber system. The results demonstrate that at the investigated site, the potential advective radon flux density significantly exceeds the diffusive radon flux density: the corresponding radon flux density ranges are 23–870 mBq/(m² s) and 5.5–7.0 mBq/(m² s), respectively. The air flow resistance in the system of the soil measurement chamber varies depending on the meteorological conditions, with a range from 93 to 2400 kPa/(m³·s⁻¹). On average, under dry conditions, the resistance to airflow is 4.8 times lower than in rain. The radon concentration in the soil varies from 0.6 to 3.2 kBq/m³, with an arithmetic mean of 1.4 kBq/m³. The dependence of the advective radon flux density, normalized to a pressure difference of 1 Pa, on the air flow resistance follows the Darcy's law. This dependence, taking into account the soil radon concentration, characterizes the geogenic radon potential at the site. The advantages and disadvantages of the method of geogenic radon potential estimation based on the artificial activation of the pressure gradient in the measurement system are discussed.

Key words: radon, geogenic radon potential, flux density, advection, measurement method.

Authors' personal contribution

Yarmoshenko I.V. – conceptualization and planning, data analysis and interpretation, drafting of the manuscript, final approval of the published version of the manuscript.

Malinovsky G.P. – experiments, data analysis and interpretation, drafting of the manuscript, final approval of the published version of the manuscript.

Yurkov I.A. – experiments, data analysis and interpretation, drafting of the manuscript, final approval of the published version of the manuscript.

Izgagin V.S. – experiments, data analysis and interpretation, drafting of the manuscript, final approval of the published version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The research was carried out under the state assignment of Institute of Industrial Ecology UB RAS (state registration number 124022800173-2).

Ilya V. Yarmoshenko

Institute of Industrial Ecology

Address for correspondence: S. Kovalevskaya Str., 20, Ekaterinburg, 620108, Russia; E-mail: ivy@ecko.uran.ru

References

1. Neznal M, Neznal M, Matolín M, Barnet I, Mikšová J. The new method for assessing the radon risk of building sites. Czech Geological Survey Special Papers 16. Prague: Czech Geological Survey; 2004. 48 p. Available from: <http://www.radonvos.cz/pdf/metodika.pdf> [Accessed 10 June 2024].
2. Bossew P, Cinelli G, Ciotoli G, Crowley QG, De Cort M, Elío Medina J, et al. Development of a Geogenic Radon Hazard Index—Concept, History, Experiences. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17: 4134. DOI: 10.3390/ijerph17114134.
3. Miklyaev PS, Petrova TB, Shchitov DV, Sidiyakin PA, Murzabekov MA, Tsebro D et al. Radon transport in permeable geological environments. *Science of The Total Environment*. 2022;852: 158382. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158382.
4. Marenzi AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Regularities of radon field formation in the geological environment. Moscow: Pero Publishing House; 2016. 364 p. (In Russian).
5. Petermann E, Meyer H, Nussbaum M, Bossew P. Mapping the geogenic radon potential for Germany by machine learning. *Science of the Total Environment*. 2021;754: 142291. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142291.
6. Zhukovskiy MV, Yarmoshenko IV. Radon: measurement, doses, risk assessment. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 1997. 231 p. (In Russian)
7. Kiselev SM, Zhukovskiy 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).
8. Matolin M, Neznal M. Experience from radon in soil gas comparison measurements held in Czech Republic and in other countries, 1992–2022. *Journal of the European Radon Association*. 2024; 5. DOI: 10.35815/radon.v5.9545.
9. Neznal M, Neznal M, Šmarda J. Assessment of radon potential of soils —a five year experience. *Environment International*. 1996;22: 819–828. DOI: 10.1016/S0160-4120(96)00189-4.
10. Kemski , Klingel R, Siehl A, Valdivia-Manchego M. From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany. *Environmental Geology*. 2008;56: 1269–1279. DOI: 10.1007/s00254-008-1226-z.
11. Font L, Baixeras C, Moreno V, Bach J. Soil radon levels across the Amer fault. *Radiation Measurements*. 2008;43: S319–S323. DOI: 10.1016/j.radmeas.2008.04.072.
12. Bossew P. Mapping the Geogenic Radon Potential and Estimation of Radon Prone Areas in Germany. *Radiation Emergency Medicine*. 2015;4: 13–20.
13. Cinelli G, Tollefsen T, Bossew P, Gruber V, Bogucarskis K, De Felice L, et al. Digital version of the European Atlas of natural radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;196: 240–252. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.02.008.
14. Pavlov IV. Mathematical model of the process of radon exhalation from the ground surface and criteria for assessing the potential radon hazard of the territory of the building. *ANRI = ANRI*. 1997;5(11): 15–26. (In Russian).
15. Lei B, Zhao L, Girault F, Cai Z, Luo C, Thapa S, et al. Overview and large-scale representative estimate of radon-222 flux data in China. *Environmental Advances*. 2023;11: 100312. DOI: 10.1016/j.envadv.2022.100312.
16. Gavriliev S, Petrova T, Miklyaev P, Karfidova E. Predicting radon flux density from soil surface using machine learning and GIS data. *Science of The Total Environment*. 2023;903: 166348. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166348.
17. IAEA. Measurement and calculation of radon releases from NORM residues. Technical reports series, no.474. STI/DOC/010/474. International Atomic Energy Agency; 2013.
18. Zhukovskiy MV, Dontsov GI, Shorikov AO, Rogatko AA. Modification of the accumulation chamber method for measuring the radon flux density from the soil surface. *ANRI= ANRI*. 1999;3(18): 9–20. (In Russian).
19. Tsapalov A, Kovler K, Miklyaev P. Open charcoal chamber method for mass measurements of radon exhalation rate from soil surface. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;160: 28–35. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.016.
20. Ryzhakova NK, Stavitskaya KO, Plastun SA. The problems of assessing radon hazard of development sites in the Russian Federation and the Czech Republic. *Radiation Measurements*. 2022;150: 106681. DOI: 10.1016/j.radmeas.2021.106681.
21. Demoury C, Ielsch G, Hemon D, Laurent O, Laurier D, Clavel J, et al. A statistical evaluation of the influence of housing characteristics and geogenic radon potential on indoor radon concentrations in France. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;126: 216–225. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.08.006.
22. Petermann E, Bossew P, Hoffmann B. Radon hazard vs. radon risk – On the effectiveness of radon priority areas. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022; 244–245: 106833. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106833.
23. Zhukovskiy M, Yarmoshenko I, Kiselev S. Combination of geological data and radon survey results for radon mapping. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2012;112: 1–3. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.02.013.
24. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A. Comments to special issue geogenic radiation and its potential use for developing the geogenic radon map. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017;172: 143–144. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2017.03.023.
25. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovskiy M. Method for measuring radon flux density from soil activated by a pressure gradient. *Radiation Measurements*. 2018;119: 150–154. DOI: 10.1016/j.radmeas.2018.10.011.
26. Yarmoshenko IV, Malinovsky GP, Vasilyev AV, Zhukovskiy MV. Method for measuring the radon flux density from the pressure gradient-activated soil. *ANRI=ANRI*. 2018;2(93): 48–55. (In Russian).
27. Yarmoshenko I, Malinovsky G, Vasilyev A, Zhukovskiy M. Reconstruction of national distribution of indoor radon concentration in Russia using results of regional indoor radon measurement programs. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015; 150: 99–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2015.08.007.

Received: April 23, 2024

For correspondence: Ilia V. Yarmoshenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (S. Kovalevskaya str., 20, Ekaterinburg, 620108, Russia; E-mail: ivy@ecko.uran.ru)

ORCID: 0000-0002-6591-1513

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

ORCID: 0000-0002-9543-3874

Igor A. Yurkov – Junior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Vyacheslav S. Izgagin – Junior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

ORCID: 0000-0003-1033-2917

For citation: Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P., Yurkov I.A., Izgagin V.S. Assessment of geogenic radon potential with activation of advective soil air flow. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 79–87. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-79-87.

Сравнительный анализ методов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и альфа-спектрометрии для измерения активности плутония в биосубстратах

В.Р. Баталов¹, М.В. Ишунина², А.В. Ефимов², А.Б. Соколова²

¹ Производственное объединение «Маяк», Озерск, Россия

² Южно-Уральский институт биофизики Федерального Медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

В настоящий момент самыми распространенными методами для измерений активности трансурановых элементов в биологических пробах являются альфа-радиометрия и альфа-спектрометрия. Из них альфа-спектрометрия – наиболее чувствительный и избирательный метод. Однако данный метод не обладает достаточным уровнем чувствительности для контроля труднорастворимых соединений плутония в организме. К примеру, при поступлении труднорастворимых соединений плутония на уровне предельного годового поступления через год в суточном количестве мочи ожидается около 0,4 мБк Pu. Так как нижний предел измерений альфа-спектрометрического метода составляет около 0,5 мБк, то в течение как минимум первых 2 лет персонал, работающий с труднорастворимыми соединениями плутония, не обеспечен достоверным контролем уровней поступления. Для решения данной проблемы была разработана методика анализа, основанная на измерении активности плутония методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Методика позволяет измерять плутоний на масс-спектрометре в суточном количестве мочи и в пробах крови после отделения от интерферирующих изотопов методом анионообменной хроматографии. Этот метод обладает гораздо меньшим временем измерения и существенно более высокой чувствительностью по отношению к долгоживущим изотопам, что позволяет снизить нижний предел измерений в пять раз по сравнению с альфа-спектрометрическим методом. Также методика позволяет отдельно измерять активность изотопов плутония-239 и плутония-240, энергии которых неразличимы на альфа-спектре. Выполнены параллельные измерения активности плутония двумя методами в 88 пробах суточной мочи персонала федерального государственного унитарного предприятия «Производственного объединения «Маяк», работающего преимущественно с труднорастворимыми соединениями плутония. Анализ результатов измерений в этих пробах показал отсутствие статистически значимых различий между полученными результатами. Также эти результаты свидетельствуют о лучшей применимости метода масс-спектрометрии для активностей ниже нижнего предела измерений альфа-спектрометрии. Разработанный метод анализа может быть применен для оценки уровней текущего поступления труднорастворимых соединений плутония, для ретроспективной дозиметрии, а также в качестве экспресс-метода при оценке поступления в нештатных ситуациях по содержанию плутония в крови.

Ключевые слова: внутренняя дозиметрия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, альфа-спектрометрия, плутоний.

Введение

Обеспечение информацией об индивидуальных дозах внутреннего облучения персонала радиационно опасных предприятий, обусловленных инкорпорированным плутонием, является одной из основных задач внутренней дозиметрии. Оценки поступления и доз внутреннего облучения в рамках проведения индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) основываются на результатах определения содержания изотопов плутония в суточном количестве мочи (СКМ). Традиционным методом измерения содержания радионуклидов в СКМ является альфа-спектрометрия по-

сле радиохимической подготовки. Для проведения измерений используют альфа-спектрометр, с помощью которого проводят регистрацию энергетических спектров альфа-излучения, испускаемого исследуемыми радионуклидами в счетных образцах. Метод позволяет надежно определять активность ²³⁸Pu, ^{239,240}Pu на уровне 0,5 мБк в СКМ¹. Существенными недостатками метода являются длительность времени измерения (до 3 дней) и невозможность разделения ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu из-за близости энергий (5244 и 5256 кэВ соответственно [2,3]). Также использование альфа-спектрометрического метода не удовлетворяет требованиям организации контроля внутреннего облучения от труд-

¹ Методика измерений активности изотопов плутония, америция и урана в пробах биосубстратов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой. Свидетельство об аттестации № СП-26-3-РА.RU.311952-2023. Озерск, 2023. 47 с. [Measurement technique for plutonium, americium and uranium isotopes in biosubstrates using alpha spectrometry method with radiochemical preparation. Certificate of attestation No. СП-26-3-РА.RU.311952-2023. Ozersk, 2023. 47 p. (in Russ.)]

Баталов Вадим Робертович

Производственное объединение «Маяк»

Адрес для переписки: 456784, Россия, Челябинская область, г. Озерск, ул. Ленина, д. 31; E-mail: vrbatalov@mail.ru

норастворимых соединений плутония, поскольку не обеспечивает требуемого нижнего предела измерений (НПИ) при периоде контроля, равном одному году [4,5,6].

Эффективной альтернативой традиционному методу определения активности долгоживущих радионуклидов в биосубстратах является масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) [7], основанная на измерении отношения массы иона к его заряду. Квадрупольные масс-спектрометры получили наиболее широкое распространение в различных областях элементного анализа благодаря сравнительно небольшой стоимости и высокой чувствительности. Исследуемый раствор в виде аэрозоля вводится в центральный канал плазменного факела. В плазме происходит его эффективное испарение, диссоциация большинства соединений, атомизация элементов и ионизация атомов. Образующиеся ионы выделяются из плазмы через отверстие прободотборника и, увлекаемые газодинамическим потоком, попадают в вакуумную камеру, где происходит фокусировка ионно-оптической системой и разделение по массам (m/z) с помощью квадрупольного масс-анализатора. Далее в реакционной ячейке, при необходимости, могут отсеиваться interfering ионы, а затем ионы аналита детектируются электронным умножителем.

На протяжении последних десятилетий метод ИСП-МС в сочетании с классическими способами пробоподготовки успешно применяется многими лабораториями для измерения изотопов $^{239,240}\text{Pu}$ в СКМ. Так, авторами в работе [8] достигнут предел измерения активности ^{239}Pu , равный 0,115 мБк в СКМ после предварительного концентрирования методом соосаждения плутония с фосфатом кальция и последующего выделения аналита методом экстракционной хроматографии на смоле TRU. В качестве методов ввода проб в масс-спектрометр применяли электротермическое испарение и ультразвуковой распылитель. В работах [9, 10] сообщается о пределе измерений ^{239}Pu , равном 0,3 мБк в 1 л мочи при способе пробоподготовки, идентичном предыдущему исследованию, и 0,015 мБк ^{238}U в 1 л мочи без предварительного концентрирования на смоле. Результаты исследований [11] показали, что ИСП-МС обеспечивает определение активности ^{239}Pu в 200 г синтетической мочи на уровне 1,6 мБк (с расширенной неопределенностью $\pm 35\%$), что соответствует активности 8 мБк в 1 л мочи.

В настоящее время перспективным направлением в области радиационной защиты является разработка быстрых и эффективных способов оценки поступления актинидов в организм, что особенно актуально при остром ингаляционном или раневом поступлении. Так, авторы [12] разработали экспресс-метод определения изотопов плутония (^{239}Pu и ^{240}Pu) в 1 л мочи с использованием тандемной квадрупольной ИСП-МС в сочетании с высокоэффективной системой ввода пробы (APEX- Ω). Пробоподготовка с использованием анионита AG-MP1 и TEVA занимает 8 ч. Пределы измерений для метода оцениваются в 1,9 мБк для ^{239}Pu , 1,2 мБк для ^{240}Pu в 1 л мочи. Авторы [13] разработали ускоренный способ определения изотопов плутония в аликвоте мочи 20 мл. Пределы измерений составили 0,057 мБк/мл для ^{239}Pu , 0,034 мБк/мл для ^{240}Pu и 0,046 мБк/мл для ^{241}Pu

соответственно. Таким образом, в большинстве работ авторы исследуют либо синтетическую, либо фоновую мочу с введенной меткой; крайне мало публикаций относится к персоналу радиационно опасных производств. Многие авторы анализируют аликвоту мочи, а не все суточное количество, что потенциально уменьшает пределы измерений радионуклидов. Нами не найдены ни зарубежные, ни отечественные статьи, касающиеся ИДК персонала, работающего с труднорастворимыми соединениями плутония.

Основными преимуществами использования метода ИСП-МС являются: 1) низкий предел измерений; 2) определение изотопного состава; 3) увеличение скорости аналитических процессов. Указанные достоинства ИСП-МС метода послужили основанием для разработки и внедрения метода масс-спектрометрии с применением квадрупольного ИСП-МС в ФГБУН ЮУриБФ при проведении биофизического обследования персонала ФГУП «ПО «Маяк» [14].

Целью данной работы является проверка применимости разработанной «Методики измерений активности изотопов плутония-239,240 и изотопов урана-235,238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой»² для задач индивидуального дозиметрического контроля. В задачи исследования входило сравнение результатов параллельных измерений проб мочи персонала «ПО «Маяк», работающего преимущественно с труднорастворимыми соединениями плутония, выполненными методами альфа-спектрометрии и ИСП-МС.

В ходе измерений на масс-спектрометре из 5 мл раствора отбирается около 1 мл и, соответственно, остается около 80% раствора с аналитом. Для сравнения измерений одних и тех же проб двумя методами остаток этого раствора после измерения на ИСП-МС электролитически осаждают на стальную подложку и измеряют с использованием альфа-спектрометра в течение 2,5 дней. Такой подход позволяет с наименьшими потерями провести измерение двумя методами. В работе [15] описан другой подход, где сначала измеряли подложку на альфа-спектрометре, а затем смыв с этой подложки анализировали с помощью ИСП-МС. На наш взгляд, такой подход может увеличить потери, т.к. правильность и полнота выполнения электролиза сильно влияет на химический выход. Для сравнения двух методов выбрали персонал, работающий преимущественно с труднорастворимыми соединениями, в составе которых присутствует ^{239}Pu незначительно, т.к. этот изотоп не измеряется методом ИСП-МС. Выбор данной категории персонала позволит консервативно оценить применимость разработанной методики при выполнении текущего ИДК персонала предприятий ядерно-топливного цикла.

Материалы и методы

Радиохимическая пробоподготовка

Схема пробоподготовки представлена на рисунке 1. В СКМ добавляли концентрированную HNO_3 и H_2O_2 из расчета 10 мл на 1 л мочи, вводили метку ^{242}Pu активностью 11 мБк. Нагревали пробу на плите и кипятили в течение 30 мин. Плутоний выделяли из мочи методом аммиачного соосаждения с фосфатами кальция и магния. Для этого при

² Методика измерений активности изотопов плутония-239,240 и изотопов урана-235, 238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Свидетельство об аттестации МИ № СР-21-3-РА.RU.311952-2021. Озерск, 2021. 38 с. [Measurement technique for plutonium-239, 240 and uranium-235, 238 isotopes in biological samples using mass spectrometry with inductively coupled plasma. Certificate of attestation No. СР-21-3-РА.RU.311952-2021. Ozersk, 2021. 38 p. (in Russ)]

постоянном помешивании по каплям добавляли концентрированный раствор аммиака до начала выпадения осадка (pH 8–9), который затем отделяли центрифугированием. Полученный осадок озоляли смесью 3 мл концентрированной HNO_3 и 1 мл H_2O_2 до полного разложения органической матрицы, после чего при нагревании растворяли в 85 мл 9 М HCl с добавлением 100 мг NaNO_2 для стабилизации плутония в четырехвалентном состоянии. Затем раствор пропускали через колонки со смолой AG1-X4 для отделения плутония от мешающих примесей (уменьшения влияния матрицы, отделения от урана). Разделение на смоле включало в себя следующие этапы: насыщение смолы 60 мл 9 М HCl ; перевод раствора пробы в 9 М HCl в колонку и

сорбцию плутония на смоле; промывку смолы раствором 85 мл 9 М HCl , затем раствором 120 мл 8 М HNO_3 ; десорбцию фракции, содержащей плутоний, в чистый химический стакан с использованием 85 мл раствора 1,2 М HCl с добавлением 20 мг $\text{NH}_2\text{OH HCl}$. Элюат выпаривали, избегая пересушивания осадка, озоляли смесью 1 мл концентрированной HNO_3 и 1–2 капли H_2O_2 , выпаривали. Полученный раствор переводили в пластиковую вials с помощью 5 мл раствора HNO_3 с массовой концентрацией 5% и выполняли измерения активности плутония на масс-спектрометре Agilent 8800 Triple Quad. Остаток раствора после анализа электролитически осаждали на стальную подложку и выполняли измерения на альфа-спектрометре Ortec Octete PC.

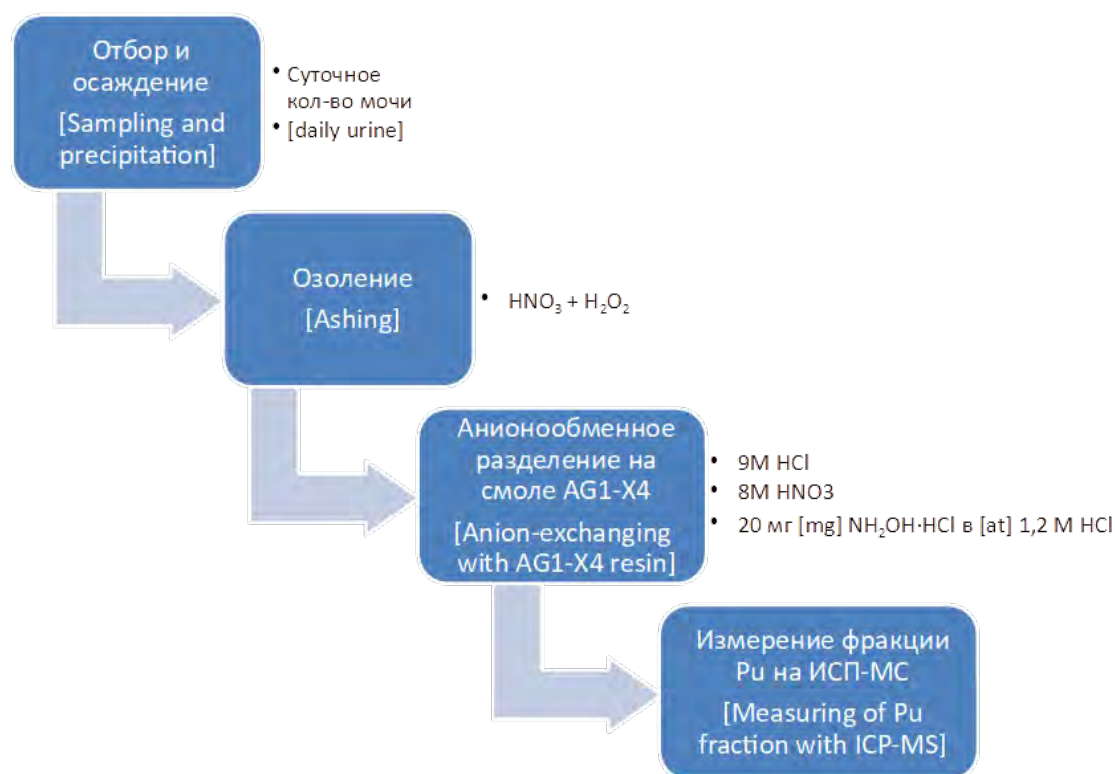


Рис. 1. Схема пробоподготовки суточного количества мочи
[Fig. 1. Scheme of daily urine sample preparation]

Результаты и обсуждение

Сравнение результатов параллельных измерений проб методами ИСП-МС и альфа-спектрометрии

Было проведено 88 параллельных измерений двумя методами проб мочи персонала, работающего преимущественно с труднорастворимыми соединениями плутония. Несколько проб с высокими уровнями содержания плутония с приблизительно известной активностью плутония были намеренно отобраны из архива проб мочи для сравнения результатов измерений при разных уровнях. Результаты измерений 16 проб оказались ниже пределов измерений обоих методов измерений. Остальные полученные

данные приведены на рисунке 2 в логарифмической шкале, показана неопределенность, рассчитанная согласно используемым методикам измерения.

Данные, представленные на рисунке 2, свидетельствуют, что все результаты измерений, выше НПИ альфа-спектрометрии (0,5 мБк), попадают в 95% доверительный интервал обеих методик измерений, а некоторые пробы из диапазона меньшего НПИ альфа-спектрометрии выходят за границы доверительного интервала метода ИСП-МС. Для шести проб с активностью выше 0,1 мБк/СКМ (ИСП-МС) результаты измерений альфа-спектрометрии оказались меньше нуля (после вычета фона), поэтому они не представлены на логарифмическом графике.

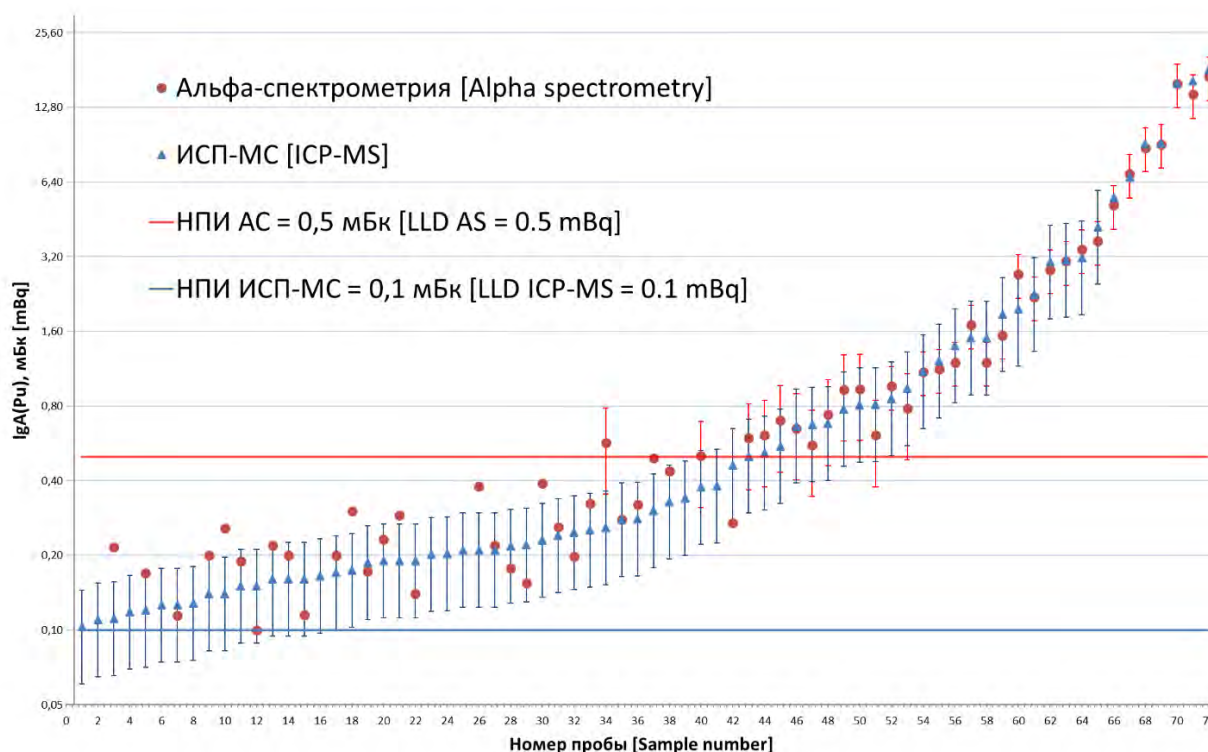


Рис. 2. Сравнение результатов параллельных измерений плутония в пробах персонала различными методами в логарифмической шкале (с 95% доверительным интервалом – расширенной неопределенностью результата измерения)

[Fig.2. Comparison of results of the parallel measurements of plutonium in the workers' samples by different methods on a logarithmic scale (with a 95% confidence interval – expanded uncertainty of a measurement result)]

Был проведен корреляционный анализ Пирсона результатов, полученных двумя методами [16]. При активности плутония ниже НПИ альфа-спектрометрии полученный коэффициент корреляции равен 0,391, при активности плутония выше НПИ альфа-спектрометрии полученный коэффициент корреляции равен 0,997, что свидетельствует о тес-

ной линейной связи результатов измерений при активности, больше 0,5 мБк в пробе.

Результаты парного теста Стьюдента, выполненного для различных выборок из результатов измерений (все результаты, результаты выше 0,5 мБк, результаты ниже 0,5 мБк), представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты парного теста Стьюдента

[Table 1

Results of the paired Student's t-test]

Все результаты [All results]	Результаты от 0,1 до 0,5 мБк [Results from 0.1 to 0.5 mBq]	Результаты от 0,5 и выше [Results from 0.5 and above]
t = 1,5236, df = 71, p-value = 0,1320	t = 0,3041, df = 41, p-value = 0,7626	t = 1,5231, df = 29, p-value = 0,1386
95% доверительный интервал [95% confidence interval]		
-0,1304 ÷ 0,0174	-0,0488 ÷ 0,0360	-0,2966 ÷ 0,0434
Разность между средними [Difference between means]		
0,0565	0,0064	0,1266

Согласно результатам парного теста Стьюдента, значения измерений, выполненных методами ИСП-МС и альфа-спектрометрии, статистически значимо в среднем не различаются ни для данных, меньших НПИ альфа-спектрометрии

(p = 0,76), ни для данных, больших НПИ альфа-спектрометрии (p = 0,14), ни для всего набора результатов (p = 0,13).

Был проведен ортогональный регрессионный анализ, представленный на рисунке 3.

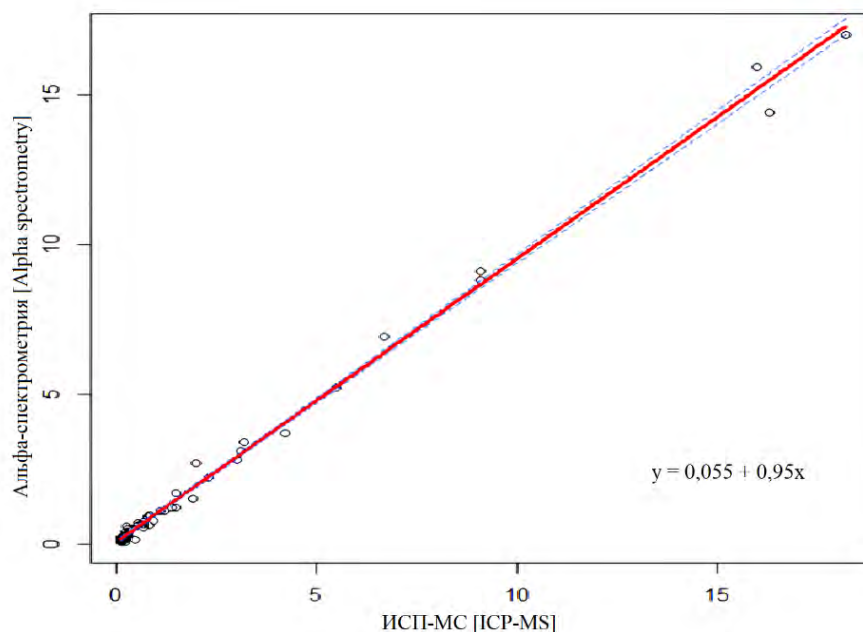


Рис. 3. Ортогональный регрессионный анализ полученных результатов
[Fig.3. Orthogonal regression analysis of the obtained results]

Анализ показал, что отсечка полученной прямой по оси y статистически значимо не отличается от нуля (границы 95% доверительного интервала: от $-0,01$ до $+0,12$), в то время, как наклон прямой статистически значимо отличается от единицы (границы доверительного интервала: от $0,93$ до $0,96$). Этот факт может свидетельствовать о наличии статистически значимого систематического смещения (5%). Оно может быть вызвано занижением результатов альфа-спектрометрии (необходимо вычитать меньший фон) или завышением результатов масс-спектрометрии (необходимо вычитать больший фон), или двумя этими факторами в совокупности. Следует учесть, что данное смещение существенно меньше 95% доверительного интервала – расширенной неопределенности результатов измерений обоих методов.

Заключение

Разработана и апробирована методика измерений плутония в биосубстратах с использованием масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Благодаря этой методике нижний предел измерения плутония уменьшен на порядок по сравнению с другими используемыми методами, что позволит осуществлять индивидуальный дозиметрический контроль персонала, работающего с труднорастворимыми соединениями плутония, с рекомендуемыми интервалами между измерениями.

Применение метода ИСП-МС сокращает время измерения проб с 5 дней до 5 минут; следовательно, этот метод следует развивать в направлении экспресс-оценки в случаях нештатных поступлений (анализ аликвот крови и мочи). К недостаткам метода можно отнести невозможность измерений ^{238}Pu [1], который также может поступать в организм персонала некоторых радиационно опасных производств, из-за интерференции с природным ураном, присутствующим повсеместно.

Проведенный статистический анализ сравнения активности проб суточной мочи, измеренной двумя методами, показал отсутствие статистически значимых различий между полученными результатами. Некоторые результаты ниже НПИ альфа-спектрометрического метода не попадали в доверительный интервал результатов метода ИСП-МС; также некоторые результаты, выше НПИ ИСП-МС, на альфа-спектрометре показали значения ниже нуля, что свидетельствует о лучшей применимости метода масс-спектрометрии при анализе результатов от $0,1$ до $0,5$ мБк/СКМ. Это может быть использовано при анализе распределения дозовой нагрузки для определенных категорий персонала, а также для ретроспективной дозиметрии.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Баталов В.Р. проанализировал данные, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант в редакцию журнала.

Ишунина М.В. выполнила анализ литературных данных, отредактировала промежуточный вариант статьи.

Ефимов А.В. выполнил анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант статьи.

Соколова А.Б. отредактировала промежуточный вариант статьи.

Благодарности

Авторы благодарят рецензентов за тщательный анализ статьи.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках в рамках Государственного контракта № 11.306.22.2 от 18.07.2022 по теме «Решение актуальных вопросов внутренней дозиметрии персонала и населения» (шифр «Радиометрия-22») в рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 г. - 2020 г. и на период до 2030 года».

Литература

1. Baglan N., Cossonnet C., Pitet P. et al. On the Use of ICP-MS for Measuring Plutonium in Urine // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2000, Vol. 243, № 2. P. 397–401.
2. Bé M.-M., Chiste V., Dulieu C. et al. Table of Radionuclides. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures, 2008. Vol. 4. P. 133–252.
3. Bé M.-M., Chiste V., Dulieu C. et al. Table of Radionuclides. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures, 2004. Vol. 2. P. 151–242.
4. Ephimov A.V., Batalov V.R. Applying of ICP-MS for Individual Dosimetric Control of Plutonium Intake. Health Physics Society, 64th Annual Meeting Abstracts, 2019. P. 35.
5. Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б. Анализ соответствия действующей системы индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, актуальным рекомендациям МКРЗ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 50–57.
6. Баталов В.Р., Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б. Оценка применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для задач специального индивидуального дозиметрического контроля // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 77–87.
7. Becker J.S. Mass spectrometry of long-lived radionuclides // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2003. Vol. 58, № 10. P. 1757–1784.
8. Wyse E., Fisher D.R. Radionuclide Bioassay by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP/MS) // Radiation Protection Dosimetry. 1994. Vol. 55. P. 199–206.
9. Kuwabara J., Noguchi H. Development of rapid bioassay method for plutonium // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2002. Vol. 252, № 2. P. 273–276.
10. Kuwabara J., Noguchi H. Development of Rapid Urine Analysis Method for Uranium. 2000. P. 4.
11. McCurdy D. Intercomparison study of inductively coupled plasma mass spectrometry, thermal ionization mass spectrometry and fission track analysis of μBq quantities of ^{239}Pu in synthetic urine // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2001. Vol. 249, № 1. P. 121–131.
12. Wu Y., Xu Y., Xing. S. et al. Rapid determination of ultra-trace plutonium in large volume of urine samples by tandem quadrupole inductively coupled plasma-mass spectrometry // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2021. Vol. 184. P. 106259.
13. Yang G., Zheng J., Kim E. et al. Rapid analysis of ^{237}Np and Pu isotopes in small volume urine by SF-ICP-MS and ICP-MS/MS // Analytica Chimica Acta. 2021. Vol. 1158. P. 338431.
14. Ефимов А.В., Соколова А.Б., Суслова К.Г. Основные итоги научно-практической деятельности Южно-Уральского института биофизики в области радиационной безопасности // Вопросы радиационной безопасности. 2023. № 3. С. 4–15.
15. Hernández-Mendoza H., Chamizo E., Delgado A. et al. Comparison of methods and application of alpha spectrometry and mass spectrometry techniques for ^{239}Pu determination in biological samples // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. The Royal Society of Chemistry. 2011. Vol. 26, № 7. P. 1509–1513.
16. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с. ISBN 5-9221-0707-0

Поступила: 24.05.2024

Баталов Вадим Робертович – инженер-физик лаборатории ядерно-физических методов анализа центральной заводской лаборатории Производственного объединения «Маяк». Адрес для переписки: 456784, Россия, Челябинская область, г. Озерск, ул. Ленина, д. 31; E-mail: vrbatalov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8807-9494

Ишунина Мария Владимировна – начальник группы радиохимического анализа Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0002-0737-4131

Ефимов Александр Владимирович – заведующий отделом радиационной безопасности и дозиметрии Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0003-1110-6559

Соколова Александра Борисовна – кандидат биологических наук, научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

ORCID: 0000-0002-6036-4178

Для цитирования: Баталов В.Р., Ишунина М.В., Ефимов А.В., Соколова А.Б. Сравнительный анализ методов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и альфа-спектрометрии для измерения активности плутония в биосубстратах // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 88–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-88-95

Comparative analysis of inductively coupled plasma mass spectrometry and alpha spectrometry methods to measure plutonium activity in biosubstrates

Vadim R. Batalov¹, Mariya V. Ishunina², Alexander V. Efimov², Alexandra B. Sokolova²

¹ Mayak Production Association, Ozersk, Russia

² Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

Currently, the most common methods to measure the activity of transuranium elements in biological samples are alpha radiometry and alpha spectrometry. Of these, alpha spectrometry is the most sensitive and selective method. However, this method is not sufficiently sensitive to control hardly soluble compounds of plutonium in the human body. For example, upon an intake of hardly soluble compounds of plutonium at the level of annual limit of intake, a year later, Pu in a daily urine sample is expected to be 0.4 mBq. Since the lower limit of measurement of alpha spectrometry is about 0.5 mBq, during the first 2 years as minimum, the workers who have contact with hardly soluble compounds of plutonium are not provided with a reliable monitoring of intakes. To solve this problem, a new technique of analysis was developed based on the plutonium activity measurement using the method of inductively coupled plasma mass spectrometry. This technique allows measuring plutonium by mass spectrometer in daily urine samples and blood samples after separation from interfering isotopes by anionic exchange chromatography. The method takes much less measurement time and is much more sensitive to long-lived isotopes. It enables reducing the lower limit of measurement by a factor of five compared to the alpha spectrometry method. Also, the technique for the first time allows to measure separately the activity of plutonium-239 isotopes and plutonium-240 isotopes, the energies of which are indistinguishable on alpha spectra. The plutonium activity was measured by the two methods in parallel in 88 daily urine samples collected from the personnel of the federal state unitary enterprise "Mayak Production Association" working primarily with hardly soluble compounds of plutonium. The analysis of the measurements of these samples demonstrated no statistically significant differences between the results obtained. Also, these results testify to better applicability of mass spectrometry for the activities below the lower limit of measurement of alpha spectrometry. The developed method of analysis can be applied to estimate the levels of current intake of hardly soluble compounds of plutonium, for retrospective dosimetry and as an express method to obtain the intake estimates by the plutonium activity in blood in non-routine situations.

Key words: internal dosimetry, inductively coupled plasma mass spectrometry, alpha spectrometry, plutonium.

Authors' personal contribution

Batalov V.R. analyzed data, prepared the article draft and represented the final version of the manuscript for publication in the journal.

Ishunina M.V. analyzed literature data, revised the intermediate version of the manuscript.

Efimov A.V. analyzed literature data, revised the intermediate version of the manuscript.

Sokolova A.B. revised the intermediate version of the manuscript.

Acknowledgments

The authors are grateful to the reviewers for their thorough analysis of the article.

Conflict of interests

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

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the State Contract No. 11.306.22.2 as of 18.07.2022 entitled "Solution of the topical issues of internal dosimetry of personnel and population" (code "Radiometry-22") within the implementation

of federal target program "Nuclear safety and radiation protection for 2016-2020 and for the period till 2030".

References

1. Baglan N, Cossonnet C, Pitet P, Cavadore D. On the Use of ICP-MS for Measuring Plutonium in Urine. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2000;243(2): 397–401.
2. Bé M-M, Chiste V, Dulieu C, Browne E, Chechev V, Kuzmenko N, et al. Table of Radionuclides. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures; 2008. Vol. 4. P. 133–252.
3. Bé M-M, Chiste V, Dulieu C, Browne E, Chechev V, Kuzmenko N, et al. Table of Radionuclides. Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France: Bureau International des Poids et Mesures; 2004. Vol. 2. P. 151–242.
4. Efimov AV, Batalov VR. Applying of ICP-MS for Individual Dosimetric Control of Plutonium Intake. Health Physics Society, 64th Annual Meeting Abstracts; 2019. P. 35.
5. Sokolova AB, Efimov AV, Dzhunushaliev AB. Analysis of correspondence between the current individual monitoring system of internal exposure caused by plutonium intake and the relevant ICRP recommendations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 50–57 (In Russian).
6. Batalov VR, Sokolova AB, Efimov AV, Dzhunushaliev AB. Evaluation of the applicability of the inductively coupled plasma mass spectrometry method for special individual dosimetry monitoring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 77–87 (In Russian).

Vadim R. Batalov

Mayak Production Association

Address for correspondence: Lenina Str., 31, Ozersk, Russia, 456784; E-mail: vrbatalov@mail.ru

7. Becker JS. Mass spectrometry of long-lived radionuclides. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2003;58(10): 1757–1784.
8. Wyse E, Fisher DR. Radionuclide Bioassay by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP/MS). *Radiation Protection Dosimetry*. 1994;55: 199–206.
9. Kuwabara J, Noguchi H. Development of rapid bioassay method for plutonium. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2002;252(2): 273–276.
10. Kuwabara J, Noguchi H. Development of Rapid Urine Analysis Method for Uranium; 2000. P. 4.
11. McCurdy D. Intercomparison study of inductively coupled plasma mass spectrometry, thermal ionization mass spectrometry and fission track analysis of μBq quantities of ^{239}Pu in synthetic urine. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2001;249(1): 121–131.
12. Wu Y, Xing S, Dai X, Yuan N, Luo M, Xu Y. Rapid determination of ultra-trace plutonium in large volume of urine samples by tandem quadrupole inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2021;184: 106259.
13. Yang G, Zheng J, Kim E, Zhang Sh, Seno H, Kowatari M, et al. Rapid analysis of ^{237}Np and Pu isotopes in small volume urine by SF-ICP-MS and ICP-MS/MS. *Analytica Chimica Acta*. 2021;1158: 338431.
14. Efimov AV, Sokolova AB, Suslova KG. Main results of scientific and practical activities of Southern Ural Biophysics Institute in the field of radiation safety. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2023;3: 4–15 (In Russian).
15. Hernández-Mendoza H, Chamizo E, Delgado A, García-León M. Comparison of methods and application of alpha spectrometry and mass spectrometry techniques for ^{239}Pu determination in biological samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry. The Royal Society of Chemistry*. 2011;26(7): 1509–1513.
16. Kobzar AI. Applied mathematical statistics. For engineers and researchers. Moscow: FIZMATLIT; 2006. 816 p. ISBN 5-9221-0707-0 (In Russian).

Received: May 24, 2024

For correspondence: Vadim R. Batalov – Engineer-physicist, Laboratory of nuclear-physical methods of analysis of the Central Plant Laboratory, “Mayak” Production Association (Lenina Str., 31, Ozersk, Russia, 456784; E-mail: vrbatalov@mail.ru)

ORCID: 0000-0001-8807-9494

Mariya V. Ishunina – Head of Group, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

ORCID: 0000-0002-0737-413

Alexander V. Efimov – Head of Department of Radiation Safety and Dosimetry, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

ORCID: 0000-0003-1110-6559

Alexandra B. Sokolova – Researcher, Candidate of Biological Sciences, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency of Russia, Ozersk, Russia

ORCID: 0000-0002-6036-4178

For citation: Batalov V.R., Ishunina M.V., Efimov A.V., Sokolova A.B. Comparative analysis of inductively coupled plasma mass spectrometry and alpha spectrometry methods to measure plutonium activity in biosubstrates. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 88–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-88-95

Предложения по изменению подходов к реагированию на нештатные ситуации при медицинском облучении пациентов в рамках актуализации санитарно-эпидемиологического законодательства

А.В. Водоватов^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, С.А. Рыжов^{5,6,7}, А.В. Лихачева^{1,8}, А.М. Библин¹,
Г.А. Горский^{1,9}, Н.М. Вишнякова^{1,9}

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

³ Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Ассоциация медицинских физиков России, Москва, Россия

⁶ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева, Москва, Россия

⁷ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

⁸ Городская больница №40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

⁹ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Идентификация, предотвращение и реагирование на нештатные ситуации, возникающие при медицинском облучении, являются неотъемлемой частью системы обеспечения радиационной безопасности в медицине. Существующие в Российской Федерации подходы, представленные в действующих нормативно-методических документах, нуждаются в актуализации и гармонизации с международной практикой. При этом основное внимание целесообразно уделять нештатным ситуациям, возникающим с пациентами, так как случаи потенциального переоблучения персонала и населения представлены исчерпывающе. В работе представлены предложения по изменению терминологии применительно к нештатным ситуациям при медицинском облучении пациентов и разработаны критерии выявления таких нештатных ситуаций. Определены схемы действия персонала при выявлении и реагировании на нештатные ситуации, связанные с переоблучением пациентов. Результаты работы целесообразно интегрировать в раздел по радиационной безопасности при медицинском облучении актуализированной редакции ОСПОРБ-99/2010.

Ключевые слова: радиационная авария, радиационное происшествие, медицинское облучение, пациенты, персонал.

Введение

Нештатные ситуации, связанные с реальным или потенциальным переоблучением лиц из категории персонала, пациентов и населения, неотъемлемо сопровождают использование источников ионизирующего излучения (ИИИ) в медицине. Масштаб таких нештатных ситуаций может варьировать от простого пролива жидкости, содержащей радиофармацевтический лекарственный препарат (РФЛП), приводящего к незначительному кратковременному загрязнению защитной одежды персонала, до разгерметиза-

ции высокоактивного закрытого радионуклидного источника для дистанционной гамма-терапии, приводящего к развитию острой лучевой болезни у пострадавших [1]. Нештатные ситуации, связанные с облучением пациентов (т.е. лиц, для которых пределы доз не установлены), также различны: от проведения рентгенорадиологического исследования на некорректном протоколе, вследствие которого пациент получил дополнительную дозу облучения в несколько мЗв, до ошибок в системе планирования в лучевой терапии, приведших к облучению пациентов в смертельных дозах [2–5].

Водоватов Александр Валерьевич

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

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

Описание принципов идентификации, предотвращения и реагирования на нештатные ситуации (радиационные аварии и происшествия), возникающие при медицинском облучении, является неотъемлемой частью всех международных документов, регулирующих вопросы обеспечения радиационной безопасности в медицине [6–8]. При этом данные документы регулярно обновляются для учета всех внедренных в практику новых технологий и специфики их проведения.

Существующие в Российской Федерации подходы к идентификации, предотвращению и реагированию на нештатные ситуации при медицинском облучении, отраженные в действующих нормативно-методических документах, нуждаются в переработке и актуализации [9,10]. Если нештатные ситуации, связанные с персоналом, представлены в санитарных правилах исчерпывающе [9] и в расширении не нуждаются, то проблемы потенциального переоблучения (необоснованного облучения) пациентов и населения представлены сугубо формально. Отсутствие сведений о таких ситуациях в действующих нормативно-методических документах приводит к тому, что они не идентифицируются вообще или воспринимаются как неотъемлемая часть проведения диагностических или терапевтических процедур [10]. Напротив, в зарубежной практике такие ситуации являются наиболее распространенными и именно на них, как правило, делается основной акцент.

Использование несовершенного понятийного аппарата, в частности отнесение всех нештатных ситуаций к радиационным авариям вне зависимости от вида и масштаба ситуации, также приводит к сложностям с идентификацией нештатных ситуаций и к сокрытию факта их наступления.

Таким образом, для успешного решения задач по обеспечению радиационной безопасности населения Российской Федерации необходимо внести изменения и дополнения в санитарно-эпидемиологическое законодательство. При этом наиболее важно актуализировать подходы к нештатным ситуациям применительно к переоблучению пациентов. Обоснованию таких изменений посвящена данная работа.

Предложения по разработке критериев переоблучения пациентов при медицинском облучении

Медицинское облучение относится исключительно к облучению пациентов за счет процедур лучевой диагностики и терапии и не распространяется на персонал, проводящий эти процедуры, и других лиц (население), которые могут подвергаться облучению в результате проведения таких процедур, находясь в прямой близости к рентгенодиагностическому отделению, и не имеют от этого облучения прямой выгоды (например, пациенты не рентгенодиагностического отделения медицинской организации, персонал не рентгенодиагностического отделения медицинской организации и пр.) [6–8].

В действующих нормативно-методических документах критериев переоблучения пациентов не представлено.

Для учета специфики ситуаций переоблучения пациентов в проект новой редакции Федерального закона №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» был введен термин «Непреднамеренное (аварийное) медицинское облучение». К такому облучению относятся ситуации, связанные с проведением медицинских рентгенодиагностических процедур, которые привели к медицинскому облучению пациента, существенно отличающемуся от запланированного. Данный термин позволяет исчерпывающе классифицировать все ситуации пере- и недооблучения пациентов, но при этом необходима разработка критериев отнесения к таким ситуациям. Целесообразно в первую очередь сосредоточиться на ситуациях переоблучения (избыточного облучения) пациентов, так как их намного проще выявлять и идентифицировать.

Дозовые критерии для идентификации ситуаций переоблучения пациентов для различных видов диагностических и терапевтических рентгенодиагностических процедур представлены в таблице 1. Данные критерии гармонизированы с рекомендациями международных профессиональных организаций [11–13] и учитывают традиционно присутствующие в отечественном законодательстве индикаторные показатели (например, накопленную годовую эффективную дозу пациента).

Предложения по изменению терминологии применительно к нештатным ситуациям при медицинском облучении

Как показали результаты предыдущих работ авторов [9], использование термина «радиационная авария» применительно ко всему спектру нештатных ситуаций, возникающих при медицинском облучении, является не вполне корректным по следующим причинам:

- использование данного термина является затруднительным психологически (преувеличение масштаба наступившего события, необходимость оповещать о событии органы и организации Роспотребнадзора с последующими последствиями административного характера);
- неприменимость данного термина ко всем сценариям необоснованного, избыточного, или недостаточного облучения пациентов, в том числе и ассоциированных с нанесением прямого вреда здоровью;
- ряд ситуаций, характерных для ядерной медицины, относятся к радиационному воздействию на организм пациента косвенно (например, экстравазальное введение РФЛП).

Целесообразно дополнить существующую терминологию термином «радиационное происшествие» и ввести четкое разделение применения терминов «авария» и «происшествие», основанное на оценке потенциального или прямого вреда здоровью индивидуума (табл. 2).

Критерии переоблучения пациентов при проведении диагностических и терапевтических рентгенорадиологических процедур

[Table 1]

Criteria for overexposure of patients during diagnostic and therapeutic radiology procedures]

Метод исследования [Imaging modality]	Показатель, по которому производится идентификация переоблучения [Indicator for identification of overexposure]	Индикаторный показатель [Reference indicator]	Дозовая величина [Dose quantity]	Критерий сравнения [Comparison criterion]
Радионуклидная диагностика, компьютерная томография, рентгеноскопия, интервенционные исследования, рентгенография, маммография и прочие виды рентгеновских исследований [Diagnostic nuclear medicine, computed tomography, radioscopy, interventional radiology, radiography, mammography, etc.]	Доза облучения индивидуального пациента за исследование [Individual patient dose per examination] Вводимая пациенту активность [Administered activity]	Референтный диагностический уровень (РДУ) [Diagnostic reference level (DRL)]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv] Произведение дозы на площадь (ПДП), сГр×см ² [Dose area product, cGy×cm ²] Произведение дозы на длину сканирования, мГр×см [Dose length product, mGy×cm] Поглощенная доза в молочной железе, мГр [Absorbed dose in the breast, mGy] Активность, Бк [Activity, Bq]	Непревышение дозы облучения индивидуального пациента за исследование установленного РДУ более чем в 3 раза [Individual patient dose per examination should not exceed DRL by a factor of 3]
	Доза облучения индивидуального пациента за исследование [Individual patient dose per examination] Вводимая пациенту активность [Administered activity]	Стандартная доза или активность (СД) [Standard dose or activity]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv] ПДП, сГр×см ² [Dose area product, cGy×cm ²] Произведение дозы на длину сканирования, мГр×см [Dose length product, mGy×cm] Поглощенная доза в молочной железе, мГр [Absorbed dose in the breast, mGy] Активность, Бк [Activity, Bq]	В случае отсутствия РДУ непревышение дозы облучения индивидуального пациента или введенной активности за исследование установленной стандартной дозы или активности более чем в 10 раз [In case DRL is absent, individual patient dose or administered activity per examination should not exceed standard dose or activity by a factor of 10]
Лучевая терапия, включая радионуклидную терапию [Radiation therapy including radiopharmaceutical therapy]	Поглощенная доза в органе или ткани за курс лучевой терапии [Absorbed dose in an organ or tissue per therapy course]	Толерантная доза в органе или ткани [Tolerated dose in an organ or tissue]	Поглощенная доза, мГр [Absorbed dose, mGy]	Непревышение оцененной поглощенной дозы в радиочувствительном органе или ткани соответствующей толерантной дозы [Absorbed dose in an organ or tissue should not exceed the corresponding tolerated dose]

Метод исследования [Imaging modality]	Показатель, по которому производится идентификация переоблучения [Indicator for identification of overexposure]	Индикаторный показатель [Reference indicator]	Дозовая величина [Dose quantity]	Критерий сравнения [Comparison criterion]
Интервенционные исследования [Interventional radiology]	Максимальная поглощенная доза в коже (МПДК) за исследование [Maximum absorbed dose to skin per examination]	Порог возникновения кожных поражений (эритемы) [Threshold for the occurrence of skin lesions (erythema)]	Поглощенная доза, мГр [Absorbed dose, mGy]	Непревышение МПДК у пациента 2 Гр [Maximum absorbed dose to skin per examination should not exceed 2 Gy]
	Доза облучения индивидуального пациента за исследование [Individual patient dose per examination]	Контрольные значения ПДП для предотвращения возникновения детерминированных эффектов в коже у пациентов ¹ [Dose area product reference values to prevent the deterministic effects in the patient skin]	ПДП, сГр×см ² [Dose area product, cGy×cm ²]	Непревышение ПДП за исследование установленных контрольных значений ПДП ¹ [Dose area product per examination should not exceed established DAP reference values]
Все виды лучевой диагностики [All imaging modalities]	Поглощенная доза в плоде или эмбрионе (матке) [Absorbed dose in the fetus or embryo (uterus)]	Порог развития детерминированных эффектов в плоде [Threshold for the deterministic effects in the foetus]	Поглощенная доза, мГр [Absorbed dose, mGy]	Непревышение поглощенной дозы в плоде (матке) 500 (100) мГр* [Absorbed dose in the embryo (uterus)] should not exceed 500 (100) mGy*]
	Годовая эффективная доза у пациента за счет диагностических рентгенорадиологических процедур [Annual effective dose]	Годовая эффективная доза [Annual effective dose, mSv]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, mSv]	Непревышение годовой эффективной дозы 200 мЗв (СанПиН 2.6.1.1192-03) [Annual effective dose must not exceed 200 mSv]

* Для беременных женщин, проходящих рентгенорадиологические процедуры, вне зависимости от наличия информации о беременности до проведения процедуры [* For pregnant women undergoing radiology procedures, regardless of whether pregnancy information is available before the procedure].

¹ МР 2.6.1.0097–15 Оптимизация радиационной защиты пациентов в интервенционной радиологии. [Guidelines 2.6.1.0097–15 Optimization of radiation protection for patients in interventional radiology. (In Russ.)]

**Примеры критериев отнесения нештатных ситуаций при медицинском облучении
к радиационным авариям или происшествиям**

[Table 2]

Examples of criteria for classifying events in medical exposure as radiation accidents or incidents

Радиационная авария [Radiation accident]	Радиационное происшествие [Radiation incident]
Общие критерии для медицинского облучения [Common criteria for medical exposure]	
Облучение пациента в дозе, приведшей к развитию незапланированных детерминированных эффектов [Radiation exposure of a patient that led to unplanned deterministic effects]	Облучение пациента, которое привело к существенному увеличению риска развития стохастических эффектов (переход в следующую категорию радиационного риска) ² [Radiation exposure of a patient that led to a significant increase in the risk of stochastic effects (transition to the next category of radiation risk)]
Причинение прямого ущерба здоровью при проведении диагностических или терапевтических рентгенорадиологических процедур [Direct injuries during diagnostic or therapeutic radiological procedures]	Все ситуации, при которых произошло пере- и недооблучение пациентов, потребовавшее повторного проведения исследования* [All situations of over- and under-exposure of patients that required to repeat examination*]
Незапланированное облучение беременных женщин в дозе, превышающей 500 мГр ³ поглощенной дозы в плоде/эмбрионе [Unplanned radiation exposure of pregnant women with absorbed dose to the foetus/embryo exceeding 500 mGy]	Незапланированное облучение беременных женщин в дозе, превышающей 100 мГр ^{3,4} поглощенной дозы в плоде/эмбрионе [Unplanned radiation exposure of pregnant women absorbed dose to the foetus/embryo exceeding 100 mGy ^{3,4}]
Специфические критерии для процедур ядерной медицины [Specific criteria for nuclear medicine procedures]	
Ошибочное введение иного РФЛП или некачественного в высокой дозировке (активности), которое привело к развитию детерминированных эффектов [Wrong administration of other or low-quality radiopharmaceutical with high dose (activity) that led to deterministic effects]	Ошибочное введение иного РФЛП, нежели планировалось, или в иной дозировке (активности), введение некачественного РФЛП, не приведшее к развитию поражения тканей, а также ошибки во время проведения диагностического исследования (ошибочный протокол сканирования, неисправности оборудования, и пр.), приведшие к необходимости проведения повторного исследования [Wrong administration of other radiopharmaceutical or other dose (activity), or low-quality radiopharmaceutical as well as pitfalls during the diagnostic examination that did not lead to the tissue lesions (use of wrong scanning protocol, equipment malfunction, etc.) that led to repeat examination]
Экстравазальное введение терапевтического РФЛП, повлекшее развитие некроза тканей [Extravasal administration of therapeutic radiopharmaceutical that led to the tissue necrosis]	Экстравазальное введение диагностического или терапевтического РФЛП, не приведшее к развитию поражения тканей [Extravasal administration of diagnostic or therapeutic radiopharmaceutical that did not lead to the tissue lesions]
Облучение пациента от разлива РФЛП с высокой активностью радионуклида в нем, включая загрязнение им одежды и (или) кожных покровов, или попадание радионуклида внутрь организма, повлекшее развитие детерминированных эффектов [Radiation exposure of patient from spilled radiopharmaceutical with high activity of radionuclide, including contamination of clothes and (or) skin, or ingestion of radionuclide into the body that led to deterministic effects]	Облучение пациента от разлива РФЛП с высокой активностью радионуклида в нем, включая загрязнение им одежды и (или) кожных покровов, или попадание радионуклида внутрь, не приведшее к развитию поражения тканей [Radiation exposure of patient from spilled radiopharmaceutical with high activity of radionuclide, including contamination of clothes and (or) skin, or ingestion of radionuclide into the body that did not lead to deterministic effects]

* В том числе проведение исследований без надлежащего обоснования, необходимость проведения повторного исследования из-за выхода из строя оборудования или использования некачественного РФЛП, использование некорректных протоколов и пр. [* Including unjustified examinations, the need to repeat examination due to equipment failure or use of low-quality examination, the use of wrong protocols, etc.]

² МР 2.6.1.0215-20 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21 сентября 2020 г.) [Guidelines 2.6.1.0215-20 Assessment of radiation risk in patients during X-ray examinations". (In Russ.)]

³ Radiation and Pregnancy: Information for Clinicians. URL: <https://www.cdc.gov/radiation-emergencies/hcp/clinical-guidance/pregnancy.html> (Дата обращения: 31.10.2024)

⁴ СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [Sanitary Regulations and Standards "Hygienic requirements for the design and operation of X-ray machines and the conduct of X-ray examinations. SanPiN 2.6.1.1192-03". (In Russ.)]

При возникновении нештатной ситуации, классифицируемой как радиационная авария, следует придерживаться порядка реагирования, установленного действующими нормативно-методическими документами (т.е. с обязательным информированием органов и организаций Роспотребнадзора^{5,6}). При возникновении нештатной ситуации, отнесенной к радиационным происшествиям, реагирование на такую ситуацию осуществляется внутри медицинской организации в соответствии с внутренними инструкциями (регламентами) медицинской организации, входящими в программу производственного радиационного контроля.

В связи с отсутствием в действующих нормативно-методических документах Роспотребнадзора термина «радиационное происшествие» целесообразно использовать формулировку, предложенную в Федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии НП-014-16⁷. Представленные в таблице 2 критерии отнесения нештатных ситуаций для персонала и населения к радиационным происшествиям разработаны с учетом НП-014-16.

Действия по идентификации и реагированию на различные нештатные ситуации при медицинском облучении

Последовательность действий, необходимых для идентификации случаев переоблучения пациентов, представлена на рисунке 1.

Дискуссионным является вопрос об отнесении ситуаций, при которых у пациента развиваются детерминированные эффекты, к радиационным авариям и/или происшествиям. В ряде случаев (например, при проведении интервенционных исследований или терапевтических процедур) детерминированные эффекты будут неизбежно возникать как побочный эффект облучения пациента в высоких дозах. Относить все такие случаи к нештатным ситуациям нецелесообразно за исключением:

- возникновения детерминированных эффектов при проведении диагностических процедур (кроме интервенционных исследований), т.е. в тех случаях, когда характер облучения пациентов не предусматривает их развития. Примером таких ситуаций могут служить многократно описанные в зарубежной литературе случаи возникновения алопеции у детей, проходивших КТ-перфузию головного мозга;
- возникновения детерминированных эффектов, которые не были запланированы при планировании облучения пациента (например, за счет превышения толерантной дозы в органе или ткани при ошибках в планировании лучевой или радионуклидной терапии);

- развития детерминированных эффектов при экстравазации РФЛП.

Следует отметить, что в ряде случаев развитие детерминированных эффектов (например, кожных поражений) может происходить с задержкой, т.е. поражения будут выявлены уже после выписки пациента из стационара.

Также следует отдельно выделять нештатные ситуации, не связанные непосредственно с облучением пациентов, но возникающие при проведении диагностических и терапевтических рентгенорадиологических процедур, и неотъемлемо сопровождающие медицинское облучение. К таким ситуациям относятся:

- развитие аллергических реакций на введение контрастных препаратов и/или РФЛП;
- нарушение функции внутренних органов (почек) за счет введения контрастных препаратов.

Данные ситуации должны своевременно идентифицироваться и относиться к нерадиационным авариям/происшествиям в зависимости от степени и характера последствий для здоровья пациентов.

Последовательность действий при наступлении нештатной ситуации представлена на рисунке 2.

Ключевым элементом действий при реагировании на нештатные ситуации при медицинском облучении является не само выявление радиационной аварии или происшествия, а определение причин их возникновения и разработка комплекса мер по предотвращению развития подобных ситуаций впредь (или по снижению негативного эффекта при их наступлении). Основной акцент по выявлению и предотвращению развития нештатных ситуаций должен быть смещен на повышение квалификации и культуры радиационной безопасности медицинского персонала, проводящего диагностические и терапевтические рентгенорадиологические исследования. Это было учтено в проекте новой редакции Федерального закона №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения»: ответственность за выявление и профилактику случаев непреднамеренного (аварийного) медицинского облучения предложено возложить на федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по выработке и реализации государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере здравоохранения (т.е. на Министерство здравоохранения).

⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.02.2016 г. No 11 «О представлении внеочередных донесений о чрезвычайных ситуациях санитарно-эпидемиологического характера» [Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 04.02.2016 No. 11 "On submission of reports on emergencies of sanitary and epidemiological nature". (In Russ.)]

⁶ Приказ Роспотребнадзора от 23.12.2013 г. No 968 «О совершенствовании реагирования в случае возникновения радиационной аварии» [Order of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being of 23.12.2013 No. 968 "On Improving Response in the Event of a Radiation Accident". (In Russ.)]

⁷ Приказ Ростехнадзора от 15.02.2016 N 49 «Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила расследования и учета нарушений при эксплуатации и выводе из эксплуатации радиационных источников, пунктов хранения радиоактивных веществ и радиоактивных отходов и обращении с радиоактивными веществами и радиоактивными отходами» (вместе с «НП-014-16. Федеральные нормы и правила...») (Зарегистрировано в Минюсте России 04.05.2016 N 41970) [Rostechnadzor Order of 15.02.2016 N 49 "On approval of federal norms and rules in the field of atomic energy use "Rules for investigation and registration of violations during operation and decommissioning of radiation sources, storage facilities for radioactive materials and radioactive waste and management of radioactive materials and radioactive waste" (With "NP-014-16. Federal norms and rules...") (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 04.05.2016 N 41970) (In Russ.)]

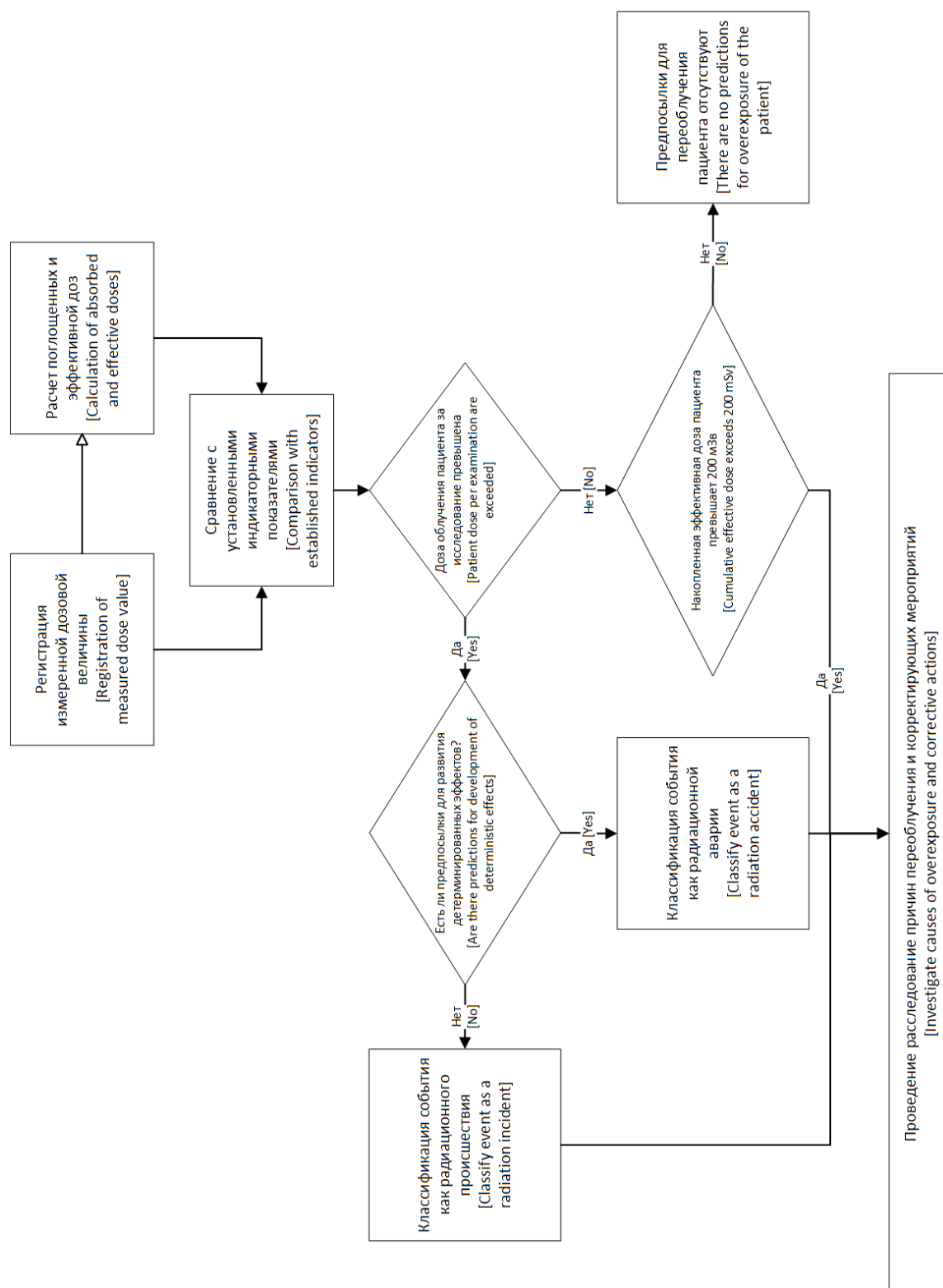


Рис. 1. Схема определения случаев потенциального переоблучения пациентов
[Fig. 1. A scheme for identifying cases of potential overexposure of patients]

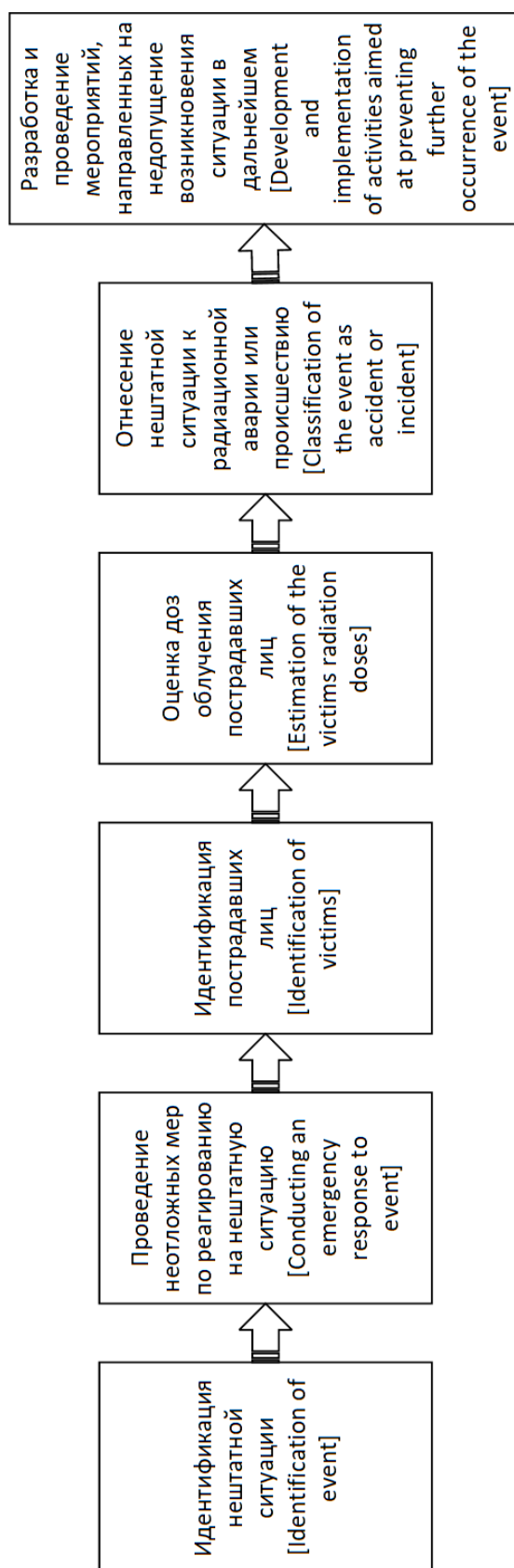


Рис. 2. Последовательность действий при наступлении штатной ситуации при медицинском облучении
[Fig. 2. Sequence of actions during the event of a medical exposure]

Заключение

Совершенствование подходов к идентификации нештатных (аварийных) ситуаций при медицинском облучении является чрезвычайно актуальной задачей обеспечения радиационной безопасности персонала, пациентов и населения. Своевременная идентификация нештатных ситуаций позволит существенно улучшить качество оказания медицинской помощи населению за счет профилактики их возникновения и за счет снижения степени тяжести их последствий при адекватном реагировании.

Приоритетным направлением в рамках реагирования на нештатные ситуации при медицинском облучении является своевременная идентификация случаев переоблучения пациентов. Действующая система обязательных требований достаточно полно покрывает все ситуации, связанные с переоблучением персонала и населения; в то же время критерии переоблучения пациентов отсутствуют. На текущем этапе целесообразно сосредоточиться именно на переоблучении пациентов. Недостаточное облучение пациентов предельно сложно отследить, и негативные эффекты недостаточного облучения будут проявляться исключительно при проведении процедур лучевой терапии [11].

Предложенные в настоящей работе набор критериев переоблучения пациентов гармонизирован с международными подходами и покрывает практически все возможные нештатные ситуации. Данные критерии интегрированы в систему оптимизации радиационной защиты пациентов; они основаны на легко определяемых показателях (СД и РДУ).

Идентификация случаев переоблучения пациентов требует наличия реально действующей системы регистрации, контроля и учета доз облучения индивидуальных пациентов. Широко распространенная практика использования типичных (средних) эффективных доз, приписываемых каждому пациенту вне зависимости от особенностей проведения рентгенорадиологической процедуры, в данном случае неприменима. Следует отметить, что при проведении всех современных высокодозовых исследований, при которых действительно могут возникать случаи переоблучения пациентов (компьютерной томографии, интервенционных и рентгеноскопических исследований, процедур ядерной медицины) регистрация и оценка измеренных дозовых величин у пациентов, как правило, ведется автоматически с использованием программного обеспечения рентгеновских аппаратов и компьютерных томографов.

Представленные в настоящей работе подходы к нештатным ситуациям, возникающим при диагностическом или терапевтическом облучении пациентов целесообразно использовать при переработке раздела IV «Радиационная безопасность при медицинском облучении» ОСПОРБ-99/2010 в рамках актуализации нормативно-методических документов Роспотребнадзора. Это позволит обеспечить единый подход к идентификации и реагированию на нештатные ситуации для всех видов лучевой диагностики и терапии и ядерной медицины.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Водоватов А.В. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, написание текста.

Чипига Л.А. – поиск и анализ литературы, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста статьи.

Рыжов С.А. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Лихачева А.В. – поиск и анализ литературы, описание материалов и методов, перевод.

Библин А.М. – анализ результатов.

Горский Г.А. – разработка дизайна исследования, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора «Разработка и научное обоснование комплекса мер по обеспечению радиационной защиты в ядерной медицине».

Литература

1. Ricks R., Berger M., Holloway E. et al. REAC/TS Radiation Accident Registry: Update of Accidents in the United States. URL: <https://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00325.pdf> (Дата обращения: 31.10.2024).
2. Yeung T.K., Bortolotto K., Cosby S. et al. Quality assurance in radiotherapy: evaluation of errors and incidents recorded over a 10 year period // Radiotherapy and Oncology. 2005. Vol. 74, No 3. P. 283–291. DOI: 10.1016/j.radonc.2004.12.003.
3. IAEA: Investigation of an accidental exposure of radiotherapy patients in Panama, 2001.
4. Mayles W.P. The Glasgow incident--a physicist's reflections // Clinical Oncology. 2007. Vol. 19, No 1. P. 4–7. DOI: 10.1016/j.clon.2006.12.003.
5. Ash D. Lessons from Epinal // Clinical Oncology. 2007. Vol. 19, No 8. P. 614–615. DOI: 10.1016/j.clon.2007.06.011.
6. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna, 2014. 518 p.
7. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna, 2018. 340 p.
8. ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Russian translation under M. Balonov. Saint Petersburg: NIIRG, 2011. 66 p. (In Russian).
9. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А. и др. Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 97–110. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.
10. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А. и др. Анализ распространенности аварийных ситуаций в ядерной медицине в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 93–102. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-93-102.

11. European Society of Radiology (ESR). How to manage accidental and unintended exposure in radiology: an ESR white paper. *Insights Imaging*. 2019. Vol. 10, No 1. P. 23. DOI: 10.1186/s13244-019-0691-0.
12. Martin C.J., Vassileva J., VaNo E. et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention // *Journal of Radiological Protection*. 2017. Vol. 37, No 4. P. 883–906. DOI: 10.1088/1361-6498/aa881e.
13. Jaschke W., Bartal G., Martin C.J., VaNo E. Unintended and Accidental Exposures, Significant Dose Events and Trigger Levels in Interventional Radiology // *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2020. Vol. 43, No 8. P. 1114–1121. DOI: 10.1007/s00270-020-02517-2.
14. Ash D., Bates T. Report on the clinical effects of inadvertent radiation underdosage in 1045 patients // *Clinical Oncology*. 1994. Vol. 6, No 4. P. 214–226. DOI: 10.1016/s0936-6555(05)80290-0.

Поступила: 01.10.2024

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

ORCID: 0000-0002-5191-7535

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

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Рыжов Сергей Анатольевич – вице-президент Ассоциации медицинских физиков России; начальник отдела радиационной безопасности и медицинской физики Национального медицинского исследовательского центра детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева; научный сотрудник Научно-практического клинического центра диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-0640-7368

Лихачева Анастасия Валерьевна – младший 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; инженер по радиационной безопасности СПб ГБУЗ «Городская больница №40», Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-2663-9091

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

Горский Григорий Анатольевич – кандидат медицинских наук, заместитель директора по инновационной работе Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева; доцент кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Вишнякова Надежда Михайловна – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе 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: Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Лихачева А.В., Библин А.М., Горский Г.А., Вишнякова Н.М. Предложения по изменению подходов к реагированию на нештатные ситуации при медицинском облучении пациентов в рамках актуализации санитарно-эпидемиологического законодательства // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 4. С. 96–107. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-96-107

Suggestions for amendments to responding approaches to events in medical exposure of patients within the updating sanitary and epidemiological legislation

Aleksandr V. Vodovатов^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Sergey A. Ryzhov^{5,6,7}, Anastasia V. Likhacheva^{1,8}, Artem M. Biblin¹, Grigory A. Gorsky^{1,9}, Nadezhda M. Vishnyakova^{1,9}

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

² Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

³ A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁴ Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁵ Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

⁶ Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

⁷ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

⁸ The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint Petersburg, Russia

⁹ I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia

Identification, prevention and response to events in medical exposure are an integral part of the radiation safety system in medicine. The existing approaches in the Russian Federation, presented in the current regulatory and methodological documents, need to be updated and harmonised with international practice. At the same time, it is advisable to focus on events related with patients, because of potential overexposure of workers and public is presented comprehensively. The study presents suggestions for amendments to terminology in medical exposure events of patients and development of classification of the events criteria as well. Schemes to identify and respond to events in medical exposure that related to overexposure of patients are defined. It is advisable to implement the results of the study into the section on radiation safety in medical exposure in the updated version of OSPORB-99/2010.

Key words: radiation accident, radiation incident, medical exposure, patients, workers.

Authors' personal contribution

Vodovатов A.V. – scientific management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, processing, and analysis of results, writing the text of the article.

Chipiga L.A. – search and analysis of literature, analysis and interpretation of the results, editing the text of the article.

Ryzhov S.A. – development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Likhacheva A.V. – search and analysis of literature, description of materials and methods, translation.

Biblin A.M. – analysis of the results.

Gorsky G.A. – development of the study design, analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Vishnyakova N.M. – analysis of the results.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being "Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine".

References

1. Ricks R, Berger M, Holloway E, Goans E. REAC/TS Radiation Accident Registry: Update of Accidents in the United States. Available from: <https://www.irpa.net/irpa10/cdrom/00325.pdf> (Accessed: 31.10.2024).
2. Yeung TK, Bortolotto K, Cosby S, Hoar M, Lederer E. Quality assurance in radiotherapy: evaluation of errors and incidents recorded over a 10 year period. *Radiotherapy and Oncology*. 2005;74(3): 283–291. DOI: 10.1016/j.radonc.2004.12.003.
3. IAEA: Investigation of an accidental exposure of radiotherapy patients in Panama; 2001.
4. Mayles WP. The Glasgow incident--a physicist's reflections. *Clinical Oncology*. 2007;19(1): 4–7. DOI: 10.1016/j.clon.2006.12.003.
5. Ash D. Lessons from Epinal. *Clinical Oncology*. 2007;19(8): 614–615. DOI: 10.1016/j.clon.2007.06.011.
6. IAEA Safety Standards Series. No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources. STI/PUB/1578. IAEA: Vienna; 2014. 518 p.
7. Radiation Protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Specific safety guide SSG-46. IAEA: Vienna; 2018. 340 p.
8. ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Russian translation under M. Balonov. Saint Petersburg: NIIRG; 2011. 66 p. (In Russian).

Aleksandr V. Vodovатов

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

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

9. Vodovatov AV, Chipiga LA, Ryzhov SA, Petryakova AV, Biblin AM, Gorsky GA. Radiation accidents in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy: comparison of Russian and international approaches to the terminology and classification. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 97–110. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.
10. Vodovatov AV, Chipiga LA, Ryzhov SA, Petryakova AV, Biblin AM, Gorsky GA, et al. Analysis of the radiation accidents prevalence in nuclear medicine in the Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 93–102. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-93-102.
11. European Society of Radiology (ESR). How to manage accidental and unintended exposure in radiology: an ESR white paper. *Insights Imaging*. 2019;10(1): 23. DOI: 10.1186/s13244-019-0691-0.
12. Martin CJ, Vassileva J, VaNo E, Mahesh M, Ebdon-Jackson S, Ng KH, et al. Unintended and accidental medical radiation exposures in radiology: guidelines on investigation and prevention. *Journal of Radiological Protection*. 2017;37(4): 883–906. DOI: 10.1088/1361-6498/aa881e.
13. Jaschke W, Bartal G, Martin CJ, VaNo E. Unintended and Accidental Exposures, Significant Dose Events and Trigger Levels in Interventional Radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*. 2020;43(8): 1114–1121. DOI: 10.1007/s00270-020-02517-2.
14. Ash D, Bates T. Report on the clinical effects of inadvertent radiation underdosage in 1045 patients. *Clinical Oncology*. 1994;6(4): 214–226. DOI: 10.1016/s0936-6555(05)80290-0.

Received: October 01, 2024

For correspondence: Aleksandr V. Vodovatov – Candidate of Biological Sciences, 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 Wellbeing; docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: vodovatoff@gmail.com)

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Larisa A. Chipiga – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 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

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Sergey A. Ryzhov – Vice President, Association of Medical Physicists in Russia; research fellow, Research and Practice Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies; Head of the radiation safety and medical physics department, Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-0640-7368

Anastasia V. Likhacheva – Acting Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; radiation safety engineer, Saint Petersburg City Hospital No. 40, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-2663-9091

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

Grigory A. Gorsky – Candidate of Medical Sciences, Deputy Director of the Innovation work, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint Petersburg, Russia

Nadezhda M. Vishnyakova – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director, 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

For citation: Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Ryzhov S.A., Likhacheva A.V., Biblin A.M., Gorsky G.A., Vishnyakova N.M. Suggestions for amendments to responding approaches to events in medical exposure of patients within the updating sanitary and epidemiological legislation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 96–107. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-96-107.

Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 2

Д.В. Кононенко, Т.А. Кормановская, А.С. Васильев, К.А. Сапрыкин

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 (в двух частях) представлен обзор новых методических рекомендаций МР 2.6.1.0333-23, утвержденных 01.12.2023 взамен методических указаний МУ 2.6.1.2838-11, определявших порядок проведения радиационного контроля жилых, общественных и производственных зданий и сооружений для их санитарно-эпидемиологической оценки по показателям радиационной безопасности в течение последних 12 лет. За этот период к документу накопилось большое количество критических замечаний, что потребовало существенной его переработки. При актуализации документа была расширена область его применения, которая теперь включает все этапы жизненного цикла зданий и сооружений: ввод в эксплуатацию; период эксплуатации; капитальный ремонт или реконструкцию; снос. Во второй части статьи рассмотрены многочисленные нововведения в части оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений, изложены причины введения тех или иных изменений. На основе результатов выполненных ранее исследований и обобщения зарубежных рекомендаций алгоритмы проведения измерений содержания радона в воздухе помещений были усовершенствованы таким образом, чтобы сбалансировать повышение достоверности оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона и увеличение необходимых для этого трудовых затрат сотрудников испытательных лабораторий. В новых методических рекомендациях введены отдельные алгоритмы обследования зданий, вводимых в эксплуатацию, и эксплуатируемых зданий с круглосуточным и некруглосуточным пребыванием людей. Получение средневзвешенного значения на основе результатов двухсезонных измерений будет представлять значительный шаг вперед в оценке реальных среднегодовых уровней содержания радона в эксплуатируемых зданиях в России. При этом случай радиационного контроля в рамках мероприятий, срок проведения которых законодательно ограничен, в новом документе рассматривается отдельно. В совокупности внесенные изменения должны положительно сказаться на качестве измерительной информации, получаемой испытательными лабораториями и лежащей в основе принимаемых органами исполнительной власти решений.

Ключевые слова: радиационный контроль, показатели радиационной безопасности, здания и сооружения, ввод в эксплуатацию, капитальный ремонт, реконструкция, снос, радон, торон, объемная активность радона, плотность потока радона, контрольно-надзорные мероприятия.

Введение

Методические рекомендации МР 2.6.1.0333-23¹ «Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и

сооружений по показателям радиационной безопасности» представляют собой третью версию методического документа по радиационному контролю зданий и сооружений, утвержденного в Российской Федерации за последние 25 лет, вслед за МУ 2.6.1.715-98², действовавших

¹ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности: Методические рекомендации МР 2.6.1.0333-23. Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 01.12.2023. [Radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Guidelines MR 2.6.1.0333-23. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 01.12.2023. (In Russ.)]

² Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий: Методические указания МУ 2.6.1.715-98. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 24.08.1998. [Conducting radiation-hygienic inspection of residential and public buildings. Guidelines MU 2.6.1.715-98. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 24.08.1998. (In Russ.)]

Кононенко Дмитрий Викторович

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: d.kononenko@niirg.ru

с 01.11.1998 по 27.02.2011, и МУ 2.6.1.2838-11³, действовавших с 28.02.2011 по 30.11.2023. Структура и статус нового документа были рассмотрены в первой части статьи (см. [1]). Кардинальное отличие новых МУ 2.6.1.0333-23 от действовавших ранее МУ 2.6.1.2838-11 заключается в том, что теперь в документе определен порядок организации и проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла, начиная с ввода в эксплуатацию и заканчивая сносом [1]. В контексте контроля содержания радона в воздухе помещений важными моментами являются введение отдельных алгоритмов контроля в зданиях с круглосуточным и некруглосуточным пребыванием людей, а также особый подход к проведению контроля в рамках мероприятий, срок проведения которых законодательно ограничен.

Оценка среднегодового значения эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений

В 2009 г. в статье [2], посвященной актуализации МУ 2.6.1.715-98 и разработке будущих МУ 2.6.1.2838-11, было высказано мнение о том, что «объекты строительства после приемки их в эксплуатацию по величине показателей радиационной безопасности в категорию эксплуатируемых не переходят», поскольку гигиенические требования к их характеристикам остаются таковыми на все последующее время. Строго говоря, в понимании НРБ-99/2009⁴ к эксплуатируемым объектам относятся только те жилые, общественные и производственные здания и сооружения, которые построены и начали эксплуатироваться до введения нормативов по среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе и мощности дозы гамма-излучения в помещениях в конце 1990-х гг.».

Аналогичная позиция представлена в официальных Комментариях к НРБ-99/2009 [3]: «При оценке соответствия жилых и общественных зданий установленным тре-

бованиям по ЭРОА изотопов радона и мощности дозы гамма-излучения следует иметь в виду, что, после окончания строительства этих зданий и сдачи их в эксплуатацию, формально они переходят в разряд «эксплуатируемых», однако требования по среднегодовой ЭРОА изотопов в воздухе помещений этих объектов не меняются: во вновь построенных жилых и общественных зданиях этот показатель не должен превышать 100 Бк/м³».

Таким образом, приходится констатировать, что представленная в двух приведенных цитатах (принадлежащих соавторам НРБ-99/2009) трактовка требований фактически не согласуется с текстом пп. 5.3.2 и 5.3.3 НРБ-99/2009, в котором ничего не говорится о том, на здания каких годов постройки (или введения в эксплуатацию) распространяются те или иные требования. Более того, из текста пп. 5.3.2 даже не следует, что указанные в нем требования распространяются на здания, сдающиеся в эксплуатацию: фактически, в пп. 5.3.2 идет речь про требования, которые должны быть заложены в проект здания (т.е. целевые значения показателей радиационной безопасности). И хотя пп. 5.1.3 ОСПОРБ 99/2010⁵ и пп. 4.2.6 СанПиН 2.6.1.2800-10⁶ уже трактуют это как требование, предъявляемое к зданиям, сдающимся в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции, в них также ничего не говорится о том, что в дальнейшем указанные требования продолжают применяться к данному конкретному зданию в течение всего периода эксплуатации, независимо от того, что после приемки оно переходит в разряд эксплуатируемых (требования к которым изложены в пп. 4.2.7 СанПиН 2.6.1.2800-10). Аналогичным образом выглядит ситуация с требованиями, касающимися производственных зданий и сооружений: формулировки пп. 5.2.1 и 5.2.2 ОСПОРБ 99/2010 и пп. 3.2.2 и 3.2.3 СанПиН 2.6.1.2800-10 в целом повторяют указанные выше подпункты НРБ-99/2009 и СанПиН 2.6.1.2800-10, относящиеся к жилым и общественным зданиям.

³ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2838-11. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2011. [Radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities after their construction, overhaul, reconstruction in terms of radiation safety indicators. Guidelines MU 2.6.1.2838-11. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 28.01.2011. (In Russ.)]

⁴ 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 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, 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 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

⁵ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 11.08.2010, регистрационный № 18115), с изменениями, внесенными постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16.09.2013 № 43 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 05.11.2013, регистрационный № 30309). [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 11.08.2010, registration No. 18155), as amended by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 16.09.2013 No. 43 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No. 30309). (In Russ.)]

⁶ Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения: Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2800-10. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2010 № 171 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 27.01.2011, регистрационный № 19587). [Hygienic requirements for limiting public exposure to the natural sources of ionizing radiation. Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2800-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 24.12.2010 No. 171 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 27.01.2011, registration No. 19587). (In Russ.)]

Практика показывает, что такая нечеткость формулировок приводит к восприятию системы требований к показателям радиационной безопасности зданий и сооружений совершенно не таким образом, каким оно, по всей видимости, было задумано авторами НРБ-99/2009, ОСПОРБ 99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10: при санитарно-эпидемиологической оценке эксплуатируемых зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности год их постройки (или введения в эксплуатацию) в расчет не принимается. Однако, подытоживая, следует признать, что без устранения нечеткости формулировок в санитарных правилах и нормативах менять сложившуюся практику путем изменения критериев соответствия в новых МР было бы нецелесообразно и безосновательно.

Вопросам методического обеспечения радиационного контроля как эксплуатируемых, так и вводимых в эксплуатацию зданий, за последние 25–30 лет было посвящено значительное количество публикаций, в том числе и после введения в действие МУ 2.6.1.2838-11 (см., например, [4–8]). В числе прочего критике подвергалось широкое использование в испытательных лабораториях (ИЛ), в первую очередь, при радиационном контроле зданий и сооружений, сдающихся в эксплуатацию, экспрессных методов измерений ЭРОА изотопов радона, для результатов которых характерна чрезвычайно высокая вариабельность. При разработке соответствующей Главы IV МР 2.6.1.0333-23, однако, были приняты во внимание не только эти критические замечания, но также и существующая на данный момент в аккредитованных ИЛ (в первую очередь, ФБУЗ ЦГиЭ в субъектах РФ) структура приборного парка и представленный на рынке ассортимент измерительного оборудования и расходных материалов к нему.

Исходя из этого в МР 2.6.1.0333-23 алгоритм проведения контроля ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений зданий и сооружений, вводимых в эксплуатацию, построен таким образом, чтобы в большинстве ситуаций ИЛ могли использовать средства измерений (СИ), присутствующие в приборном парке в подавляющем большинстве случаев – это типы СИ, реализующие экспрессный и квазиинтегральный методы измерений. При этом введение повторных измерений ЭРОА изотопов радона экспрессным методом (не менее 3 измерений, проведенных в течение 3 дней в разное время суток с последующим усреднением полученных результатов), либо измерений объемной активности (ОА) радона квазиинтегральным или непрерывным методом с помощью мониторов радона (с продолжительностью пробоотбора $\tau \geq 3$ суток) после получения первого неудовлетворительного результата контроля экспрессным методом позволит получить более надежный результат оценки верхней границы среднегодового значения ЭРОА изотопов радона путем сглаживания временной вари-

бельности содержания радона в воздухе помещений. При получении повторного неудовлетворительного результата предусмотрено проведение долгосрочных измерений ОА радона интегральным или непрерывным методом ($\tau \geq 30$ суток), только по результатам которых может быть вынесено итоговое решение о несоответствии помещений санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Одним из важнейших нововведений в МР 2.6.1.0333-23 являются двухсезонные измерения содержания радона (в холодный и теплый периоды года) для определения среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений эксплуатируемых зданий и сооружений с наименьшим расчетом средневзвешенного значения по продолжительности этих периодов в субъектах РФ (продолжительность холодного периода определена п. 3.1 свода правил СП 131.13330.2012⁷, а в случае проведения измерений в населенном пункте, для которого она прямо не указана, рекомендуется использовать соответствующее значение для наиболее близко расположенного населенного пункта). При этом определены три ситуации, в которых описанный подход не применяется (пп. 5.8, 5.9 и 5.19 МР 2.6.1.0333-23):

1) в случае проведения измерений в рамках мероприятий, срок проведения которых законодательно ограничен, – это могут быть контрольно-надзорные мероприятия, проводимые в соответствии с Федеральным законом от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации», или рассмотрение обращений граждан и объединений граждан, в том числе юридических лиц, в соответствии с частью 1 статьи 12 Федерального закона от 02.05.2006 № 59-ФЗ «О порядке рассмотрения обращений граждан Российской Федерации»;

2) в случае проведения измерений в общественных и производственных зданиях и сооружениях, в которых единственной системой вентиляции является механическая (сезонная вариабельность содержания радона в воздухе таких зданий не выражена);

3) в случае проведения первичных (скрининговых) обследований зданий или сооружений на содержание радона в воздухе помещений, когда в качестве предварительной оценки используются результаты измерений ОА радона интегральным методом ($\tau \geq 30$ суток) в холодный период года.

Здесь следует обратить внимание, что в МР 2.6.1.0333-23 используются понятия холодного и теплого периодов года, определенные в соответствии с п. 91 СанПиН 1.2.3685-21⁸: холодный период характеризуется среднесуточной температурой наружного воздуха равной $+10^\circ\text{C}$ и ниже, а теплый период – выше $+10^\circ\text{C}$. Ранее в п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11 использовались не слишком удачные по-

⁷ СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная версия СНиП 23-01-99». Утвержден приказом Минрегиона России от 30.06.2012 № 275. [Building code SP 131.13330.2012 "Construction climatology. Updated version of SNiP 23-01-99". Approved by the Order of the Ministry of Regional Development of Russia of 30.06.2012 No. 275. (In Russ.)]

⁸ Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 2 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 29.01.2021, регистрационный № 62296) (далее – СанПиН 1.2.3685-21). [Hygienic norms and requirements to ensure the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 28.01.2021 No. 2 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 29.01.2021, registration No. 62296) (hereinafter – SanPiN 1.2.3685-21). (In Russ.)]

нения зимнего и летнего периодов года, поскольку не было конкретизировано, какое определение зимы и лета подразумевается: календарное, астрономическое или климатическое. Исходя из сути физических процессов, определяющих интенсивность поступления радона с грунтовым или наружным воздухом в помещения зданий, значение имеет разделение на отопительный и неотопительный периоды года. По этой причине астрономическое и календарное определения являются совсем неподходящими. В качестве границы между климатической зимой и летом используется среднесуточная температура наружного воздуха 0 °С, что также не совсем удачно, поскольку согласно п. 5 Правил предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 06.05.2011 № 354, в домах с централизованной системой отопления отопительный период должен начинаться не позднее и заканчиваться не ранее дня, следующего за днем окончания 5-дневного периода, в течение которого среднесуточная температура наружного воздуха соответственно ниже и выше +8 °С. Таким образом, использованное в МР 2.6.1.0333-23 определение холодного и теплого периодов года согласуется как с условиями начала и окончания отопительного периода, так и со статистическими данными по продолжительности периодов, приведенными в СП 131.13330.2012.

Еще одним важным нововведением в МР 2.6.1.0333-23 являются отдельные алгоритмы контроля ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений эксплуатируемых зданий с круглосуточным и некруглосуточным пребыванием людей [9]. К эксплуатируемым зданиям с круглосуточным пребыванием людей относятся жилые здания, а также общественные и производственные здания или сооружения, в которых население проводит не менее 19 ч в сутки (на основании принятого значения доли времени, проводимой населением в помещениях, равного 0,8⁹), а к эксплуатируемым зданиям с некруглосуточным пребыванием людей – общественные и производственные здания или сооружения, в которых население проводит менее 19 ч в сутки. Примерами общественных зданий с круглосуточным пребыванием людей могут служить детские дома, школы-интернаты, детские сады с круглосуточным режимом работы, дома престарелых, учреждения пенитенциарной системы, медицинские организации, оказывающие медицинскую помощь в стационарных условиях.

Ключевое различие в подходах к контролю содержания радона в воздухе эксплуатируемых зданий с круглосуточным и некруглосуточным пребыванием людей заключается в том, что в первом случае точность оценки среднегодового

значения ЭРОА радона возрастает с увеличением продолжительности непрерывного пробоотбора, тогда как во втором случае только средний уровень содержания радона в воздухе помещений в часы нахождения в них людей определяет степень радиационной безопасности населения при воздействии этого фактора. Исходя из этого в первом случае предпочтение следует сразу отдавать использованию интегрального, непрерывного или квазиинтегрального метода измерений. Однако при получении первого неудовлетворительного результата контроля при использовании экспрессного метода, как и в случае радиационного контроля вводимых в эксплуатацию зданий и сооружений, предусмотрено проведение повторных измерений ЭРОА изотопов радона экспрессным методом (не менее 3 измерений, проведенных в течение 3 дней в разное время с последующим усреднением полученных результатов), или ОА радона квазиинтегральным методом ($\tau \geq 3$ суток), или интегральным методом ($\tau \geq 30$ суток), или непрерывным методом ($\tau \geq 3$ суток). При получении повторного неудовлетворительного результата (если $\tau < 30$ суток) предусмотрено проведение дополнительных измерений ОА радона интегральным или непрерывным методом ($\tau \geq 30$ суток).

Во втором случае при получении первого неудовлетворительного результата контроля экспрессным методом проводятся повторные измерения ЭРОА изотопов радона экспрессным методом (не менее 3 измерений, проведенных в течение 3 рабочих дней в разное рабочее время с последующим усреднением полученных результатов; в помещениях детских образовательных организаций как минимум одно из измерений проводится непосредственно перед проветриванием) или ОА радона непрерывным методом ($\tau \geq 3$ суток, приходящихся на рабочие дни; при этом для расчета средней ОА радона используются только результаты, полученные в рабочее время). Важно отметить, что измерения проводятся в режиме нормальной (повседневной) эксплуатации здания или сооружения при штатном режиме работы механической системы вентиляции и (или) кондиционирования (при ее наличии), соблюдении кратности и времени проветривания, предписанных санитарными правилами^{10,11}. Такой алгоритм проведения измерений позволяет сгладить временную вариабельность содержания радона в воздухе помещений в часы нахождения в них людей либо путем определенной организации радиационного контроля при использовании экспрессного метода, либо путем использования технических возможностей мониторов радона и их программного обеспечения.

Итоговое решение о соответствии или несоответствии помещений эксплуатируемых зданий и сооружений санитарно-эпидемиологическим требованиям выносится только

⁹ Форма федерального статистического наблюдения № 4-ДОЗ. Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона: Методические рекомендации МР 2.6.1.0088-14. Утверждены врио Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 18.03.2014. Подпункт 4.4.4. [Federal statistical form No. 4-DOZ. Data on doses of public exposure to natural and technologically enhanced radiation background. Guidelines MR 2.6.1.0088-14. Approved by the acting Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 18.03.2014. §4.4.4. (In Russ.)]

¹⁰ Санитарно-эпидемиологические требования к организациям воспитания и обучения, отдыха и оздоровления детей и молодежи: Санитарные правила СП 2.4.3648-20. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.09.2020 № 28 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 18.12.2020, регистрационный № 61573). Подпункты 2.7.2, 2.11.2. [Sanitary and epidemiological requirements for organizations providing education and training, recreation and health improvement of children and youth. Sanitary rules SP 2.4.3648-20. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 28.09.2020 No. 28 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 18.12.2020, registration No. 61573). §2.7.2, §2.11.2. (In Russ.)]

¹¹ Таблица 6.12 СанПиН 1.2.3685-21. [Table 6.12 in SanPiN 1.2.3685-21. (In Russ.)]

по результатам оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений в виде средневзвешенного по продолжительности холодного и теплого периодов года (за исключением описанных выше трех исключений).

Следует также упомянуть сохранение в МР 2.6.1.0333-23 стандартного значения коэффициента радиоактивного равновесия между радоном и его короткоживущими дочерними продуктами распада (ДПР) в воздухе помещений ($F_{\text{Рн}}$) равного 0,5, а не переход в рамках умеренной «гармонизации» к рекомендуемому Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) [10], Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) [11] и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) [12] значению 0,4, основанному на результатах анализа, представленных Научным комитетом по действию атомной радиации при ООН (НКДАР ООН) еще в 2000 г. [13]. Основанием этому послужил опубликованный в 2018 г. наиболее масштабный на данный момент обзор результатов определения $F_{\text{Рн}}$ в работах, проведенных с 1983 по 2017 гг. [14]. Главный вывод авторов основывается на китайских данных, поскольку именно этот массив является самым большим по объему и включает результаты, полученные по всей территории Китая, в самых разных климатических зонах. Поэтому, на наш взгляд, он вполне применим и к России и звучит следующим образом: «Среднее значение $F_{\text{Рн}}=0,5$, наблюдаемое в Китае, можно считать репрезентативным для среднемирового значения $F_{\text{Рн}}$ для различных условий окружающей среды» [14]. Нецелесообразность перехода к значению 0,4 в России, для территории которой также характерно большое разнообразие климатических условий с общим уклоном в суровость, говорят и результаты, полученные по второму по объему массиву данных, относящемуся к Канаде, для территории которой характерны еще более высокие значения $F_{\text{Рн}}$, порядка 0,65 [14].

Что касается торона (^{220}Rn), то МАГАТЭ рекомендует опосредованно контролировать его содержание в воздухе помещений жилых и общественных зданий путем оценки соответствия удельной активности тория (^{232}Th) в строительных материалах установленным нормативам [10], поскольку именно строительные материалы являются в подавляющем большинстве случаев единственным источником поступления торона в воздух помещений: из-за очень короткого периода полураспада (55,6 с) его поступление из источников, расположенных на большом расстоянии (например, грунта под зданием), крайне маловероятно. Однако в действующих в настоящее время в РФ санитарных правилах (НРБ-99/2009, ОСПОРБ 99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10) нормируется среднегодовое значение ЭРОА изотопов радона, определенное как взвешенная сумма ЭРОА радона и торона ($\text{ЭРОА}_{\text{Рн}}+4,6\cdot\text{ЭРОА}_{\text{Тн}}$), в которой коэффициент 4,6 представляет собой отношение дозовых коэффициентов для ДПР торона и радона, близких к значениям, приведенным в отчете НКДАР ООН 2000 г. ($40\cdot 10^{-6}$ и $9\cdot 10^{-6}$ мЗв/(Бк·ч/м³) соответственно) [13]. Одна из причин такого подхода заключается в том, что более 17 млн домов, на которые приходится 66% площади жилого фонда (по данным Росстата на 2022 г. [15]), были возведены до 1996 г., т.е. до того, как в НРБ-96¹² были впервые уста-

новлены требования к строительным материалам по показателю эффективной удельной активности природных радионуклидов, поэтому невозможно гарантировать, что использованные при возведении этих домов строительные материалы удовлетворяют современным требованиям, и, соответственно, обеспечивают содержание торона в воздухе помещений на таком уровне, при котором доза внутреннего облучения за счет его ДПР пренебрежимо мала по сравнению с дозой за счет ДПР радона. Подтвердить или опровергнуть это можно только по результатам радиационного контроля, но в подавляющем большинстве этих домов он никогда не проводился.

Исходя из вышесказанного, в будущем при переработке санитарных правил может быть целесообразно изменить нормируемую величину для зданий, введенных в эксплуатацию начиная с 1999 г. (исходя из того, что МУ 2.6.1.715-98, разработанные после утверждения НРБ-96, были введены в действие с 01.11.1998), на среднегодовое значение ЭРОА (или ОА) радона (что также стало бы элементом умеренной «гармонизации» с международными подходами), а для прочих зданий сохранить существующий сейчас подход. Однако, поскольку на данный момент гигиенические нормативы для всех зданий установлены в виде среднегодового значения ЭРОА изотопов радона, величина ЭРОА торона подлежит определению при радиационном контроле на всех этапах жизненного цикла зданий (кроме сноса) вне зависимости от того, измеряется ли ЭРОА или ОА радона. В этом смысле в новых МР 2.6.1.0333-23 ничего не изменилось по сравнению с МУ 2.6.1.2838-11, в которых п. 6.3 допускал лишь оценку ЭРОА радона по результатам измерений ОА радона, но не отменял необходимость измерения ЭРОА торона.

Подход к измерению ЭРОА торона лишь в части помещений (как это было прописано в п. 6.6 МУ 2.6.1.2838-11) признан нерациональным, поскольку при измерениях экспрессным методом (который чаще всего применяется на первом этапе радиационного контроля) с помощью альфа-радиометров аэрозолей, представляющих, пожалуй, наиболее распространенный в ИЛ класс СИ содержания изотопов радона в воздухе, возможно одновременное определение ЭРОА и радона, и торона. Что касается измерений другими методами, при которых определяется ОА радона, то наблюдавшаяся практика пренебрежения в этом случае дополнительными измерениями ЭРОА торона приводила к недооценке нормируемой величины (т.е. при ее расчете значение ЭРОА торона просто принималось равным нулю), что нарушало принятый консервативный подход к обеспечению радиационной безопасности и в ряде случаев (когда результат измерения ЭРОА радона с учетом неопределенности вплотную приближался к значению гигиенического норматива) приводило к ложноположительным результатам санитарно-эпидемиологической оценки помещений. Для исключения в будущем подобных ошибок в п. 3.11 МР 2.6.1.0333-23 введено двукратное измерение ЭРОА торона – в начале и конце пробоотбора при измерении ОА радона квазиинтегральным, интегральным или непрерывным методом – и использование среднего арифметического значения результатов двух этих измерений при расчете значения ЭРОА изотопов радона.

¹² Нормы радиационной безопасности (НРБ-96): Гигиенические нормативы ГН 2.6.1.054-96. Утверждены постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 19.04.1996 № 7. [Norms of radiation safety (NRB-96). Hygienic norms GN 2.6.1.054-96. Approved by the resolution of the State Committee for Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Russian Federation of 19.04.1996 No. 7. Expired. (In Russ.)]

Еще одно нововведение, относящееся к определению уровней содержания радона в воздухе, касается радиационного контроля зданий и сооружений перед проведением капитального ремонта или реконструкции. В этом случае экспрессные измерения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений проводятся только при условии наличия закрытого контура здания или сооружения (т.е. совокупности строительных конструкций, включающих фундамент, наружные стены, перекрытия, крышу (кровлю), двери и окна) в помещениях, расположенных только на первом и цокольном (при его наличии) этаже. При отсутствии закрытого контура выполняются измерения плотности потока радона (ППР) с поверхности грунта в контрольных точках, расположенных по периметру здания или сооружения. Измерения ППР и оценка их результатов проводятся в соответствии с упрощенным и приспособленным под конкретную цель алгоритмом, изложенным в действующих методических указаниях по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке земельных участков под строительство зданий и сооружений в части обеспечения радиационной безопасности¹³. В целом же основной целью проведения измерений на данном этапе жизненного цикла зданий и сооружений является определение необходимости внесения изменений в проект капитального ремонта или реконструкции, направленных на обеспечение выполнения санитарно-эпидемиологических требований, установленных для зданий и сооружений целевого назначения (т.е. заложенного в проект назначения здания или сооружения (жилое, общественное, производственное) после окончания работ по капитальному ремонту или реконструкции, которое может не совпадать с исходным назначением), в том числе в соответствии со сводом правил по проектированию противорадоновой защиты¹⁴.

Заключение

На основе результатов выполненных ранее исследований и обобщения ряда зарубежных рекомендаций для новых МР 2.6.1.0333-23 были усовершенствованы алгоритмы проведения измерений содержания радона в воздухе помещений таким образом, чтобы сбалансировать повышение достоверности оценки среднегодового значения ЭРОА изотопов радона и увеличение необходимых для этого трудозатрат сотрудников ИЛ. При этом получение средневзвешенного значения на основе результатов двухсезонных измерений в случае радиационного контроля эксплуатируемых зданий будет представлять значительный шаг вперед в оценке реальных среднегодовых уровней содержания радона в эксплуатируемых зданиях в России. Одновременно с этим в случае проведения контроля ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений в рамках мероприятий, срок проведения которых законодательно ограничен, измерения для определения среднегодового значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений могут проводиться однократно в любой период года. В совокупности

внесенные изменения должны положительно сказаться на качестве измерительной информации, получаемой ИЛ и лежащей в основе принимаемых органами исполнительной власти решений, касающихся, в том числе, применения мер административного воздействия при нарушениях санитарно-эпидемиологических требований к эксплуатации помещений жилых и общественных зданий и выделения средств на проведение радонозащитных мероприятий.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кононенко Д.В. написал черновик рукописи, подготовил английский перевод и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Кормановская Т.А. отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Васильев А.С. провел поиск и анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Сапрыкин К.А. отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой научно-исследовательской программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Разработка и научное обоснование рекомендаций по планированию, организации и внедрению программ по снижению уровней облучения населения от природных источников ионизирующего излучения на уровне субъектов Российской Федерации с целью уменьшения рисков заболеваемости населения злокачественными новообразованиями».

Литература

1. Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 1 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 138–147. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147.
2. Стамат И.П., Кормановская Т.А., Горский Г.А., Еремин А.В. К обоснованию требований к контролю показателей радиационной безопасности зданий и сооружений при сдаче их в эксплуатацию // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 10–15.
3. Комментарии к Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / под ред. академика РАМН Г.Г. Онищенко. СПб., 2012. 216 с.

¹³ Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности: Методические указания МУ 2.6.1.2398-08. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 02.07.2008. [Radiation survey and sanitary assessment of land plots for construction of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety. Guidelines MU 2.6.1.2398-08. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation on 02.07.2008. (In Russ.)]

¹⁴ СП 321.1325800.2017 «Здания жилые и общественные. Правила проектирования противорадоновой защиты». Утвержден приказом Минстроя России от 05.12.2017 № 1616/пр. [Building code SP 321.1325800.2017 "Residential and public buildings. Regulations for designing of protection against radon". Approved by the Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia of 05.12.2017 No. 1616/pr. (In Russ.)]

4. Маренный А.М. Методические аспекты измерений средней объемной активности радона в помещениях интегральным трековым методом // АНРИ. 2012. № 4 (71). С. 13–19.
5. Онищенко А.Д., Жуковский М.В., Васильев А.В. Влияние временных вариаций уровней радона и погрешностей измерений на оценку средних сезонных значений объемной активности радона в помещении // АНРИ. 2013. № 3 (74). С. 2–12.
6. Васильев А.В., Жуковский М.В. Характер и периодичность изменения объемной активности радона в помещении // АНРИ. 2015. № 2 (81). С. 42–47.
7. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М. и др. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 1. Проблема оценки содержания радона и современный принцип контроля // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 53–63. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-53-63.
8. Цапалов А.А., Киселев С.М., Маренный А.М. и др. Неопределенность результатов контроля радона в помещениях. Часть 2. Экспериментальная оценка неопределенности временных вариаций радона // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 64–79. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.
9. Васильев А.С., Романович И.К., Кононенко Д.В. и др. Обоснование методических подходов к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 3. С. 29–40. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
10. 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.
11. 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. 88 с.
12. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press, 2009. 110 p.
13. 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.
14. Chen J., Harley N.H. A Review of Indoor and Outdoor Radon Equilibrium Factors – Part I: ^{222}Rn // Health Physics. 2018. Vol. 115, No. 4. P. 490–499. DOI: 10.1097/hp.0000000000000909.
15. Жилищное хозяйство в России. 2022: стат. сб. / М.: Росстат, 2022. 83 с. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234> (Дата обращения: 26.06.2024).

Поступила: 26.06.2024

Кононенко Дмитрий Викторович – 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: d.kononenko@niirg.ru
ORCID: 0000-0002-1392-1226

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
ORCID: 0009-0005-7922-7367

Васильев Алексей Серафимович – младший 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
ORCID: 0000-0002-1277-3807

Сапрыкин Кирилл Александрович – старший научный сотрудник, заведующий лабораторией 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
ORCID: 0000-0003-2387-7051

Для цитирования: Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Васильев А.С., Сапрыкин К.А. Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 2 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 108–116. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-108-116

New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 2

Dmitry V. Kononenko, Tatyana A. Kormanovskaya, Alexey S. Vasilyev, Kirill A. Saprykin

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

The paper (in two parts) presents an overview of the new guidelines MR 2.6.1.0333-23 (approved on 01 December 2023) that supersede guidelines MU 2.6.1.2838-11, which were used for organizing radiation surveys of residential, public and industrial buildings and facilities and their sanitary assessment in terms of radiation safety indicators over the past 12 years. Due to a large number of critical comments on the document received during this period, a need for significant revision emerged. The scope of the revised document was expanded, and now it covers all stages of the life cycle of buildings and facilities: commissioning; operation period; overhaul and reconstruction; demolition. In the second part of the paper, numerous innovations are considered in terms of estimating the indoor average annual equilibrium equivalent concentration of radon isotopes. The reasons for the introduction of certain changes are outlined. Based on the results of previous studies and the review of foreign recommendations, the procedures for measuring indoor radon concentrations have been improved in such a way as to balance the increase in the reliability of estimating the average annual equilibrium equivalent concentration of radon isotopes and the increase in time and labor costs for testing laboratories to conduct the survey. The revised document introduces separate procedures for measuring indoor radon concentrations in new buildings and existing buildings with round-the-clock and non-round-the-clock occupancy. Estimating a weighted average based on the results of two-season measurements will represent a significant step forward in assessing the actual average annual radon concentrations in operated buildings in Russia. At the same time, the case of radiation survey of the buildings within the framework of events with legally limited duration is considered separately in the revised document. Taken together, the changes should have a positive impact on the quality of measurement information obtained by testing laboratories and underlying decisions made by executive authorities.

Key words: radiation survey, radiation safety indicators, buildings and facilities, commissioning, overhaul, reconstruction, demolition, radon, thoron, radon concentration, density of radon flux, control and supervisory activities.

Authors' personal contribution

Dmitry V. Kononenko wrote the draft of the manuscript, translated the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Tatyana A. Kormanovskaya edited the interim version of the manuscript.

Alexey S. Vasilyev conducted a search and analysis of literature data, and edited the interim version of the manuscript.

Kirill A. Saprykin edited the interim version of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025 “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological wellbeing, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Development and scientific substantiation of recommendations for planning, organizing and implementing programs to reduce the levels of public exposure due to natural sources of ionizing radiation on the regional level in order to reduce the risks of malignant neoplasms morbidity of the population of the Russian Federation”.

References

1. Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Vasilyev AS, Saprykin KA. New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 1. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 138–147. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147.
2. Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorsky GA, Eremin AV. To the justification of requirements to the control of radiation protection indicators for buildings and facilities during their commissioning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 10–15 (In Russian).
3. Onischenko GG (ed.). Comments on Norms of radiation safety (NRB-99/2009). St. Petersburg; 2012. 216 p. (In Russian).
4. Marennyy AM. Methodical aspects of measurements average indoor radon volume activity using the integral track method. *ANRI = ANRI*. 2012;4(71): 13–19. (In Russian).
5. Onishchenko AD, Zhukovsky MV, Vasilyev AV. The influence of temporal variations of radon levels and measurement errors on the assessment of average seasonal values of radon concentration in the rooms. *ANRI = ANRI*. 2013;3(74): 2–12. (In Russian).
6. Vasilyev AV, Zhukovsky MV. The temporal variations of radon concentrations in the rooms. *ANRI = ANRI*. 2015;2(81): 42–47. (In Russian).

Dmitry V. Kononenko

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

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

7. Tsapalov AA, Kiselev SM, Marennyy AM, Kovler KL, Kuvshinnikov SI. Uncertainty of the results of the radon control in housings. Part 1. The problem of assessment of the radon concentration and modern control principles. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 53–63. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-53-63.
8. Tsapalov AA, Kiselev SM, Marennyy AM, Kovler KL, Kuvshinnikov SI, Yankin AS. Uncertainty of the results of the radon control in housings. Part 2. Experimental assessment of the temporal variations of radon. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 64–79. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-64-79.
9. Vasilyev AS, Romanovich IK, Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Saprykin KA, Balabina TA. Substantiation of methodical approaches to the control of indoor radon concentration in existing public buildings with non-round-the-clock stay of people. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 29–40. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40.
10. 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.
11. Radiological Protection against Radon Exposure. ICRP Publication 126. *Annals of the ICRP*. 2014;43(3). 73 p.
12. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press; 2009. 110 p.
13. 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.
14. Chen J, Harley NH. A Review of Indoor and Outdoor Radon Equilibrium Factors – Part I: ^{222}Rn . *Health Physics*. 2018;115(4): 490–499. DOI: 10.1097/hp.0000000000000909.
15. Housing sector in Russia. 2022 Statistical digest. Moscow: Rosstat; 2022. 83 p. Available from: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234> [Accessed 26 June 2024]. (In Russian).

Received: June 26, 2024

For correspondence: Dmitry V. Kononenko – Researcher, 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 Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: d.kononenko@niirg.ru)
ORCID: 0000-0002-1392-1226

Tatyana A. Kormanovskaya – Candidate of Biological Sciences, Leading researcher, 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 Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0009-0005-7922-7367

Alexey S. Vasilyev – Junior researcher, 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 Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0002-1277-3807

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 Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0003-2387-7051

For citation: Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Vasilyev A.S., Saprykin K.A. New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 2. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 108–116. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-108-116

Радиационные аварии, связанные с нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, в Российской Федерации в 2010–2023 гг.

А.В. Громов, А.М. Библин, К.А. Седнев, Р.Р. Ахматдинов

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 работе проведены обобщение, анализ и гигиеническая оценка сведений о радиационных авариях, связанных с нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, произошедших на территории Российской Федерации за период с 2010 по 2023 годы и представленных в банке данных радиационных аварий и инцидентов Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности. На территории Российской Федерации за рассматриваемый период в 41-ом субъекте зарегистрирован 971 случай возникновения радиационных аварий, связанных нарушением правил сбора и оборота металлолома. Наибольшее количество случаев зарегистрировано в Вологодской (206), Свердловской (178) областях, Хабаровском крае (150), г. Санкт-Петербурге (116) и Оренбургской области (52). Ежегодное количество случаев таких радиационных аварий за последние 14 лет неуклонно снижалось (среднегодовой темп снижения составил 12 %). Основными источниками радиоактивного загрязнения металлолома являлись: фрагменты различной радиационной техники; трубы и технологическое оборудование, использованное в нефтегазовой промышленности и подвергшееся радиоактивному загрязнению в процессе их эксплуатации природными радионуклидами (в основном ^{226}Ra и его соли); приборы со светомассой постоянного действия на основе солей ^{226}Ra . В выявленных источниках в большинстве случаев идентифицировались радионуклиды ^{226}Ra (63%), ^{137}Cs (12%), ^{60}Co (9%), ^{238}U (9%), в единичных случаях ^{241}Am , ^{232}Th , ^{90}Sr . В 66% выявленных случаев значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на поверхности источников превышали 1 мкЗв/ч, в 27% — 10 мкЗв/ч, в 7% — 100 мкЗв/ч; в пяти — 1 мЗв/ч и достигали 8,8 мЗв/ч. Установлено, что в течение всего исследуемого периода времени выявляются источники ионизирующих излучений, представляющие потенциальную угрозу для здоровья населения. В 14-ти случаях в металлоломе был выявлен радиоактивно загрязненный металлический скрап, что свидетельствует о произошедших фактах переплавки источников ионизирующего излучения, обстоятельства которых не были расследованы, а возможные негативные последствия для человека не были определены. В 64% зарегистрированных радиационных аварий партии металлолома, в которых были обнаружены источники ионизирующих излучений, сопровождалась протоколами радиационного контроля аккредитованных лабораторий, которые подтверждали соответствие продукции требованиям санитарных норм и правил. Таким образом, несмотря на нерешенную к настоящему времени проблему выдачи положительных протоколов аккредитованными лабораториями на партии металлолома, несоответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям, существующая отечественная система обеспечения радиационной безопасности населения при заготовке и реализации металлолома позволяет выявлять подобные нарушения, что подтверждает ее эффективность и актуальность. Даны предложения органам и организациям Роспотребнадзора по совершенствованию аварийного реагирования при расследовании радиационных аварий подобного типа.

Ключевые слова: внеочередные донесения, источник ионизирующего излучения, металлолом, радиационная авария, радионуклид.

Введение

Металлолом является важным исходным материалом для металлургической промышленности. Значимость лома черных и цветных металлов в качестве сырья для производства металлопродукции подчеркивается в Стратегии разви-

тия металлургии России¹. Мировая металлургическая ассоциация оценивает мировое потребление лома в сталеплавильном производстве в 650 млн. тонн в год [1]. Число металлургических предприятий, которые используют металлолом для переплавки, исчисляется десятками тысяч [2]. В российской отрасли лома черных и цветных металлов ве-

¹Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 № 4260-р Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 г. [Decree of the Government of the Russian Federation dated December 28, 2022, No. 4260-r Strategy for the Development of Metallurgical Industry of the Russian Federation for the period up to 2030 (In Russ.).]

Громов Алексей Валерьевич

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

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

дуг операции более 5000 предприятий, число занятых превышает 60 тыс. человек [3]. Металлолом и продукты металлопереработки являются предметом трансграничных перевозок.

В случае нарушения требований радиационной безопасности при обращении с металлоломом могут возникнуть ситуации, которые приводят к загрязнению конечной металлургической продукции и окружающей среды, дополнительному облучению работников металлургических производств и населения [2, 4].

За рубежом целый ряд радиационных аварий (РА), значимых с медицинской и социально-экономической точки зрения, был связан с отсутствием надлежащего радиационного контроля металлолома: Таиланд, 1982 [5, 6], Мексика, 1983 [2, 7], Бразилия, 1987 [2, 7, 8], Турция, 1988 [2, 9], Таиланд, 2000 [2, 10], Индия, 2010 [11, 12].

В СССР в 1989 г. в результате несанкционированного поступления источника ^{137}Cs в плавильную печь были загрязнены отдельные цеха и территории Подольского завода цветных металлов [13, 14]. Работы по реабилитации территории завода были проведены в 2015 году. В ходе работ было отсортировано более 23000 м³ загрязненного радионуклидами грунта и металлоконструкций, реабилитировано около 13000 м² территории.

В Российской Федерации выстроена система обеспечения радиационной безопасности при обращении с металлоломом. Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 мая 2022 г. № 980 утверждены «Правила обращения с ломом и отходами черных и цветных металлов и их отчуждения», в соответствии с которыми на объектах по приему лома и отходов черных и (или) цветных металлов должны проводиться радиационный контроль каждой партии лицами, прошедшими соответствующую подготовку и аттестацию, с использованием поверенных средств измерений; находиться и предъявляться по требованию контрольных (надзорных) органов инструкции о порядке проведения радиационного контроля лома и отходов черных и (или) цветных металлов и о порядке действий при обнаружении радиоактивных лома и отходов черных и (или) цветных металлов.

Приказом Минздрава Российской Федерации от 10.04.2001 № 114 введены в действие санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности при заготовке и реализации металлолома², которые регламентируют организацию и порядок проведения радиационного контроля металлолома, обследование транспортных средств (оборудования), предназначенных к разделке на металлолом, а также порядок оформления на них санитарно-эпидемиологического заключения.

Цель исследования – анализ информации о радиационных авариях, связанных с нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, произошедших в Российской Федерации за период с 2010 по 2023 гг.

Исходными данными для анализа являлась информация из банка данных радиационных аварий и инцидентов Информационно-аналитического центра Роспотребнадзора по радиационной безопасности³, формируемого за счет поступления и регистрации данных из внеочередных донесений, направляемых Управлениями Роспотребнадзора по субъектам Российской Федерации в Информационно-аналитический центр Роспотребнадзора по радиационной безопасности, функционирующего на базе ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева [15].

Результаты

На территории Российской Федерации за период с 2010 по 2023 годы в 41-ом субъекте зарегистрирован 971 случай возникновения РА, связанных нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов. География возникновения РА проиллюстрирована на рисунке 1.

Наибольшее количество случаев выявления радиоактивно-загрязненного металлолома с зарегистрировано в Вологодской (206), Свердловской (178) областях, Хабаровском крае (150), Санкт-Петербурге (116) и Оренбургской области (52).

Для оценки динамики возникновения РА с металлоломом и исключения влияния случайных факторов при оценке тенденции был рассчитан среднегодовой темп прироста и произведено аналитическое выравнивание динамического ряда методом наименьших квадратов, результаты которого отражены на рисунке 2. Динамические показатели РА, связанных с нарушением правил сбора и оборота металлолома, отличаются отрицательными значениями (среднегодовой темп снижения составил 12%), что свидетельствует о неуклонной убыли количества случаев за последние 14 лет. Связано это может быть с тем, что пик объемов заготовки металлолома в стране пройден в 2004–2006 гг., когда осуществлялся массовый вывод из эксплуатации металлоемких объектов и оборудования, построенных в советское время [16, 17]. В настоящее время продолжается снижение объемов заготовки такого металлолома.

Основными источниками радиоактивного загрязнения металлолома являлись: фрагменты различной радиационной техники, в том числе блоки источников гамма-излучения, используемые в радиоизотопных приборах, дефектоскопах, а также транспортно-перезарядные контейнеры; трубы и технологическое оборудование, использованное в нефтегазовой промышленности, подвергшееся радиоактивному загрязнению в процессе их эксплуатации природными радионуклидами (в основном ^{226}Ra и его соли); приборы со светомассой постоянного действия на основе солей ^{226}Ra . В выявленных источниках ионизирующего излучения (ИИИ) в большинстве случаев идентифицировались радионуклиды ^{226}Ra (63%), ^{137}Cs (12%), ^{60}Co (9%), ^{238}U (9%), в единичных случаях ^{241}Am , ^{232}Th , ^{90}Sr .

² СанПиН 2.6.1.993-00 «Гигиенические требования к обеспечению радиационной безопасности при заготовке и реализации металлолома», утвержденные приказом Минздрава Российской Федерации от 10.04.2001 № 114 (зарегистрировано Минюстом России 08.05.2001) в редакции СанПиН 2.6.1.2525-09 «Изменения № 1 к СанПиН 2.6.1.993-00», утвержденных Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 14.07.2009 № 49 (зарегистрировано Минюстом России 12.08.2009 №14520) (далее – СанПиН 2.6.1.993-00) [Sanitary Rules and Norms (SanPiN) 2.6.1.993-00 "Hygienic Requirements for Ensuring Radiation Safety in the Collection and Sale of Scrap Metal," approved by the Order of the Ministry of Health of the Russian Federation No. 114 dated April 10, 2001 (registered by the Ministry of Justice of Russia on May 8, 2001), as amended by SanPiN 2.6.1.2525-09 "Amendment No. 1 to SanPiN 2.6.1.993-00," approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 49 dated July 14, 2009 (registered by the Ministry of Justice of Russia on August 12, 2009, No. 14520) (hereinafter referred to as SanPiN 2.6.1.993-00) (In Russ.)]

³ Приказ Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 23.12.2013 № 968 «О совершенствовании реагирования в случае возникновения радиационной аварии». [Order of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being of 23.12.2013 No. 968 "On Improving Response in the Event of a Radiation Accident". (In Russ.)]

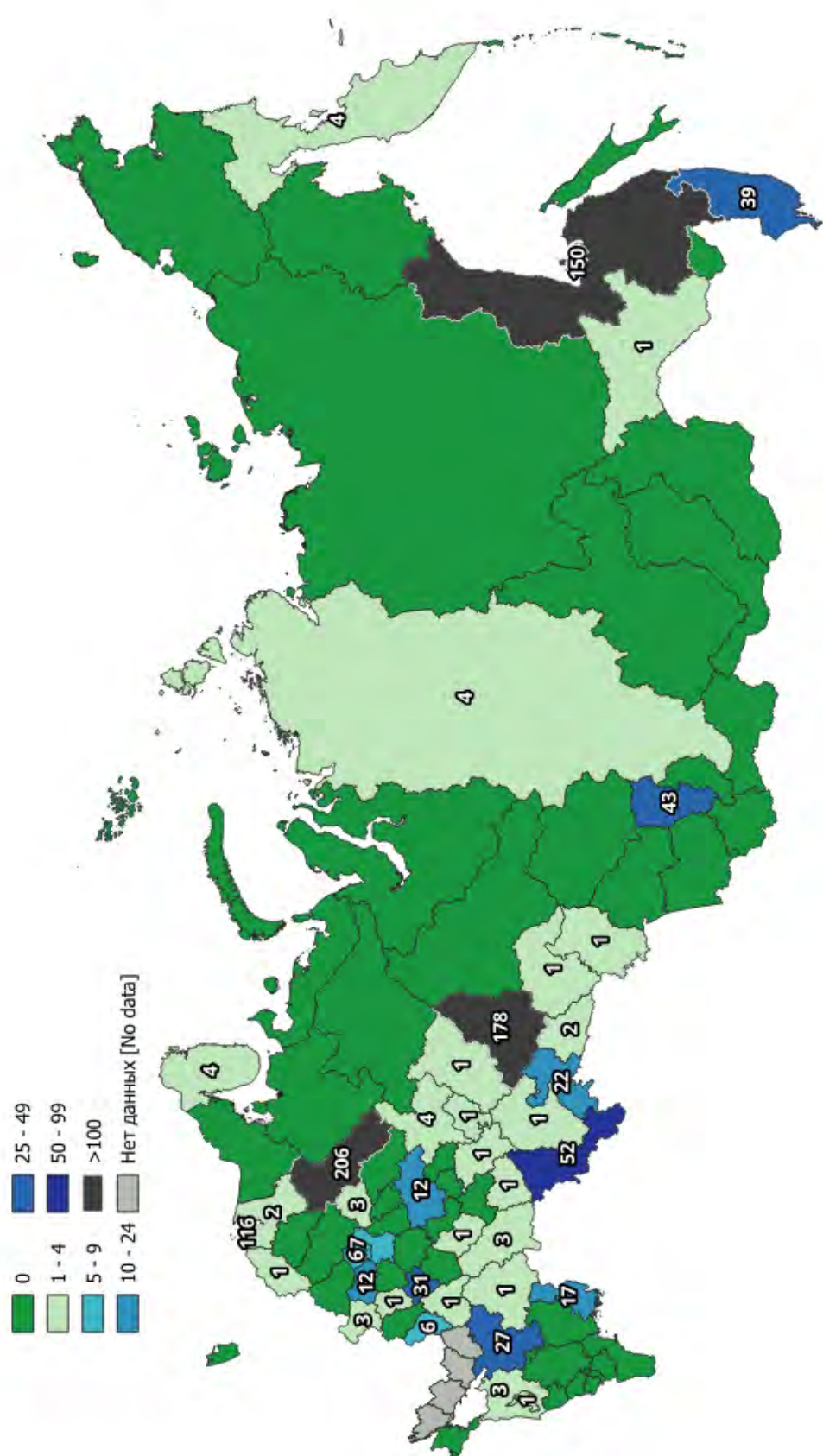


Рис. 1. География распространения РА, связанных нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, по субъектам Российской Федерации
[Fig. 1. Geography of radiation events associated with violation of the rules of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous metal scrap by subjects of the Russian Federation]

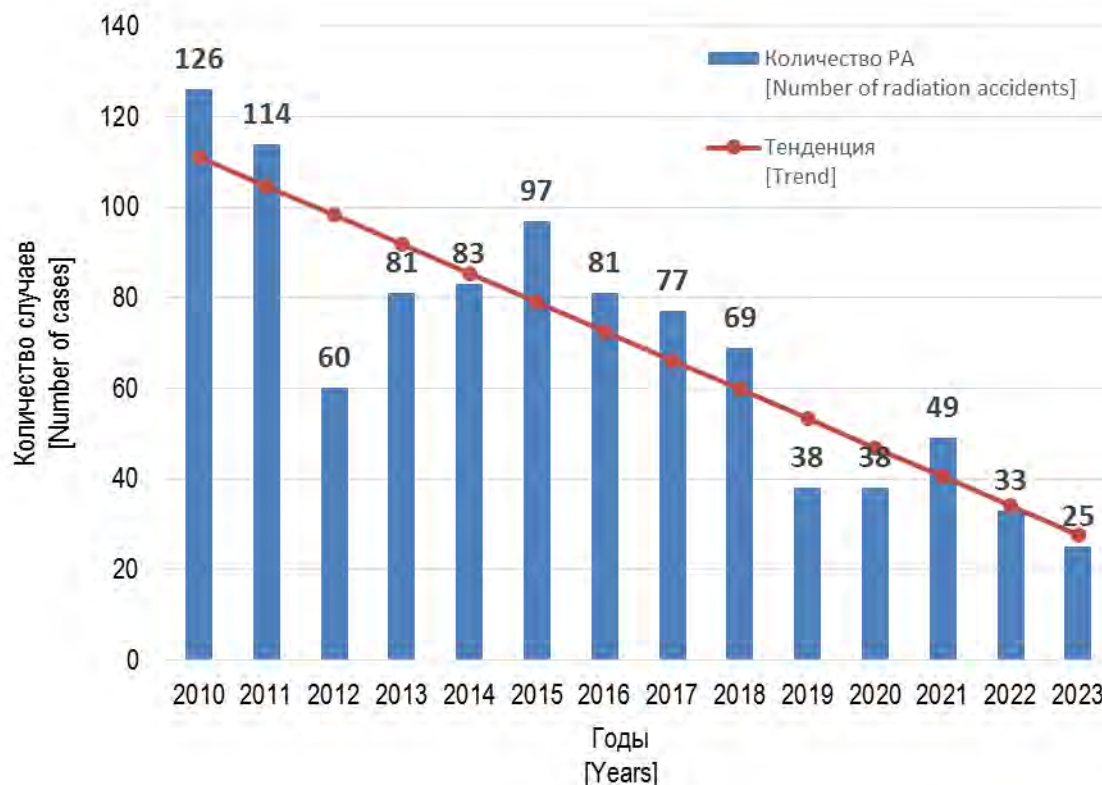


Рис. 2. Динамика числа РА, связанных нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, зафиксированных в России

[Fig. 2. Dynamics of the number of radiation events associated with violation of the rules of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous metal scrap]

Согласно данным, представленным в таблице, в 66% выявленных случаев значения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД ГИ) на поверхности ИИИ (с учетом вычета природного фона) превышали 1 мкЗв/ч, что в соответствии с санитарно-эпидемиологическими требованиями⁴ для изъятия и утилизации ИИИ требует привлечения специализированных организаций или специально подготовленных сотрудников, отнесенных к персоналу группы А. В 27% случаев значения МАЭД ГИ превышали 10 мкЗв/ч, в 7% – 100 мкЗв/ч. В пяти случаях значения МАЭД ГИ превышали 1 мЗв/ч и достигали 8,8 мЗв/ч.

Анализ представленных данных свидетельствует о том, что несмотря на ежегодный спад количества РА, связанных с нарушением правил сбора и оборота металлолома, до сих пор выявляются ИИИ, значения МАЭД ГИ от которых имеют достаточно высокие уровни, вследствие которых при непродолжительном контакте (от десятка минут до нескольких часов) человек получил дозу, превышающую основной предел дозы в 1 мЗв/год для населения⁵. Последний случай произошел в 2023 году в Ростовской области, где МАЭД ГИ от ИИИ составила 1,3 мЗв/ч. Таким образом, выявляемые ИИИ в металлоломе, представляют угрозу для здоровья населения.

В 14-ти случаях в металлоломе был выявлен радиоактивно загрязненный металлический скрап (зашлакованные отходы), образующийся в металлургии в результате плавки металлов, значения МАЭД ГИ на поверхности которого достигали 121 мкЗв/ч. Данные случаи свидетельствуют о произошедших фактах переплавки ИИИ, обстоятельства которых не были расследованы, а возможные негативные последствия не были определены.

Характер протекания и последствия радиационной аварии, произошедшей в результате плавки металлолома, содержащего ИИИ, в первую очередь зависит от свойств радионуклидов [4]. Так определено, что при переплавке ⁶⁰Со, 95% его активности переходит в конечный продукт плавки, поставляемый потребителям, в том числе населению. В отношении ¹³⁷Cs отмечено, что 50% его активности переходит в газопылевую фракцию, тем самым формируя радиоактивные выбросы в атмосферу, объемы которых зависят от активности переплавленного ИИИ, а также типа и конструкции плавильного агрегата, при этом в конечный продукт переходят следовые активности ¹³⁷Cs.

⁴Пункт 3.7 СанПиН 2.6.1.993-00. [Paragraph 3.7 of SanPiN 2.6.1.993-00 (In Russ.)]

⁵Пункт 3.1.2 СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)», утвержденных постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано Минюстом России 14.08.2009, регистрационный № 14534) [Paragraph 3.1.2 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. (In Russ.)]

Распределение количества РА по диапазонам МАЭД ГИ, измеренных на поверхности ИИИ

[Table]

Distribution of the radiation events number by ambient dose equivalent rate ranges measured on the surface of radiation source]

Год [Year]	Диапазоны МАЭД ГИ на поверхности ИИИ, мкЗв/ч [Ambient dose equivalent rate ranges on the surface of radiation source, $\mu\text{Sv/h}$]					
	н/д [n/a]	< 1	$\geq 1 - < 10$	$\geq 10 - < 100$	$\geq 100 - < 1000$	≥ 1000
2010	2	32	55	29	7	1
2011	–	33	51	23	6	1
2012	–	18	24	13	5	–
2013	1	23	33	13	10	1
2014	–	19	38	17	9	–
2015	–	41	40	16	–	–
2016	–	30	31	14	6	–
2017	–	41	26	7	3	–
2018	–	27	26	15	1	–
2019	–	16	6	14	2	–
2020	–	12	18	7	1	–
2021	–	19	11	15	3	1
2022	–	10	13	6	4	–
2023	–	6	9	7	2	1
Общий итог [Total]	3	327	381	196	59	5

К примеру, в 2-х случаях (один из них выявлен в 2022 году) в металлическом скрапе был идентифицирован радионуклид ^{137}Cs , что может свидетельствовать о переплавке ИИИ, содержащего ^{137}Cs , и, соответственно, о наличии радиоактивных выбросов на предприятии, на котором данный ИИИ был переплавлен. Таким образом, при выявлении радиоактивно загрязненного скрапа в металлоломе рекомендуется проводить санитарно-эпидемиологическое расследование по установлению местонахождения организации, в которой мог образоваться данный скрап, и определению круга лиц, осуществлявших переплавку ИИИ, для последующего проведения радиационного обследования населения и территорий, которые потенциально могли подвергнуться радиоактивному загрязнению.

5 апреля 2013 г. на Электростальском заводе тяжелого машиностроения (ОАО «ЭЗТМ») в г. Электросталь (Московская область) на участке цветного литья в разогретую печь для переплавки лома металла был загружен защитный контейнер радионуклидного дефектоскопа, содержащий мощный ИИИ с радионуклидом ^{137}Cs . По предварительным оценкам активность ИИИ находилась в пределах 500 Ки. В результате плавки ИИИ через вентиляционную трубу плавильной печи вместе с дымом произошел выброс ^{137}Cs в атмосферу и осаждение его на территории центральной площадки ОАО «ЭЗТМ» и территории жилой застройки г.о. Электросталь, образуя обширное радиоактивное загрязнение. По грубым оценкам активность выброса ^{137}Cs составила до 50 Ки. Значения МАЭД внутри цеха, где произошла плавка ИИИ, достигали 100 мЗв/ч на расстоянии

0,1 м от измеряемой поверхности плавильного агрегата, на центральной площадке ОАО «ЭЗТМ» достигали 120 мкЗв/ч, за пределами завода на территориях жилой застройки г. Электросталь – до 1,3 мкЗв/ч, общественных зданий – до 5,5 мкЗв/ч [18, 19]. Сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева было проведено радиационное обследование работников предприятия и оценены их дозы внутреннего облучения. Согласно проведенным оценкам у четырех сотрудников предприятия доза внутреннего облучения превышала 1 мЗв/год и достигала 1,4 мЗв/год. Факт радиационной аварии был установлен только 12.04.2013 г., т.е. в течение недели с момента возникновения РА не предпринималось никаких мер по обеспечению радиационной защиты населения. В связи с этим есть основания полагать, что сотрудники, участвовавшие в переплавке ИИИ, и работники, принимавшие участие в погрузке, транспортировке ИИИ, в особенности работники, которые чистили печь от остатков продуктов плавления ИИИ и не входили в число обследованных работников, которые могли получить дозы техногенного облучения на 1–2 порядка превышающие установленный максимальный предел дозы 5 мЗв/год.

В период с 2011 по 2013 гг. в 14 субъектах Российской Федерации в квартирах жилых домов выявлялись счетчики расхода горячей (СВ-15Г) и холодной воды (СВ-15Х), комплектующие части (комплект присоединительной арматуры) которых были изготовлены из металла, загрязненного ^{60}Co . Всего за рассматриваемый период выявлено 2155 радиоактивно загрязненных приборов. Максимальные значения МАЭД на поверхности приборов в разных субъек-

тах Российской Федерации колебались от 0,5 до 17,1 мкЗв/ч. Радиоактивно загрязненные счетчики расхода воды были изъяты и направлены на захоронение. Дополнительно производителем счетчиков было передано на захоронение 3714 единиц радиоактивно загрязненных комплектующих.

В большинстве случаев выявления РА (64%) партии металлолома, в которых были обнаружены ИИИ, сопровождались протоколами радиационного контроля аккредитованных лабораторий, которые подтверждали соответствие продукции требованиям санитарных норм и правил. В 12% случаях на партии металлолома отсутствовали документы, подтверждающие проведение радиационного контроля, что свидетельствует о том, что радиационный контроль данного металлолома не проводился. В 24% случаях в донесениях не указывалась информация о наличии или отсутствии протоколов радиационного контроля.

Заключение

Проведенный анализ показал, что за последние 14 лет отмечается устойчивый спад количества РА, связанных с нарушением правил сбора и оборота металлолома. Тем не менее, до сих пор регистрируются случаи выявления ИИИ в металлоломе, представляющих угрозу для здоровья населения. Обнаружение радиоактивно загрязненного металлического скрапа в металлоломе свидетельствует о свершившихся фактах переплавки ИИИ, характер и масштабы возможных негативных последствий которых, в первую очередь, зависят от свойств радионуклидов, содержащихся в ИИИ.

Установлено, что за рассматриваемый период в большинстве зарегистрированных случаев выявления ИИИ в металлоломе при их расследовании систематически выявлялись нарушения санитарно-эпидемиологических требований⁶, связанные с достоверностью проведения производственного радиационного контроля металлолома. Ежегодно в 52–77% случаях выявления ИИИ в металлоломе, партии металлолома сопровождались протоколами аккредитованных лабораторий о соответствии продукции гигиеническим нормативам⁷. Это свидетельствует о том, что при заготовке и реализации металлолома радиационная безопасность населения не обеспечивается полностью, имеется нерешенная проблема, степень опасности которой усугубляется систематичностью ее проявления. Выдача положительных протоколов аккредитованных лабораторий на партии металлолома, несоответствующих санитарно-эпидемиологическим требованиям⁸, увеличивает риск возникновения радиационных аварий, связанных с переплавкой металлолома, содержащего ИИИ, и выбросом радионуклидов в окружающую среду в опасных для человека концентрациях.

Таким образом, полученные результаты анализа РА, связанных с нарушением правил сбора и оборота металлолома, показали, что существующая отечественная система обеспечения радиационной безопасности населения при заготовке и реализации металлолома сохраняет по настоящее время свою эффективность и актуальность.

С целью предупреждения возникновения РА, связанных с нарушением правил сбора и оборота металлолома, и со-

вершенствования аварийного реагирования органов и организаций Роспотребнадзора рекомендуется:

- усилить надзор за организацией и проведением радиационного контроля организациями, осуществляющими деятельность по заготовке и реализации лома черных и цветных металлов;
- при выявлении радиоактивно загрязненного скрапа в металлоломе проводить дополнительное расследование по установлению местонахождения организации, в которой мог образоваться данный скрап, и круга лиц, осуществлявших переплавку ИИИ, с целью последующего проведения комплексного радиационного обследования населения, территории и оборудования самой организации, а также прилегающих к ней территорий для оценки последствий РА и принятия решения о необходимости проведения защитных мероприятий;
- направлять в Росаккредитацию информацию о зарегистрированных случаях несоответствия протоколов испытаний на партии металлолома фактическим показателям радиационной обстановки, как о факте некомпетентности аккредитованных лиц и их несоответствия критериям аккредитации;
- повысить качество информации о РА, предоставляемой во внеочередных донесениях, путем дополнительного указания следующих данных: радионуклидный состав ИИИ; измеренные на поверхности ИИИ значения МАЭД ГИ; наличие или отсутствие протоколов радиационного контроля на партию металлолома, в которой был выявлен ИИИ.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Громов А.В. – разработка дизайна исследования, обобщение и анализ информации из Базы данных по радиационным авариям и инцидентам, написание текста статьи, формирование окончательного варианта статьи и представление в редакцию журнала.

Библин А.М. – разработка дизайна исследования, анализ литературных данных, представление соответствующих материалов в статью, систематизация и финальное редактирование статьи.

Седнев К.А. – анализ данных, поиск публикаций по теме.

Ахматдинов Р.Р. – анализ данных, поиск публикаций по теме.

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам информационно-аналитического центра и лаборатории аварийного реагирования ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, принимавшим участие в формировании БД РАиА.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора на 2021–2025 гг. «Научное обоснование национальной системы обеспечения санитарно-

⁶Глава 6 СанПиН 2.6.1.993-00 [Chapter 6 SanPiN 2.6.1.993-00 (In Russ.)]

⁷Пункты 3.2 и 3.7 СанПиН 2.6.1.993-00 [Paragraphs 3.2 and 3.7 SanPiN 2.6.1.993-00 (In Russ.)]

⁸Глава 6 СанПиН 2.6.1.993-00 [Chapter 6 SanPiN 2.6.1.993-00 (In Russ.)]

эпидемиологического благополучия, управления рисками здоровью и повышения качества жизни населения России» по теме: «Совершенствование системы мероприятий и нормативно-методической базы по обеспечению аварийной готовности и реагирования органов и организаций Роспотребнадзора при возникновении радиационных аварий различных типов с целью оптимизации радиационной защиты населения Российской Федерации».

Литература

1. Scrap use in the steel industry. URL: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-on-scrap_2021.pdf (Дата обращения: 09.09.2024).
2. SSG-17. Control of orphan sources and other radioactive material in the metal recycling and production industries: specific safety guide. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. 82 p.
3. Попов Е.А. Отрасль лома черных и цветных металлов в России: состояние, проблемы и перспективы развития // Стратегии бизнеса. 2021. Т. 9, № 2. С. 35–41. DOI: 10.17747/2311-7184-2021-2-35-41.
4. Валуев Н.П., Дегтярев С.В., Лысова О.В., Юданов П.М. Анализ чрезвычайных ситуаций, вызванных переработкой металлолома, содержащего радиоактивные вещества // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2018. № 39. С. 46–50.
5. Chang W.P., Chan C.-C., Wang J.-D. 60Co Contamination in Recycled Steel Resulting in Elevated Civilian Radiation Doses // Health Physics. 2007. Vol. 73, № 3. P. 465–472. DOI: 10.1097/00004032-199709000-00004.
6. Thongpraparn T., Chaudakshetrin P., Buranapong P. Lesson learned from Co-60 accident in Thailand // Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine. 2002. Vol. 25. P. 172–174. DOI: 10.1007/BF03178291.
7. Lessons learned from accident investigations. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/008/30008047.pdf (Дата обращения: 09.09.2024).
8. The Radiological Accident in Goiânia. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988. 152 p.
9. The Radiological Accident in Istanbul. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000. 75 p.
10. The Radiological Accident in Samut Prakarn. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002. 52 p.
11. Lessons learned from the radiological accident in Mayapuri, New Delhi, India URL: <https://www.radiographers.org/downloads/Lessons-learned-from-Mayapuri-Accident.pdf> (Дата обращения: 09.09.2024).
12. Sharma S., Sharma R.K., Singh R.K. Mayapuri radiological catastrophe: good practices and the lessons learnt // Current Radiopharmaceuticals. 2022. Vol. 15, № 1. P. 21–31. DOI: 10.2174/1874471014666210118123424.
13. Волков В.Г., Волкович А.Г., Данилович А.С. и др. Подготовка объектов Подольского завода цветных металлов к реабилитации // Атомная энергия. 2010. Т. 109, № 2. С. 89–94.
14. ФГУП «РосРАО» устранило последствия радиационного загрязнения на ПЗЦМ. URL: <https://rosfeo.ru/press-czentr/novosti-fgup-feo/2016/yanvar/fgup-%C2%ABrosrao%C2%BB-ustranilo-posledstviya-radiacionnogo-zagryazneniya-na-pzcm.html> (Дата обращения: 21.09.2024).
15. Громов А.В., Ахматдинов Р.П., Библин А.М., Тютельян О.Е. Сравнительный анализ информации о радиационных авариях в Российской Федерации в 2010–2022 гг. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 122–133. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133.
16. Кириченко И.С., Алексахин А.В., Бабаян П.Д. Особенности и проблемы заготовки и транспортировки металлолома Арктики // Молодой ученый. 2016. Т. 105, № 1. С. 160 – 165.
17. Кириченко С.А. Морские порты на службе у ломопереработчиков // Рынок вторичных металлов. 2007. № 3. С. 30 – 35.
18. Сви́дeрcкий Н.Г. Анализ чрезвычайных ситуаций, вызванных переработкой металлолома, содержащего радиоактивные вещества // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. 2020. Т. 6, № 2. С. 386–389.
19. Романович И.К. Особенности аварийного реагирования при радиационных авариях на нерадиационных объектах (на примере аварии на электростальском заводе тяжелого машиностроения). URL: <https://present5.com/o-sobennosti-avarijnogo-reagirovaniya-pri-radiacionnyh-avariyah-na-neradiacionnyh/> (Дата обращения: 04.10.2024).
20. Романович И.К., Ахматдинов Р.П., Ахматдинов Р.П. и др. Анализ радиационных аварий и инцидентов, зарегистрированных в Российской Федерации за 2012–2016 годы / под ред. А.Ю. Поповой. Материалы ВсеросС. науч.-практ. конф. Актуальные вопросы организации контроля и надзора за физическими факторами. СПб., 2017. С. 343 – 346.

Поступила: 01.11.2024

Громов Алексей Валерьевич – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией аварийного реагирования Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

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

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

Седнев Константин Андреевич – 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

Ахматдинов Руслан Расимович – инженер-исследователь информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Громов А.В., Библин А.М., Седнев К.А., Ахматдинов Р.П. Радиационные аварии, связанные с нарушением правил сбора и оборота лома черных и цветных металлов, в Российской Федерации в 2010–2023 гг. // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 4. С. 117–125. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-117-125

Radiation accidents associated with violation of rules of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous metal scrap in the Russian Federation in 2010–2023

Alexey V. Gromov, Artem M. Biblin, Konstantin A. Sednev, Ruslan R. Akhmatdinov

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

The study presents summary, analysis, and hygienic assessment of data on the radiation accidents related to violations of the rules of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous metal scrap within the Russian, based on data from the Radiation Accidents and Incidents Database of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor on Radiation Safety. The aim of the study was to analyze information on radiation accidents associated with violations in the collection and handling of scrap metal occurring in the Russian Federation over period from 2010 to 2023. A total of 971 radiation accidents related to improper handling of scrap metal were recorded across 41 regions in Russia during the study period. The largest number of the accidents occurred in Vologda (206), Sverdlovsk (178), Khabarovsk (150), Saint Petersburg (116), and Orenburg (52) regions. A negative trend in the accident frequency was observed, with an average annual decline rate of 12%, indicating a steady decrease in occurrences over the last 14 years. The primary sources of radioactive contamination in scrap metal included fragments of various radiation-related equipment, pipes, and technological equipment from the oil and gas industry contaminated with natural radionuclides during use (primarily ^{226}Ra and its salts), as well as devices containing permanent luminescent substances based on ^{226}Ra salts. The identified sources were most commonly associated with the radionuclides ^{226}Ra (63%), ^{137}Cs (12%), ^{60}Co (9%), ^{238}U (9%), with occasional cases involving ^{241}Am , ^{232}Th , and ^{90}Sr . In 66% of cases, the ambient gamma dose equivalent rate on the source surface exceeded $1\text{ }\mu\text{Sv/h}$; in 27% it exceeded $10\text{ }\mu\text{Sv/h}$, in 7% it exceeded $100\text{ }\mu\text{Sv/h}$, and in five cases were in range from 1 to 8.8 mSv/h . It was found that sources of ionizing radiation posing potential health risks to the public have been detected throughout the study period. In 14 cases, radioactive contamination was identified in scrap, indicating accidents of melting down radiation sources without investigation into the circumstances or assessment of potential adverse effects. In most (64%) of the registered radiation accidents, the batches of scrap metal were accompanied by radiation control certificates from accredited laboratories, confirming compliance with sanitary standards and regulations. The analysis of radiation accidents related to violations in the collection and handling of scrap metal revealed that the current domestic system for ensuring radiation safety during the procurement and sale of scrap metal remains effective and relevant. Recommendations for improving emergency response during investigations of such radiation accidents have been provided to the Rospotrebnadzor organizations.

Key words: emergency reports, radiation source, scrap metal, radiation accident, radionuclide.

Authors' personal contribution

Gromov A.V. – development of the study design, generalization and analysis of information from the Radiation Accidents and Incidents Database, writing the text of the article, forming the final version of the article and submission to the journal editorial board.

Biblin A.M. – development of study design, generalization and analysis of data from radiation-hygienic passports of territories, presentation of relevant materials into an article, systematization and final editing of the article.

Sednev K.A. – data analysis, editing of the intermediate version of the article, search for publications on the topic.

Akhmatdinov R.R. – data analysis, editing of the intermediate version of the article, search for publications on the topic.

Acknowledgments

The authors are grateful to the staff of the Information and Analysis Center and the Emergency Response Laboratory of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev who participated in the formation of the Radiation accidents and incidents data bank of the Information and Analytical Center of Rospotrebnadzor data bank.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rospotrebnadzor for 2021–2025: “Scientific substantiation of the national system for ensuring sanitary and epidemiological well-being, managing health risks and improving the quality of life of the population of Russia” on the topic: “Improvement of the system of measures and regulatory and methodological base to ensure emergency preparedness and response of Rospotrebnadzor bodies and organizations in the event of radiation accidents of various types in order to optimize radiation protection of the population of the Russian Federation”.

References

1. Scrap use in the steel industry. Available from: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-on-scrap_2021.pdf (Accessed 09 September 2024).

Alexey V. Gromov

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

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

2. SSG-17. Control of orphan sources and other radioactive material in the metal recycling and production industries: specific safety guide. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2012. 82 p.
3. Popov EA. The Russian industry of ferrous and non-ferrous metal scraps: current situation and prospects. *Strategii biznesa = Business Strategies*. 2021;9(2): 35–41. DOI: 10.17747/2311-7184-2021-2-35-41. (In Russian).
4. Valuev NP, Lysova OV, Yudanov PM, Degtyarev SV. Analysis of emergency situations caused by recycling of containing radioactive substances metal scrap. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2018;4(39): 46–50.
5. Chang WP, Chan C-C, Wang J-D. ⁶⁰Co Contamination in recycled steel resulting in elevated civilian radiation doses. *Health Physics*. 1997;73(3): 465–472. DOI: 10.1097/00004032-199709000-00004.
6. Thongpraparn T, Chaudakshetrin P, Buranapong P. Lesson learned from Co-60 accident in Thailand. *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine*. 2002;25: 172–174. DOI: 10.1007/BF03178291.
7. Lessons learned from accident investigations Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/008/30008047.pdf (Accessed 09 September 2024).
8. The radiological accident in Goiânia. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1988. 152 p.
9. The Radiological Accident in Istanbul. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2000. 75 p.
10. The Radiological Accident in Samut Prakarn. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2002. 52 p.
11. Lessons learned from the radiological accident in Mayapuri, New Delhi, India. Available from: <https://www.radiographers.org/downloads/Lessons-learned-from-Mayapuri-Accident.pdf> (Accessed 09 September 2024).
12. Sharma S, Sharma RK, Singh RK. Mayapuri radiological catastrophe: good practices and the lessons learnt. *Current Radiopharmaceuticals*. 2022;15(1): 21–31. DOI: 10.2174/1874471014666210118123424.
13. Volkov VG, Volkovich AG, Danilovich AS, Lemus AV, Koltyshev SM, Pavlenko VI, et al. Preparation of objects at the Podolsk nonferrous metals works for rehabilitation. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2010;109(2): 89–94 (In Russian).
14. Rehabilitation of objects at the Podolsk nonferrous metals works. Available from: <https://rosfeo.ru/press-czentr/novosti-fgup-feo/2016/yanvar/fgup-%C2%ABrosrao%C2%BB-ustranilo-posledstviya-radiacionnogo-zagryazneniya-na-pzcm.html> (Accessed 21 September 2024) (In Russian).
15. Gromov AV, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Tutelyan OE. Comparative analysis of information on radiation accidents in the Russian Federation in 2010–2022. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 122–133. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133> (In Russian).
16. Kirichenko IS, Aleksakhin AV, Babayan PD. Features and Problems of Scrap Metal Collection and Transportation in the Arctic. *Molodoy uchenyy = Young Researcher*. 2016;105(1): 160–165. (In Russian).
17. Kirichenko SA. Seaports serving scrap processors. *Rynok vtorichnykh metallov = Secondary Metals Market*. 2007;3: 30–35. (In Russian).
18. Romanovich IK. Features of emergency response in case of radiation accidents at non-radiation facilities (on the example of the accident at the Electrostal Heavy Engineering Works. Available from: <https://present5.com/osobennosti-avarijnogo-reagirovaniya-pri-radiacionnyx-avariyax-na-neradiacionnyx/> (Accessed 04 October 2024) (In Russian).
19. Romanovich IK, Akhmatdinov RR, Akhmatdinov RR, Biblin AM, Gromov AV, Repin LV. Analysis of the radiation accidents and incidents, registered in the Russian Federation on 2012–2016. Actual issues of the management of the control and surveillance on the physical factors. Moscow; 2017. P. 343–346. (In Russian).

Received: November 01, 2024

For correspondence: Alexey V. Gromov – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher, Head of the Emergency Response Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: a.gromov@niirg.ru)

Artem M. Biblin – Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, 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

Konstantin A. Sednev – Junior researcher, Ecology laboratory, 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

Ruslan R. Akhmatdinov – Research engineer, Information and 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

For citation: Gromov A.V., Biblin A.M., Sednev K.A., Akhmatdinov R.R. Radiation accidents associated with violation of rules of gathering and recycling of ferrous and non-ferrous metal scrap in the Russian Federation in 2010–2023. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 117–125. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-117-125

Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для компьютерно-томографических исследований всего тела с захватом нижних конечностей пациента

П.С. Дружинина¹, Л.А. Чипига^{1,2,3}, А.В. Водоватов^{1,4}, И.В. Солдатов⁵, З.А. Лантух⁵, К.В. Толкачев⁵

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, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

⁵ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Департамент здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

На сегодняшний день в Российской Федерации существующая методика оценки эффективных доз пациентов при проведении компьютерной томографии в виде коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования предусматривает зону от головы до верхней трети бедра, но не учитывает возможности сканирования всего тела с захватом нижних конечностей. При этом для некоторых нозологий используются протоколы, которые могут захватывать и нижние конечности. Целью исследования было определить коэффициенты перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для компьютерно-томографического сканирования всего тела с захватом нижних конечностей пациента. Коэффициенты для компьютерно-томографического сканирования всего тела с захватом нижних конечностей были определены для выборки компьютерных томографов, которые являются частью аппаратов позитронно-эмиссионной томографии, совмещенных с компьютерной томографией, разных моделей для взрослых и детей различных возрастных групп. В программном обеспечении NCIST 3.0 были рассчитаны поглощенные дозы в органах и тканях с учетом специфики модели аппаратов и длины сканирования. Эффективные дозы определялись в соответствии с методикой, представленной в 60 Публикации МКРЗ и в Нормах радиационной безопасности 99/2009. Отдельного внимания были удостоены коэффициенты перехода от произведения дозы на длину сканирования к поглощенной дозе в матке для возможности прогностической оценки доз в плоде у беременных женщин. В работе представлены усредненные значения полученных эффективных доз, поглощенных доз в матке и коэффициентов перехода по всем рассмотренным моделям аппаратов. Коэффициенты перехода для протоколов с автоматической модуляцией силы тока трубки оказались ниже по сравнению с протоколами без автоматической модуляции силы тока трубки, особенно для детей следующих возрастных групп: 0 лет – в 9 раз, 1 год – в 6 раз, 5 лет – в 5 раз, 10 лет – в 3 раза, 15 лет – в 2 раза; для взрослых различие составило около 20%. Сравнение коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для компьютерно-томографического сканирования зоны всего тела, ограниченной верхней третью бедра, представленные в методических указаниях 2.6.1.3584-19, со значениями, полученными в настоящей работе для зоны всего тела с захватом нижних конечностей без автоматической модуляции силы тока трубки, показало, что для всех возрастных групп, за исключением новорожденных, коэффициенты перехода для зоны сканирования с захватом нижних конечностей ниже представленных в методических указаниях. Использование коэффициентов перехода из методических указаний 2.6.1.3584-19 для компьютерно-томографических исследований всего тела с захватом нижних конечностей будет приводить к существенной переоценке доз пациентов. Рассчитанные коэффициенты перехода от произведения дозы на длину сканирования к поглощенной дозе в матке и от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для компьютерно-томографического исследования всего тела с захватом нижних конечностей для разных возрастных групп пациентов целесообразно использовать для прогностической оценки поглощенной дозы в плоде у беременных женщин и для оценки эффективных доз пациентов.

Ключевые слова: коэффициенты перехода, позитронно-эмиссионная томография, компьютерная томография, эффективные дозы, органические дозы.

Дружинина Полина Сергеевна

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

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

Введение

Вклад гибридных методов диагностики, таких как, например, позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с рентгеновской компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), в общее число рентгенорадиологических исследований, увеличивается каждый год [1].

Наиболее распространенная зона сканирования при ПЭТ/КТ-исследованиях – все тело (от головы до верхней трети бедра)^{1,2}, при этом для некоторых нозологий могут использоваться протоколы с захватыванием нижних конечностей. Такие КТ-исследования могут проводиться как на низкодозовых, так и на высокодозовых протоколах. При этом вклад в дозу пациента от КТ-сканирования выше, чем вклад в дозу от внутреннего облучения от вводимого радиофармпрепарата.

Используемая на сегодняшний день в Российской Федерации методика оценки эффективных доз пациентов при КТ-исследованиях основана на применении коэффи-

циентов перехода (КП) от произведения дозы на длину сканирования (англ. – dose length product) (DLP) к эффективной дозе. Данная методика предусматривает зону сканирования от головы до верхней трети бедра, но не учитывает возможности сканирования всего тела с захватом нижних конечностей. Таким образом, **целью исследования** было разработать коэффициенты перехода от DLP к эффективной дозе для КТ-сканирования всего тела с захватом нижних конечностей пациента.

Материалы и методы

Коэффициенты для КТ-сканирования всего тела с захватом нижних конечностей были определены для выборки КТ-сканеров, которые являются частью ПЭТ/КТ аппаратов разных моделей, для взрослых и детей различных возрастных групп, указанных в таблице 1. Для каждого аппарата отдельно было определены дозы и КП для двух режимов: с автоматической модуляцией силы тока (АМСТ) и без АМСТ [2].

Таблица 1

Режимы сканирования взрослых и детей для КТ-сканеров^a, являющихся частью ПЭТ/КТ аппаратов разных моделей, для КТ-сканирования всего тела с захватом нижних конечностей пациента

[Table 1]

Scanning parameters for adults and children for CT scanners^a which are part of PET/CT devices of different models, for CT scanning of the whole body including lower extremities]

Возрастная группа [Age group]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	С автоматической модуляцией силы тока трубки (TCM strength 0,05) [With automatic tube current modulation (TCM strength 0,05)]	Без автоматической модуляции силы тока трубки [Without automatic tube current modulation]		
		CTDI _{vol, 32} , мГр [CTDI _{vol} , mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	CTDI _{vol, 32} , мГр [CTDI _{vol} , mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
GE LightSpeed (Average), General Electric					
0 лет [0 years]	10	1,2	62,4	10,8	561,6
1 год [1 year]	10	1,8	138,6		831,6
5 лет [5 years]	10	2,4	261,6		1177,2
10 лет [10 years]	10	3,6	496,8		1490,4
15 лет [15 years]	10	5,95 *	977,15 *		1771,2
Взрослые [Adults]	10	7,9 *	1349,45 *		1830,6
Optima 600, General Electric					
0 лет [0 years]	32	0,7	36,4	8	416
1 год [1 year]	32	1	77		616
5 лет [5 years]	32	1,3	141,7		872
10 лет [10 years]	32	1,7	234,6		1104
15 лет [15 years]	32	2,8 *	459,8 *		1312
Взрослые [Adults]	32	3,85 *	655,5 *		1356

¹ Роспотребнадзор. Методические указания МУК 2.6.7.3651-20 "Методы контроля в ПЭТ- диагностике для оптимизации радиационной защиты". 2020. 34 с. [MUK 2.6.7.3651-20 "Quality control methods in PET diagnostics for optimization of radiation protection". Rosпотребнадzor, 2020, 34 p. (In Russ.)]

² Смольячук М.Я., Агафонова О.А., Морозов С.П. Р-36 Рекомендации по проведению и описанию исследований ПЭТ/КТ с 18F-фтордезоксиглюкозой, проводимых за счет средств МГФОМС в рамках территориальной программы города Москвы / Методические рекомендации № 39а. М.: 2017. 26 с. [Smolyarchuk M.Ya., Agafonova O.A., Morozov S.P. R-36 Recommendations for the conduct and description of PET/CT examinations with 18F-fluorodeoxyglucose, carried out at the expense of the Moscow City Compulsory Health Insurance Fund within the framework of the territorial program of the city of Moscow / Methodological recommendations No. 39a. Moscow; 2017. 26 p. (In Russ.)]

Brief reports

Продолжение таблицы 1

Возрастная группа [Age group]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	С автоматической модуляцией силы тока трубки (TCM strength 0,05) [With automatic tube current modulation (TCM strength 0,05)]	Без автоматической модуляции силы тока трубки [Without automatic tube current modulation]		
		CTDI _{vol, 32} , мГр [CTDI _{vol} , mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	CTDI _{vol, 32} , мГр [CTDI _{vol} , mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
Somatom Definition (Average), Siemens					
0 лет [0 years]	10	0,7	36,4	6,7	348,4
1 год [1 year]	10	1,1	84,7		515,9
5 лет [5 years]	10	1,5	163,5		730,3
10 лет [10 years]	10	2,2	303,6		924,6
15 лет [15 years]	10	3,7*	607,7*		1095,5
Взрослые [Adults]	10	4,9*	837,05*		1135,7
Somatom Definition 64 (narrow BF), Siemens					
0 лет [0 years]	10	0,7	36,4	6,5	338
1 год [1 year]	10	1,1	84,7		500,5
5 лет [5 years]	10	1,4	152,6		708,5
10 лет [10 years]	10	2,1	289,8		897
15 лет [15 years]	10	3,6*	591,3*		1066
Взрослые [Adults]	10	4,75*	811,3*		1101,8
Somatom Definition 64 (wide BF), Siemens					
0 лет [0 years]	10	0,9	46,8	8	416
1 год [1 year]	10	1,4	107,8		616
5 лет [5 years]	10	1,8	196,2		872
10 лет [10 years]	10	2,6	358,8		1104
15 лет [15 years]	10	4,45*	730,85*		1312
Взрослые [Adults]	10	5,85*	999,05*		1356
Somatom Emotion 16, Siemens					
0 лет [0 years]	9,6	1,1	57,2	10,2	530,4
1 год [1 year]	9,6	1,7	130,9		785,4
5 лет [5 years]	9,6	2,2	239,8		1111,8
10 лет [10 years]	9,6	3,4	469,2		1407,6
15 лет [15 years]	9,6	5,65*	927,95*		1672,8
Взрослые [Adults]	9,6	7,45*	1272,85*		1728,9
Somatom Emotion 6, Siemens					
0 лет [0 years]	3,6	1,1	57,2	12,2	634,4
1 год [1 year]	3,6	1,6	123,2		939,4
5 лет [5 years]	3,6	2	218		1329,8
10 лет [10 years]	3,6	2,7	372,6		1683,6
15 лет [15 years]	3,6	4,3*	706,1*		1994,7
Взрослые [Adults]	3,6	5,8*	987,65*		2067,9

Возрастная группа [Age group]	Коллимация, мм [Collimation, mm]	С автоматической модуляцией силы тока трубки (TCM strength 0,05) [With automatic tube current modulation (TCM strength 0,05)]	Без автоматической модуляции силы тока трубки [Without automatic tube current modulation]		
		CTDI _{vol, 32} , мГр [CTDI _{vol} , mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	CTDI _{vol, 32} , мГр [CTDI _{vol} , mGy]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
Somatom Emotion Duo, Siemens					
0 лет [0 years]	10	0,9	46,8	8,2	426,4
1 год [1 year]	10	1,4	107,8		631,4
5 лет [5 years]	10	1,8	196,2		893,8
10 лет [10 years]	10	2,7	372,6		1131,6
15 лет [15 years]	10	4,55*	747,25*		1344,8
Взрослые [Adults]	10	6*	1024,8*		1389,9
Somatom Sensation 40, Siemens					
0 лет [0 years]	24	0,6	31,2	6,8	353,6
1 год [1 year]	24	0,9	69,3		523,6
5 лет [5 years]	24	1,1	119,9		741,2
10 лет [10 years]	24	1,5	207		938,4
15 лет [15 years]	24	2,35*	385,85*		1115,2
Взрослые [Adults]	24	3,25*	553,15*		1152,6

* Общие параметры для всех КТ-сканеров: напряжение на трубке – 120 кВ, ток трубки – от 200 до 600 мА, время оборота трубки – 0,5 с, питч – 1 [Common parameters for all CT scanners: tube voltage – 120 kV, tube current – from 200 to 600 mA, tube rotation time – 0.5 s, pitch – 1].

* Значения CTDI_{vol, 32} и DLP₃₂ представленные в программном обеспечении NCICT 3.0 для стандартного дозиметрического фантома 32 см диаметром были усреднены по полу для взрослых и детей 15 лет [CTDI_{vol, 32} and DLP₃₂ values presented in the NCICT 3.0 software for a standard dosimetric phantom with a diameter of 32 cm and averaged by gender for adults and children 15 years old].

Для расчета поглощенных доз в органах использовалась программа NCICT 3.0 [3-5]. При моделировании условий облучения пациента в NCICT 3.0 учитывалась специфика модели томографа и длина сканирования. Длина сканирования соответствовала росту воксельного фантома в программе NCICT: 0 лет – 52 см, 1 год – 77 см, 5 лет – 109 см, 10 лет – 138 см, 15 лет – 161 см (девочка) и 167 см (мальчик), взрослые – 163 см (женщина) и 176 см (мужчина). Поглощенные дозы в органах были определены для фантомов, соответствующих мужчине и женщине каждой возрастной группы [6]. Далее поглощенные дозы в каждой возрастной группе были усреднены по полу.

Эффективная доза определялась в соответствии с методикой, представленной в 60 Публикации МКРЗ [7] и НРБ 99/2009³.

Коэффициенты перехода от DLP к эффективной дозе были определены для каждой модели аппарата согласно выражению (1) для стандартного дозиметрического фантома диаметром 32 см:

$$КП_{eff/DLP} = E_{eff}/DLP_{32}, \text{ мЗв/(мГр-см)}, \quad (1)$$

где: E_{eff} – эффективная доза пациента соответствующей возрастной группы, мЗв;

DLP_{32} – усредненное по полу значение произведения дозы на длину сканирования для стандартного дозиметрического фантома 32 см, мГр-см (табл. 1).

Отдельно были разработаны коэффициенты перехода от DLP_{32} к поглощенной дозе в матке для возможности prognostic оценки доз в плоде у беременных женщин. Согласно работе [8], поглощенные дозы в матке являются хорошим эквивалентом поглощенной дозы эмбриона или плода.

Коэффициенты перехода от DLP к поглощенной дозе в матке были определены согласно выражению (2):

$$КП_{D/DLP} = D/DLP_{32}, \text{ мЗв/(мГр-см)}, \quad (2)$$

где: D – поглощенная доза в матке у соответствующей возрастной группы, мЗв;

DLP_{32} – значение произведения дозы на длину сканирования для фантома взрослой женщины и фантома подростка женского пола возрастной группы 15 лет, мГр-см.

Итоговые значения эффективных доз, поглощенных доз в матке, коэффициентов перехода от DLP к поглощенной дозе в матке, коэффициентов перехода от DLP к эффективной дозе были определены как средние значения выборок данных величин, полученных на всех рассмотренных моделях аппаратов.

³ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 N 47 «Об утверждении СанПиН 2.6.1.2523-09» (вместе с «НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. Санитарные правила и нормативы») (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 N 14534). [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated July 7, 2009 N 47 “On approval of SanPiN 2.6.1.2523-09” (together with “NRB-99/2009. SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation safety standards. Sanitary rules and regulations”) (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 14, 2009 N 14534). (In Russ.)]

Результаты

Поглощенные дозы в матке, эффективные дозы, коэффициенты перехода от DLP_{32} к эффективной дозе, а также коэффициенты перехода от DLP_{32} к поглощенной дозе в матке для КТ-исследований всего тела с захватом нижних конечностей пациента представлены в таблице 2.

Коэффициенты перехода от DLP_{32} к эффективной дозе и коэффициенты перехода от DLP_{32} к поглощенной дозе в матке, представленные в таблице 2, даны с учетом усред-

нения параметров сканирования девяти моделей ПЭТ/КТ аппаратов и DLP_{32} между мужчинами и женщинами (для взрослых и детей 15-ти лет).

Вариабельность коэффициентов перехода среди аппаратов была небольшой и составила – для $KP_{eff/DLP}$ 1,5%; для $KP_{D/DLP}$ – 0,1%. Вариабельность эффективных доз среди всех возрастных групп среди аппаратов составила 25-29%. Вариабельность поглощенных доз в матке среди аппаратов составила 28% для детей 15 лет и 25% для взрослых.

Таблица 2

Поглощенные дозы в матке, эффективные дозы, коэффициенты перехода от DLP_{32} к эффективной дозе, а также коэффициенты перехода от DLP_{32} к поглощенной дозе в матке для КТ-исследований всего тела с захватом нижних конечностей для разных возрастных групп пациентов

[Table 2]

Absorbed doses in uterus, effective doses, conversion coefficients from DLP_{32} to effective dose, conversion coefficients from DLP_{32} to absorbed dose in uterus for CT-examinations of whole body including lower extremities for different age groups of patients

Область исследования [Scan area]	Возраст пациента, годы [Age of patient, years]					Взрослые [Adults]
	0 – 0,5	0,5 – 2	2 -7	7 – 12	12 – 17	
32 см фантом [32 cm phantom]						
С автоматической модуляцией силы тока трубки (TCM strength 0,05) [With automatic tube current modulation (TCM strength 0,05)]						
Эффективная доза, мЗв* [Effective dose, mSv*]	0,26±0,07 (0,18 – 0,35)	0,56±0,14 (0,38 – 0,76)	0,90±0,23 (0,58 – 1,26)	1,72±0,48 (1,03 – 2,47)	4,42±1,27 (2,5 – 6,34)	7,28±2,04 (4,24 – 10,43)
Поглощенная доза в матке, мГр* [Absorbed dose in uterus, mGy*]	–	–	–	–	3,08±0,88 (1,76 – 4,41)	5,21±1,30 (3,3 – 7,24)
КП _{eff/DLP} мЗв/(мГр·см)** [CC _{eff/DLP} mSv/(mGy·cm)**]	0,0057 ± 0,0001	0,0055 ± 0,00003	0,0048 ± 0,00002	0,005 ± 0,00001	0,0065 ± 0,000005	0,0077 ± 0,00003
КП _{D/DLP} мЗв/(мГр·см)** [CC _{D/DLP} mSv/(mGy·cm)**]	–	–	–	–	0,0049 ± 0,00001	0,0071 ± 0,000004
Без автоматической модуляции силы тока трубки [Without automatic tube current modulation]						
Эффективная доза, мЗв* [Effective dose, mSv*]	23,7±5,5 (17,9 – 29,7)	23,1±5,4 (17,5-29,01)	21,6±5,1 (16,3-30,7)	19,05±4,5 (14,4- 27,0)	16,74±3,9 (12,7-23,8)	14,9±3,4 (12,2-22,3)
Поглощенная доза в матке, мГр* [Absorbed dose in uterus, mGy*]	–	–	–	–	11,1±2,6 (8,4-15,7)	9,96±2,5 (7,2-12,6)
КП _{eff/DLP} мЗв/(мГр·см)** [CC _{eff/DLP} mSv/(mGy·cm)**]	0,053 ± 0,0001	0,0349 ± 0,00001	0,0231 ± 0,000003	0,0161 ± 0,000003	0,0119 ± 0,00002	0,0104 ± 0,001
КП _{D/DLP} мЗв/(мГр·см)** [CC _{D/DLP} mSv/(mGy·cm)**]	–	–	–	–	0,008 ± 0,000002	0,0072 ± 0,0012

* Данные представлены в формате: среднее значение±SD (минимальное значение – максимальное значение) [Data are presented in the format: mean value±SD (minimum value – maximum value)].

** Данные представлены в формате: среднее значение±SD [Data are presented in the format: mean value±SD].

Обсуждение

На рисунке 1 представлено сравнение средних значений коэффициентов перехода при сканировании всего тела (с захватом нижних конечностей), полученных в данной работе для протоколов с автоматической модуляцией силы тока (АМСТ) и без АМСТ. Для сравнения приведены коэф-

фициенты перехода из МУ 2.6.1.3584-19⁴ при КТ-сканировании, ограниченном верхней третью бедра.

Коэффициенты перехода зависят от автоматической модуляции силы тока. КП для протоколов с АМСТ оказались ниже по сравнению с протоколами без АМСТ, особенно для детей: для детей возрастной группы 0 лет – в 9 раз, для детей возрастной группы 1 года – в 6 раз, для детей

⁴ Методические указания МУ 2.6.1.3584-19 "Изменения в МУ 2.6.1.2944-19 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований». [Guidelines MU 2.6.1.3584-19 "Changes to MU 2.6.1.2944-19 "Control of effective radiation doses to patients during medical x-ray examinations". (In Russ.)].

возрастной группы 5 лет – в 5 раз, для детей возрастной группы 10 лет – в 3 раза, для детей возрастной группы 15 лет – в 2 раза, для взрослых различие не такое существенное и составило 20%. Протоколы с автоматической силой тока позволяют снижать поглощенную дозу в радиочувствительных органах, что приводит к значительному снижению КП. Для младшей возрастной категории, где наблюдалось наибольшее различие, было проведено сопоставление доз в органах, полученных в режиме АМСТ и без АМСТ, для этого дозы в органах для каждой модели КТ бы-

ли нормированы на значения эффективных доз (рис. 2). Представленные разбросы поглощенных доз в органах, отнесенных к эффективным дозам, позволяют оценить как изменяются дозы в радиочувствительных органах с измерением профиля дозы в режиме АМСТ и без АМСТ. Полученные отношения демонстрируют, что АМСТ приводит к снижению относительных поглощенных доз в следующих радиочувствительных органах: тимус – в среднем на 9%, головной мозг – 7%, щитовидная железа – 14%; пищевод – 7%, легкие – 7%, молочная железа – 7%, гонады у мужчин – 15%.

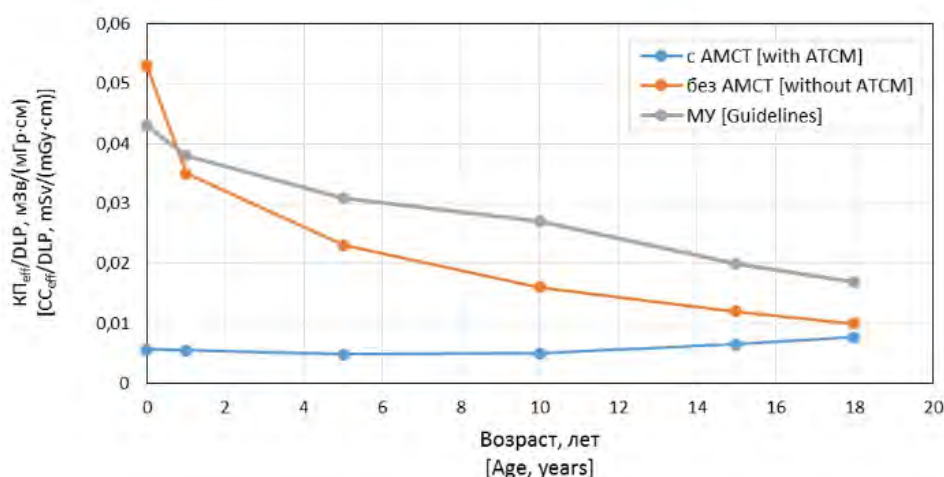


Рис. 1. Сравнение средних значений коэффициентов перехода при сканировании всего тела (с захватом нижних конечностей), полученных в данной работе для протоколов с автоматической модуляцией силы тока (АМСТ) и без АМСТ
[Fig. 1. Comparison of the average values of conversion coefficients for whole body scanning (including lower limbs) for protocols with automatic tube current modulation (ATCM) and without ATCM]

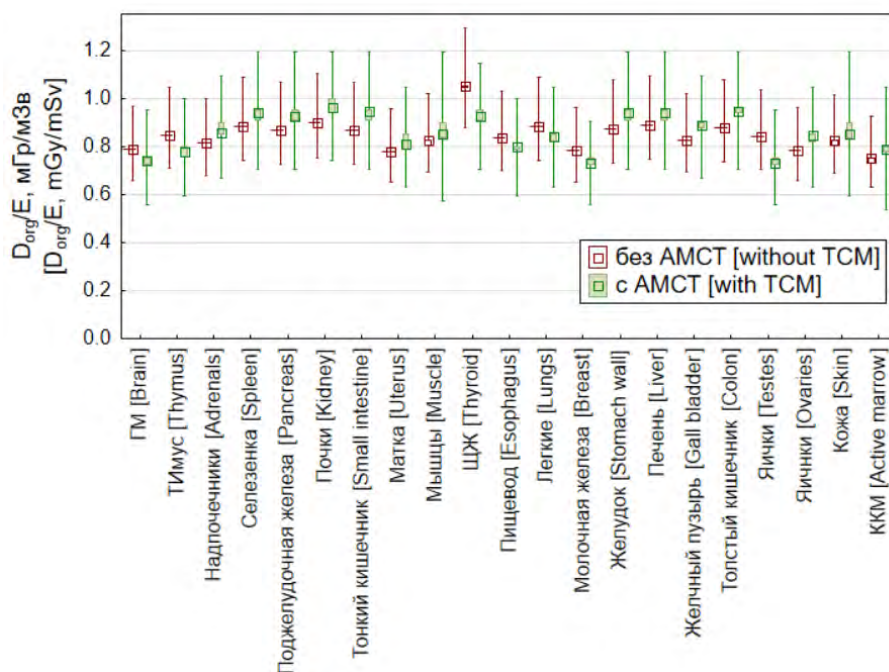


Рис. 2. Сопоставление доз в органах, полученных в режиме АМСТ и без АМСТ, нормированных для каждой модели КТ на значения эффективных доз для младшей возрастной группы
[Fig. 2. Comparison organ doses received with ATCM and without ATCM, normalized for each CT scanner to the values of effective doses for the younger age group]

Сравнение КП от DLP_{32} к эффективной дозе для КТ-сканирования зоны всего тела, ограниченной верхней третью бедра, представленные в МУ 2.6.1.3584-19, со значениями, полученными в настоящей работе для зоны всего тела с захватом нижних конечностей (рис. 2) без АМСТ, показало, что для всех возрастных групп, за исключением новорожденных, КП для зоны сканирования с захватом нижних конечностей ниже КП, представленных в МУ. Это объясняется существенным увеличением зоны сканирования за счет длины ног и, соответственно, увеличения значения DLP , при том, что изменение эффективной дозы будет несущественным, т.к. в обоих случаях все радиочувствительные органы входят в зону сканирования. Использование КП из МУ 2.6.1.3584-19 для КТ-исследований всего тела с захватом нижних конечностей будет приводить к существенной переоценке доз пациентов. Для новорожденных детей длина сканирования и значение DLP не сильно изменяется при захвате нижних конечностей за счет короткой длины ног и их позиционирования (О-образная форма, колени согнуты и развернуты наружу) и не влияет на значение КП. Значение КП, полученное в работе для этой возрастной категории, оказалось незначительно выше (в пределах 20%), по сравнению со значением КП, представленным в МУ. Такое различие может объясняться разной методологией определения КП в разных исследованиях и учетом разных моделей аппаратов.

Полученные в работе коэффициенты перехода учитывают разные модели КТ-аппаратов, используемых в ПЭТ/КТ сканерах, и могут быть использованы для оценки эффективных доз пациентов при КТ-сканировании всего тела с захватом нижних конечностей при ПЭТ/КТ-исследованиях. При этом стоит обращать внимание на активацию функции АМСТ в протоколе КТ-сканирования.

Заключение

Рассчитанные коэффициенты перехода от DLP_{32} к поглощенной дозе в матке и от DLP_{32} к эффективной дозе для КТ-исследования всего тела с захватом нижних конечностей для разных возрастных групп пациентов целесообразно использовать для оценки эффективных доз пациентов и для прогностической оценки поглощенной дозы в плоде у беременных женщин. Полученные коэффициенты могут использоваться персоналом отделений ПЭТ-диагностики для оценки доз у пациентов при проведении сканирования всего тела с захватом нижних конечностей, и могут быть включены в нормативно-методические документы при их пересмотре.

Использование коэффициентов перехода, представленных в МУ 2.6.1.3584-19, для КТ-исследований всего тела (с захватом нижних конечностей) будет приводить к существенной переоценке эффективных доз пациентов.

Полученные коэффициенты перехода могут быть использованы для моделей аппаратов, не рассмотренных в данном исследовании, если параметры сканирования этих аппаратов существенно не отличаются от представленных в таблице 1. В ином случае целесообразно рассчитывать специфические коэффициенты перехода для определенных параметров и моделей аппаратов.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Дружинина П.С. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Чипига Л.А. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, осуществление общего научного руководства исследованием, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнал.

Водоватов А.В. – обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы, редакция промежуточного варианта статьи.

Солдатов И.В. – обсуждение и анализ результатов работы, редакция промежуточного варианта статьи.

Лантух З.А. – обзор литературы, редакция промежуточного варианта статьи.

Толкачев К.В. – обзор литературы, редакция промежуточного варианта статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Чипига Л.А., Ладанова Е.Р., Водоватов А.В. и др. Тенденции развития ядерной медицины в Российской Федерации за 2015–2020 гг. // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 122–133. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133.
2. Чипига Л.А. Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 104–114. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114.
3. 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. Epub 2015 Nov 26. PMID: 26609995.
4. 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.
5. Chipiga L., Golikov V., Vodovатов A. et al. Comparison of organ absorbed doses in whole-body computed tomography scans of paediatric and adult patient models estimated by different methods // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 195, Issue 3–4. P. 246–256. DOI: 10.1093/rpd/ncab086.
6. Lee C., Lodwick D., Hurtado J. et al. The UF family of reference hybrid phantoms for computational radiation dosimetry // Physics in Medicine and Biology. 2010. Vol. 55, №2. P. 339–363.
7. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1991. № 21. 90 p.
8. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Пивень П.А. и др. Оценка поглощенных доз в плоде при проведении компьютерной томографии органов грудной клетки беременной женщины // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, №3. С. 126–135. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-126-135.

Поступила: 07.07.2024

Дружинина Полина Сергеевна – младший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: druzhininapauline@gmail.com
ORCID: 0000-0003-2921-067X

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; доцент кафедры ядерной медицины и радиационных технологий Национального медицинского исследовательского центра им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-9153-3061

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
ORCID: 0000-0002-5191-7535

Солдатов Илья Владимирович – начальник испытательной лаборатории, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия
ORCID: 0000-0002-4867-0746

Лантух Зоя Александровна – начальник отдела дозиметрического контроля и медицинской физики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

Толкачев Кирилл Владимирович – эксперт отдела дозиметрического контроля и медицинской физики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия
ORCID: 0000-0001-8871-8700

Для цитирования: Дружинина П.С., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Солдатов И.В., Лантух З.А., Толкачев К.В. **Определение коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для компьютерно-томографических исследований всего тела с захватом нижних конечностей пациента // Радиационная гигиена.** 2024. Т. 17, № 4. С. 126–134. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-126-134

Determination of the conversion coefficients from the dose-length product to the effective dose for CT-examinations of the whole body including lower extremities

Polina S. Druzhinina¹, Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Aleksandr V. Vodovатов^{1,4}, Ilya V. Soldatov⁵, Zoya A. Lantukh⁵, Kirill V. Tolkachev⁵

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

² A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

³ V. Almazov National Medical Research Center, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁴ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

⁵ Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

Today in the Russian Federation, the existing method for assessing patients' effective doses during computed tomography in the form of conversion coefficients from the dose-length product provides for the area from the head to the upper third of the femur but does not consider the possibility of scanning the whole body including the lower extremities. In this case, for some nosologies, the lower extremities may be involved. The aim of the study was to develop conversion coefficients from the dose-length product to the effective dose for whole-body computed tomography scanning including the patient's lower extremities. The coefficients for whole-body computed tomography scans (including the lower extremities) were determined for a sample of computed tomography scanners that are part of positron emission tomography combined with computed tomography devices of different models for adults and children of different age groups. In NCICT 3.0 software absorbed organ doses were calculated taking into account the specific model of devices and scan length. Effective doses were determined in accordance with the methodology presented in Publication 60 of the International Commission on Radiological Protection and Radiation Safety Standards 99/2009. Separately, conversion coefficients were developed from the dose-length product to the absorbed dose in uterus to enable predictive assessment of doses in the fetus in pregnant women. The study presents the average values of the received effective doses, absorbed doses in uterus and conversion coefficients for all considered models of devices. Conversion coefficients for protocols with automatic tube current modulation were lower compared to those for protocols without automatic tube current modulation, especially for pediatric patients: for children with an average age of 0 years – 9 times, for children an average age of 1 year – 6 times, for children an average age of 5 years – 5 times, for children an average age of 10 years – 3 times, for children an average age of 15 years – 2 times; for adults the difference was 20%. Comparison of the conversion coefficients from the dose-length product

Polina S. Druzhinina

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

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

to the effective dose for computed tomographic scanning of the whole body area limited to the upper third of the femur, presented in guidelines 2.6.1.3584-19, with the values obtained in this study for the whole body area with the lower extremities without automatic tube current modulation showed that for all age groups, with the exception of newborns, the conversion coefficients for the scanning area with the lower extremities are lower than those presented in the guidelines. Using the conversion coefficients from the Guideline 2.6.1.3584-19 for whole-body computed tomography scanning with the lower extremities will lead to a significant overestimation of patient doses. The calculated conversion coefficients from the dose-length product to the absorbed dose in uterus and from the dose-length product to the effective dose for computed tomography examination of the whole body with the lower extremities for different age groups of patients are suitable for assessing the effective doses of patients and for prognostic estimates of absorbed dose in the fetus in pregnant women.

Key words: conversion coefficients, positron emission tomography, computed tomography, effective doses, organ doses.

Authors' personal contribution

Polina S. Druzhinina – data processing, wrote the manuscript, arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Larisa A. Chipiga – developed the design of the survey, provided general scientific management of the project, data processing, wrote the manuscript.

Aleksandr V. Vodovатов – discussion and analysis of the results, editing of the article.

Ilya V. Soldatov – discussion and analysis of the results, editing an interim version of the article.

Zoya A. Lantukh – literature search, editing an interim version of the article.

Kirill V. Tolkachev – literature search, editing an interim version of the article.

Conflict of interests

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

References

1. Chipiga LA, Ladanova ER, Vodovатов AV, Zvonova I., Mosunov AA, Naurzbaeva LT, et al. Trends in the development of nuclear medicine in the Russian Federation for 2015–2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 122-133. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133.
2. Chipiga LA. Evaluation of tube current modulation programmes for the optimization of scan protocols in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 104-114. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-104-114.
3. Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: 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.
4. Chipiga LA. A comparison of computational methods for estimation of effective and organ doses to the patients from CT examination. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 56-64. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2017-10-1-56-64.
5. Chipiga L, Golikov V, Vodovатов A, Bernhardtsson Ch. Comparison of organ absorbed doses in whole-body computed tomography scans of paediatric and adult patient models estimated by different methods. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 246–56. DOI: 10.1093/rpd/ncab086.
6. Lee C, Lodwick D, Hurtado J, Pafundi D, Williams JL, Bolch WE. The UF family of reference hybrid phantoms for computational radiation dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*. 2010;55(2): 339–363.
7. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1991;21: 90.
8. Vodovатов AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126-35. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-3-126-135.

Received: July 07, 2024

For correspondence: Polina S. Druzhinina – Junior research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: druzhininapauline@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-2921-067X

Larisa A. Chipiga – Candidate of Engineering Sciences, Research fellow, Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; research fellow, A. Granov Russian Research Center of Radiology and Surgical Technologies, Ministry of Healthcare of the Russian Federation; docent, V. Almazov National Medical Research Centre, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0001-9153-3061

Aleksandr V. Vodovатов – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory of radiation hygiene of medical facilities, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

Ilya V. Soldatov – Head of the testing laboratory, Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-4867-0746

Zoya A. Lantukh – Head of the Department of Dosimetric Monitoring and Medical Physics, Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health, Moscow, Russia

Kirill V. Tolkachev – Expert of the department of dosimetric monitoring and medical physics, Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-8871-8700

For citation: Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Vodovатов A.V., Soldatov I.V., Lantukh Z.A., Tolkachev K.V. Determination of the conversion coefficients from the dose-length product to the effective dose for CT-examinations of the whole body including lower extremities. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 4. P. 126–134. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-126-134

Академик РАН УШАКОВ Игорь Борисович. К 70-летию со дня рождения



28 октября 2024 г. исполнилось 70 лет доктору медицинских наук, профессору, академику РАН генерал-майору медицинской службы в отставке Ушакову Игорю Борисовичу.

И.Б. Ушаков родился в г.Таллине Эстонской ССР. В 1977 г. окончил с отличием Военно-медицинскую академию имени С.М. Кирова. Прошел все ступени научного роста в Государственном научно-исследовательском испытательном институте авиационной и космической медицины МО РФ – от младшего и старшего научного сотрудника, начальника радиобиологической лаборатории, начальника отдела ионизирующих и неионизирующих излучений до заместителя начальника института по научной работе (1992-1999). С 1999 по 2009 годы – начальник Государственного научно-исследовательского испытательного института военной медицины МО РФ. Одновременно в 2005-2010 г. заведовал созданной им кафедрой авиационной и космической медицины Московской медицинской академии им. И.М. Сеченова. Директор Государственного научного центра РФ – Институт медико-биологических проблем РАН (2008-2015). С 2016 по настоящее время – главный научный сотрудник ФГБУ Государственный научный центр РФ – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России.

Научные интересы деятельности И.Б. Ушакова: радиационная гигиена в авиации и космонавтике; проблемы нейрорадиобиологии (ионизирующие и неионизирующие излучения); реактивность и резистентность организма к радиационным и экстремальным стрессорам; экстраполяция экспериментальных радиобиологических данных с животных на человека; комбинированное влияние радиационных и нерадиационных факторов на здоровье и работоспособность человека; экология, гигиена и психофизиология стресса лиц опасных профессий; космическая радиобиология.

До середины 1990-х гг. основными научными направлениями исследований И.Б. Ушакова были проблемы радиационной физиологии и гигиены. В этот период под руководством В.В. Антипова и Б.И. Давыдова он стал и долгие годы остается признанным специалистом в области воздействия ионизирующих и неионизирующих излучений на центральную нервную систему и организм в целом.

Совместно с А.С. Штембергом и А.В. Шафиркиным Игорь Борисович разработал и опубликовал концепцию неспецифической реактивности и резистентности организма животных и человека к различным физическим факторам, включая ионизирующие излучения. Обосновал принципы экстраполяции пострадиационных церебральных эффектов от животных к человеку. Эти научные принципы были основаны на результатах модельных медико-биологических экспериментов и исследований радиационных синдромосходных состояний с участием человека в реальных условиях профессиональной деятельности.

И.Б. Ушаков в 1986–1987 гг. принимал активное участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) – обеспечивал военных вертолётчиков защитой от ионизирующего излучения. Многие экспериментально-теоретические положения, установленные И.Б. Ушаковым ранее в лабораторных условиях, оказались востребованными на практике при проведении широкомасштабных исследований влияния комплекса неблагоприятных факторов на клинко-физиологические показатели у ликвидаторов аварии на ЧАЭС, а также на состояние здоровья населения загрязнённых радиацией территорий. Выполняя возложенные на него, в том числе, функции врача, он ежедневно мониторировал показатели крови, репродуктивной системы и общее психофизиологическое состояние здоровья у ликвидаторов – летного состава экипажей вертолётчиков. Обработав полученные данные, И.Б. Ушаков разработал и опубликовал собственную экологическую концепцию качества жизни людей на экологически неблагоприятных территориях.

Совместно с В.Н. Карповым Игорь Борисович впервые описал типичные гиперболические зависимости вероятностей возникновения и интенсивности неврологических расстройств у животных в зависимости от длительности раздражающего ионизирующего воздействия, а также установил их подобие реакциям на другие воздействия физических факторов (гипоксии, перегрузок, шума и т.д.). Ему удалось обосновать принципы и провести ранжирование по радиационной устойчивости различных поведенческих навыков (от генетически детерминированных до приобретенных и созданных впервые) у нескольких видов лабораторных животных. И.Б. Ушаков, основываясь на этих принципах, разработал способ определения эквивалентных и эффективных уровней отдельных и комбинированных экстремальных воздействий в любой заданный момент времени. В работах И.Б. Ушакова были опубликованы алгоритмы математического многофакторного анализа комбинированных воздействий. В этих работах описаны изменения гематоэнцефалического и других сосудисто-тканевых барьеров, а также водно-солевого обмена мозга при комплексном влиянии неблагоприятных факторов окружающей среды (как ионизирующего излучения, так и других). Была установлена важнейшая роль кислородного обеспечения организма в указанных условиях.



И.Б. Ушаков (второй ряд, в центре) с сотрудниками радиобиологического отдела ГНИИИ военной медицины МО РФ и коллегами на 80-летию своего учителя – профессора Б.И.Давыдова (2008)



На учебно-методическом совещании с профессорско-преподавательским составом кафедры авиационной и космической медицины ПМГМУ им. И.М.Сеченова (2007)



Со студентами и профессорско-преподавательским составом кафедры авиационной и космической медицины ПМГМУ им. И.М.Сеченова у мемориальных досок в ГНИИИ военной медицины МО РФ (2009)

Ушаков И.Б. является автором и соавтором более 900 научных работ, в том числе 29 монографий, руководств и книг по радиобиологии. В частности, он является одним из авторов «Методики прогнозирования работоспособного состояния экипажа космического аппарата после воздействия ионизирующего излучения: Методические указания. ГОСТ 25645.224-90 БРЭКАКП» (1991), главы «Ионизирующая радиация» в российско-американском руководстве «Человек в космическом полете. Космическая биология и медицина» (1998). В итоге 30-летнего изучения проблем космической радиобиологии опубликовал две монографии, в которых сформулировал концепцию радиационной безопасности человека в дальних межпланетных космических полетах. Можно особо отметить его публикации научно-практической направленности: «Действие факторов космического полета на центральную нервную систему. Структурно-функциональные аспекты радиомодифицирующего влияния» (1989), «Радиационное поражение головного мозга» (1991), «Человек в небе Чернобыля: летчик и радиационная авария» (1994), «Радиопротекторы и гипоксия: механизмы комбинированной защиты» (1996), «Чернобыль: радиационная психофизиология и экология человека» (1997), «Экология человека после Чернобыльской катастрофы: радиационный экологический стресс и здоровье человека» (2001), «Радиобиология, радиационная физиология и медицина: словарь-справочник» (2017), «Радиационные риски в авиации: история и современность: монография» (2019), «Космос. Радиация. Человек (Радиационный барьер в межпланетных полетах)» (2021), «Радиация. Авиация, Человек (очерки практической радиобиологии человека)» (2024) и др. Особо стоит отметить фундаментальное издание под совместной редакцией с академиком Л.А. Ильиным – биобиблиографический справочник «Видные отечественные ученые в области радиобиологии, радиационной медицины и безопасности» (2021).

В годы руководства кафедрой в Первом МГМУ им. И.М. Сеченова (с 2005 по 2010) вопросы авиационной радиобиологии достаточно глубоко изучались при преподавании дисциплины «Авиационная и космическая медицина», по его инициативе были разработаны 5 учебников и единственный в стране Атлас по авиационной и космической медицине. Во всех этих изданиях представлены разделы радиационной гигиены и защиты летного состава от ионизирующих и неионизирующих (электромагнитных) излучений.

И.Б. Ушаков – руководитель научной школы по радиационной гигиене в авиации и космонавтике, научный консультант 27 докторов и научный руководитель 30 кандидатов наук, в том числе 15 диссертантов по специальности «Радиобиология». Заслуженный врач РФ (2003), лауреат премий Совета Министров СССР (1990) и Правительства РФ (2004 и 2010, руководитель обеих работ). Член Президиума РАМН (2011-2013), научно-технического совета Военно-промышленной комиссии РФ, Главной медицинской комиссии по освидетельствованию космонавтов, докторского диссертационного совета по медицинским и биологическим наукам ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, научных советов РАН по космосу, по глобальным экологическим проблемам и по радиобиологии.

Академик И.Б. Ушаков – президент Радиобиологического общества РАН (с 2021). Активно участвует в работе многих научных журналов: заместитель главного редактора журнала «Экология человека», член редакционных советов журналов «Радиационная гигиена», «Радиационная биология. Радиоэкология», «Медицина экстремальных ситуаций», «Вестник Российской Военно-медицинской академии», «Безопасность жизнедеятельности»; член редакционных коллегий журналов «Гигиена и санитария», «Медицина труда и промышленная экология», «Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях», «Военно-медицинский журнал», «Госпитальная медицина: наука и практика», «Российский вестник гигиены», «Российский журнал экологической и восстановительной медицины».

Награжден орденом «За военные заслуги» (1999) и многими медалями, среди которых «За спасение погибавших» (1999). Удостоен знаков отличия Федерального космического агентства – «За международное сотрудничество в области космонавтики» (2012), Госкорпорации «Роскосмос» – «К.Э. Циолковского» (2013) и «С.П. Королёва» (2014); Госкорпорации «Росатом» – «Ветеран атомной энергетики и промышленности» (2014); Федерального медико-биологического агентства – «Золотой крест ФМБА России» (2014).



Генерал-майор медицинской службы И.Б.Ушаков (2008)

Чепур Сергей Викторович – начальник, ФГБУ Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации, доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-5324-512X

Иванов Иван Васильевич – старший научный сотрудник, ФГБУ Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины Министерства обороны Российской Федерации, доктор медицинских наук, профессор, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-7729-2724

Резонтов Валерий Александрович – главный научный сотрудник, ФГКУ 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, доктор медицинских наук, профессор, Сергиев Посад, Россия

Гавриш Николай Николаевич – главный научный сотрудник, ФГКУ 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, доктор медицинских наук, Сергиев Посад, Россия

Памяти Генриэтты Владимировны Архангельской – старейшего сотрудника ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, авторитетного ученого в области радиационной гигиены (1931–2024)

18 декабря 2024 года ушла из жизни Архангельская Генриэтта Владимировна, старейший 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 (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), стоявшая у истоков его становления, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии, авторитетный ученый в области радиационной гигиены и высококвалифицированный специалист в области организации информационной работы с населением по вопросам радиационной безопасности, участник ликвидации последствий аварий на ПО «Маяк» и Чернобыльской АЭС.

Генриэтта Владимировна родилась 5 мая 1931 года в г. Пенза. С отличием окончила в 1954 г. Первый Московский ордена Ленина медицинский институт (МОЛМИ) по специальности «Медико-санитарное дело». После окончания аспирантуры на кафедре гигиены труда и промышленной токсикологии МОЛМИ, успешно защитила кандидатскую диссертацию на тему «Материалы к гигиенической оценке производственной пыли пресс-порошков (на основе фенола и формальдегида)».

В декабре 1957 г. кандидат медицинских наук Г.В. Архангельская была направлена на работу в Ленинградский НИИ радиационной гигиены (сейчас ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), где начала свою трудовую деятельность в должности младшего, а с 1959 г. – старшего научного сотрудника лаборатории радиационной защиты. Г.В. Архангельская участвовала во всех знаковых работах института: в период проведения испытаний ядерного оружия в атмосфере принимала участие в экспедиционных работах по отбору проб растительности и продуктов питания населения на труднодоступных северных территориях РСФСР; в 1960-е годы участвовала в изучении экологических последствий радиационной аварии на ПО «Маяк» на Южном Урале; в 1986 г. приняла активное участие в работе по ликвидации медицинских последствий аварии на Чернобыльской АЭС, за что была отмечена правительственной наградой – медалью «За трудовую доблесть».

В 1960-е годы Генриэтта Владимировна изучала метаболизм свежих продуктов ядерного распада в организме человека и экспериментальных животных. Выдающимся достижением этого периода явились работы по изучению метаболизма радиоактивных изотопов йода в организме человека, разработки мер профилактики и защиты для разных возрастных групп населения. В результате этих работ коллективом авторов (Г.В. Архангельская, Ю.О. Константинов, И.А. Лихтарев) под руководством Л.А. Ильина впервые в конце 1960-х годов были разработаны «Руководство по йодной профилактике в случае возникновения радиационных аварий», «Методические указания по защите населения, проживающего вблизи от АЭС в случае аварии», а в 1971 г.



Доктор медицинских наук,
главный научный сотрудник лаборатории экологии
Санкт-Петербургского научно-исследовательского
института радиационной гигиены
имени профессора П.В. Рамзаева

«Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности». Разработанные меры защиты от радиоактивного йода были применены в период аварии на Чернобыльской АЭС и остаются актуальными и в настоящее время. В 1971 году Генриэтта Владимировна успешно защитила докторскую диссертацию на тему: «К проблеме защиты человека от радиоактивного йода».

С 1987 г. Г.В. Архангельская являлась ответственным исполнителем фрагментов Союзной и Республиканской программ по совершенствованию пропаганды радиационно-гигиенических знаний среди населения, в рамках которых являлась ответственным исполнителем восьми научных тем, связанных с изучением социально-психологических последствий радиационных аварий для здоровья населения и с разработкой мероприятий по их снижению. В течение 2009 – 2011 гг. она принимала активное участие в международной программе Союзного государства по смягчению социально-психологических последствий для населения, проживающего на загрязненных территориях России и Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС.

Генриэтта Владимировна в соавторстве с профессором П.В. Рамзаевым и рядом ученых доказали, что основные последствия для населения, проживающего

на загрязненных территориях Беларуси и России, были связаны не с радиационным фактором, а с социально-психологическими последствиями, такими как изменение образа жизни, переселение в новые места проживания, боязнь за здоровье детей и др. Опыт работы ученых позволил обосновать само понятие «радиотревожность».

Г.В. Архангельская была активным популяризатором радиационно-гигиенических знаний и правил безопасного проживания на загрязненных после аварии на Чернобыльской АЭС территориях. С ее участием были разработаны лекции, учебные материалы, программа повышения квалификации по специальности «Радиационная гигиена», проведены обучающие семинары по вопросам радиационной безопасности и правилам проживания на загрязненных территориях для врачей, работников Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, представителей местных властей, специалистов и руководителей.

Итоги научной деятельности Г.В. Архангельской отражены в более чем 300 публикациях, известных в России и за рубежом. За безупречный и добросовестный труд Генриэтта Владимировна награждена: медалями «За трудовую доблесть», «Ветеран труда», «Имени профессора П.В. Рамзаева» и «95 лет Госсанэпидслужбе России»; значком «Отличник здравоохранения»; отмечена почетными грамотами от Министерства здравоохранения Российской Федерации, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева.

Генриэтта Владимировна была высококвалифицированным специалистом, обладающим авторитетом, признанным как в России, так и за ее пределами. Она посвятила более 65 лет Санкт-Петербургскому научно-исследовательскому институту радиационной гигиены, значительно увеличила его научную репутацию, будучи уникальным экспертом в области радиационной гигиены. Яркая, творческая и эрудированная личность в вопросах науки и искусства, Генриэтта Владимировна уделяла большое внимание работе с молодыми учеными и прививала молодежи любовь к активному образу жизни. До последних дней своей жизни Генриэтта Владимировна оставалась преданной науке, принимала участие в исследовательской деятельности института. Ее увлеченность наукой и стремление к новым открытиям служили вдохновением для многих, кто работал рядом с ней.

Уход из жизни такого ученого и человека, как Г.В. Архангельская, – большая невосполнимая потеря для коллег, друзей, родных и близких. Добрая память о Генриэтте Владимировне навсегда останется в наших сердцах.

*Коллектив сотрудников Санкт-Петербургского
научно-исследовательского института радиационной
гигиены им. П.В. Рамзаева*

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 языка!*

– Материалы, представляемые в статье, не должны быть ранее опубликованными в других печатных изданиях. Авторам следует информировать редакцию журнала о том, что какие-то части этих материалов уже опубликованы и могут рассматриваться как дублирующие. В таких случаях в новой статье должны быть ссылки на предыдущие работы. Копии таких материалов прилагаются к рукописи, чтобы редакция имела возможность принять решение, как поступить в данной ситуации. Не допускается направление статей, которые уже напечатаны в других изданиях или представлены для печати в другие издательства.

– 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 35 страниц машинописного текста, оригинальных исследований – 25 страниц, дискуссионных статей – 10, кратких сообщений и заметок из практики – 10 страниц.

В названное количество страниц публикаций входит основной текст рукописи таблицы, рисунки и легенды к ним, а также название, фамилия и инициалы авторов, название учреждений, резюме, ключевые слова, список литературы, References, данные об авторах, их личном вкладе в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования (все вышеперечисленное – на русском и английском языках).

– Текст статьи печатается на одной стороне листа формата А4 шрифтом Times New Roman кеглем 14, с межстрочным ин-

тервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева – 2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

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:

– **Введение (Introduction):** ставится научная проблема и цель статьи.

– **Материалы и методы (Materials and Methods):** даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

– **Результаты исследования и обсуждение (Results and Discussion):** приводятся конкретные авторские результаты исследования.

– **Заключение (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. Центер. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

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 и обсуждение (Results and Discussion). 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) страны производителя. 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 вариабельности 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 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.

Закключение (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, подчерки-

ваются 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:

Журнал «Радиационная гигиена» принимает следующие критерии авторства:

1) существенный вклад в разработку концепции или планирование научной работы либо в получении, анализе или интерпретации данных работы;

2) составление черновика рукописи или его критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания;

3) окончательное утверждение публикуемой версии рукописи;

4) согласие принять на себя ответственность за все аспекты работы и гарантия того, что все вопросы, связанные с точностью и добросовестностью любой части работы, могут быть надлежащим образом исследованы и урегулированы.

В список авторов не включаются люди, не являющиеся авторами статьи. Имена людей, которые не являются авторами, не отвечают всем четырем критериям, но оказали иную поддержку, указывают в разделе «Благодарности».

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 ГОСТ 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 до-

ступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально короткие 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):

¹СанПиН 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.)]

¹МУ 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. 447–486.

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. 553–598.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // *Radiation Measurements*. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25–26 октября 2007. М., 2007. С. 50–51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (Дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия. URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Дата обращения: 16.06.2019).

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. *REJR*. 2018. Т. 8, № 3. С. 60–73. DOI: 10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции // *Радиационная гигиена*. 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосякин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванькович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // *Военный врач*. 1996. № 8 (1332) С. 5.

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

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.

Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorsky GA, Eremin AV. To the justification of requirements to the control of radiation protection indicators for buildings and facilities during their commissioning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 10–15 (In Russian).

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.

Vodovатов AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126–135. (In Russian).

Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevsky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, zdavookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of social hygiene, health care and history of medicine*. 2019;27(Special Issue): 630–636. (In Russian) doi: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636.

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. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(12): 2872–2878. 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. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <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. Canberra ACT: Diabetes Australia: Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed 5 November 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 longterm behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liege, 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 Российской Федерации, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателю. Полный текст авторского договора (оферты) размещен на сайте журнала в разделе «Правила для авторов».

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка по электронной почте журнала в форме присоединенных файлов по адресу: journal@niiirg.ru

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титульный 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, фабрикация или фальсификация 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, (812)2334283.