

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

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 17 № 2, 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 Федераль-
ной службой по надзору за соблюдени-
ем законодательства в сфере массовых
коммуникаций и охране культурного на-
следия. 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 при-
надлежит журналу, авторское право на ста-
тьи 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 без-
опасности населения, расширение сферы
профессионального диалога для российских
и зарубежных исследователей, работающих
в этих и смежных областях науки.

Задачи журнала:

- привлекать внимание к наиболее акту-
альным, перспективным и интересным на-
правлениям научных исследований по те-
матике журнала;
- вовлекать в журнал авторитетных оте-
чественных и зарубежных авторов, являю-
щихся специалистами высочайшего уровня;
- расширять деятельность путем повышения
географического охвата публикуемых мате-
риалов, редакционного совета и редакцион-
ной 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>

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

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 21.06.2024
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 17 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>)



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

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

Башкетова Наталия 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)

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

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

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

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

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)

Ермолина Елена Павловна — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Министерства здравоохранения Российской Федерации; 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.

Corrector A.M. Plaksina
Computer layout A.V. Gnezdilova

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", doctor of medical sciences, docent, honorable physician of the Russian Federation (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

Aleksandr V. Alekhovich — Russian Medical Academy of Postgraduate Education, MD, Professor (Moscow, Russian Federation)

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

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

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

Tat'yana B. Baltrukova — Northwest State Medical University after I.I. Mechnikov (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

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

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

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

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

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

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 Medicine (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 17 № 2, 2024

НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Дроздова Е.А., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кравцова О.С.
Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 3: Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах7

Крестинина Л.Ю., Завьялов Д.А.

Риск развития злокачественных новообразований органов пищеварения, исключая кишечник, в Уральской когорте аварийно-облученного населения18

Силкин С.С., Микрюкова Л.Д.

Риск развития злокачественных новообразований толстого кишечника в Уральской когорте аварийно-облученного населения29

Барковский А.Н., Огородников С.А.

Возможность использования дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией более 10 МэВ38

Голиков В.Ю.

О необходимой толщине стационарной защиты в рентгеновских стоматологических кабинетах46

Толстых Е.И.

Переход от частоты хромосомных транслокаций в Т-лимфоцитах к дозе на костный мозг в отдаленные сроки после внутреннего облучения ^{89}Sr 53

Дружинина П.С., Чипига Л.А., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Беркович Г.В., Солдатов И.В., Лантух З.А., Толкачев К.В.

Совершенствование подхода к расчету стационарной радиационной защиты в кабинетах компьютерной томографии64

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

Консервативная оценка доз внешнего облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии76

Кормановская Т.А., Даричева О.А., Колесник П.А., Кононенко Д.В.

Анализ данных об уровнях облучения населения Ивановской области природными источниками излучения86

Петрякова А.В., Чипига Л.А., Звонова И.А., Водоватов А.В., Горский Г.А., Станжевский А.А.

Проблемы радиационной безопасности при передвижении в общественном транспорте пациента после радионуклидной терапии с ^{131}I 97

Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Репин В.С.

Предпочтительные способы кулинарной обработки лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС109

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Гущина Ю.В., Шандала Н.К., Серегин В.А., Исаев Д.В., Старинский В.Г., Шитова А.А., Филонова А.А.

Радиационное обследование территории села Териберка и острова Кильдин Мурманской области117

ДИСКУССИИ

Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В.

К вопросу регулирования радона в Российской Федерации. Дискуссия по материалам публикации «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению»128

CONTENTS

Vol. 17 № 2, 2024

RESEARCH ARTICLES

Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Drozdova E.A., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S.
Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 3: Radionuclide content in agricultural food products15

Krestinina L.Yu., Zavyalov D.A.

The risk of developing cancer of the digestive organs (excluding intestines) in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort27

Silkin S.S., Mikryukova L.D.

Radiogenic risk of colorectal cancer in the Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort36

Barkovsky A.N., Ogorodnikov S.A.

The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of more than 10 MeV44

Golikov V.Yu.

About the necessary thickness of stationary shield in X-ray dental rooms51

Tolstykh E.I.

Conversion from the frequency of chromosome translocations in T-lymphocytes to the bone marrow dose in the long-term period after internal ^{89}Sr exposure62

Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Berkovich G.V., Soldatov I.V., Lantukh Z.A., Tolkach K.V.

Improving the approach to calculating shielding in computed tomography rooms73

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

Conservative assessment of external radiation dose for staff in the event of radionuclide flaw detection84

Kormanovskaya T.A., Daricheva O.A., Kolesnik P.A., Kononenko D.V.

Analysis of data on levels of public exposure to natural sources of radiation in the Ivanovo region95

Petryakova A.V., Chipiga L.A., Zvonova I.A., Vodovатов A.V., Gorsky G.A., Stanzhevsky A.A.

Radiation safety problems during the patient traveling by public transport after radiopharmaceutical therapy with ^{131}I 106

Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Repin V.S.

Preferred techniques for forest mushrooms cooking by residents of contaminated areas of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident114

RADIATION SAFETY DURING DECOMMISSIONING OF NUCLEAR LEGACY SITES

Gushchina Iu.V., Shandala N.K., Seregin V.A., Isaev D.V., Starinskiy V.G., Shitova A.A., Filonova A.A.

Radiation survey of the territory of Teriberka village and Kildin Island of Murmansk Region126

DISCUSSIONS

Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V.

On the issue of radon regulation in the Russian Federation. Discussion on the materials of the publication "Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation"136

СОДЕРЖАНИЕ

Том 17 № 2, 2024

РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Конonenko 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 1 138

Рамзаев В.П., Репин В.С.

Радиоактивные стекловидные включения в почве, отобранной на месте проведения мирных подземных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия) 148

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» 160

CONTENTS

Vol. 17 № 2, 2024

RADIATION MEASUREMENTS

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 1 146

Ramzaev V.P., Repin V.S.

Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the "Taiga" peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia) 148

JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS 160

Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 3: Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах¹

И.К. Романович¹, А.Б. Базюкин¹, А.А. Братилова¹, Г.Я. Брук¹, Е.А. Дроздова¹, Т.В. Жеско¹,
М.В. Кадука¹, О.С. Кравцова²

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 Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

В третьей статье цикла публикаций, посвященных результатам изучения современной радиационной обстановки на приграничных с Республикой Беларусь территориях Брянской области, приведены результаты исследований содержания радионуклидов (¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr) в пробах сельскохозяйственных пищевых продуктов, произведенных в личных подсобных хозяйствах населения. Исследованы особенности изменения содержания ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в пробах коровьего молока и картофеля в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории и определены современные значения величин, характеризующих распределение отношений концентрации радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах к плотности радиоактивного загрязнения почвы обследуемой территории. Проведен анализ соотношения средних значений концентрации ¹³⁷Cs в молоке стойлового и выпасного периодов содержания крупного рогатого скота. По результатам исследования выявлено, что радиологическому критерию безопасности не соответствует часть образцов молочной продукции (менее 1%). В исследованных образцах картофеля, овощей и мяса сельскохозяйственных животных превышений гигиенических нормативов не обнаружено.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, население, внутреннее облучение, цезий-137, стронций-90, сельскохозяйственные пищевые продукты.

Введение

Данная публикация является продолжением цикла статей, посвященных результатам исследований, проведенных в период 2019–2022 гг. по изучению современной радиационной обстановки на приграничных с Республикой Беларусь территориях Российской Федерации (РФ) в ходе реализации мероприятий «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации тер-

риторий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»² (далее – Программа) [1, 2]. В статье приводятся результаты исследований содержания ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в образцах сельскохозяйственных пищевых продуктов местного производства.

В исследованиях, проведенных за последние годы на территориях, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), отмечается неравномерный темп снижения содержания ¹³⁷Cs

¹ Продолжение. Начало статьи опубликовано в журнале «Радиационная гигиена». 2023. Т. 16, № 3 [1] и № 4 [2] [The continuation. The beginning was published in the Radiation Hygiene in 2023 [1; 2]].

² Постановление Совета министров Союзного государства от 29 августа 2019 № 8 «О Программе совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» [Decree of the Council of Ministers of the Union State No. 8, August 29, 2019 "On the Program of joint activities of Russia and Belarus within the framework of the Union State to protect the population and rehabilitate territories affected by the disaster at the Chernobyl nuclear power plant" (In Russ.)].

Братилова Анжелика 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: bratilova@gmail.com

в почвенном слое пахотных угодий, а значит, и в сельскохозяйственной продукции [3]. Оцененные эффективные периоды полуснижения содержания ^{137}Cs в картофеле, выращенном в юго-западных районах Брянской области, варьируют от 10 до 27 лет, что объясняется различиями физико-химическими характеристиками почвы территории и особенностями проведенных на конкретных сельскохозяйственных угодьях защитных мероприятий. Однако, наряду с естественным снижением содержания ^{137}Cs в местных пищевых продуктах, может наблюдаться и рост данного показателя, как, например, для картофеля, производимого в настоящее время в Злынковском районе Брянской области [3]. Данный факт можно объяснить падением плодородия почв территории, связанным с прекращением реализации на ней защитных мероприятий, в том числе внесения удобрений.

Более сложная ситуация наблюдается в отношении динамики содержания радионуклидов в кормовых культурах. Если овощная продукция юго-западных районов Брянской области уже продолжительное время соответствует требованиям радиационной безопасности [4, 5], то в растительности, предназначенной для корма сельскохозяйственным животным, и в настоящее время обнаруживаются значительные превышения допустимых уровней содержания цезия [6]. По прогнозным оценкам ожидается, что превышения гигиенических нормативов содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных, выращенных на юго-западных территориях области, где проводились защитные мероприятия, перестанут фиксироваться не ранее 2030 г. [6, 7].

По результатам белорусского исследования перехода ^{137}Cs в растения пойменных лугов р. Сож Гомельской области показан высокий градиент загрязнения почвы пойменных земель. Оцененные граничные значения плотности загрязнения ^{137}Cs пойменных участков в пределах окрестностей исследованного населенного пункта (НП) различаются почти в 5 раз, а в луговых травах – в 14 раз [8].

Из приведенных сведений следует, что в настоящее время на загрязненных в результате чернобыльской аварии территориях Брянской области радионуклиды продолжают поступать в организм жителей через потребление сельскохозяйственных пищевых продуктов местного происхождения.

Цель исследования – дать аналитическую характеристику современным уровням радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных пищевых продуктов местного производства.

Материалы и методы

Исследования содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственных пищевых продуктах, произведенных населением в личных подсобных хозяйствах (ЛПХ), выполнены в рамках осуществления комплексных радиационно-гигиенических обследований НП юго-западных районов Брянской области в период 2019–2022 гг. [1].

С целью определения уровней поступления ^{137}Cs в организм жителей НП обследованных территорий был организован отбор образцов наиболее представительных для данной местности сельскохозяйственных пищевых продуктов [1], а также проведен опрос жителей о структуре их рациона питания [2]. Образцы пищевых продуктов отбирали на протяжении всего календарного года в течение выше обозначенного периода проведения исследований. Для получения более полной информации о содержании радиоактивных веществ в пищевых продуктах были собраны и обобщены результаты радиационного мониторинга, проводимого в НП учреждениями Роспотребнадзора в тот же период времени.

Отбор проб пищевых продуктов из ЛПХ жителей и определение в них содержания радионуклидов (в рамках комплексного обследования – ^{137}Cs , в рамках радиационного мониторинга – ^{137}Cs и ^{90}Sr) проводили в соответствии с действующими методическими документами^{3,4,5,6}. Измерения счетных образцов проводили на радиометрическом и спектрометрическом оборудовании (гамма-спектрометрические комплексы «Прогресс» (НПП «Доза», Россия) и МКС-01А «Мультирад» («НТЦ «Амплитуда», Россия), альфа-бета-радиометры для измерения малых активностей УМФ-2000 (НПП «Доза», Россия). Данные о плотности загрязнения почвы территории НП были предоставлены Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее – Росгидромет).

Расчеты, обработку и статистический анализ данных проводили с использованием MS Excel, пакетов статистической обработки среды программирования R (CRAN), платформы статистического анализа JASP.

³ Методические рекомендации по санитарному контролю за содержанием радиоактивных веществ в объектах внешней среды / под ред. А.Н. Мареев, А.С. Зыковой. М.: Вторая типография МЗ СССР, 1980 [Marey AN, Zykova AS, Eds. Methodical guidelines for sanitary control over the content of radioactive elements in environmental objects. Moscow: Second Printing House of the Ministry of Health of the USSR; 1980. (In Russ.)]

⁴ МУК 4.3.2504-09 Цезий-137. Определение удельной активности в пищевых продуктах. М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 24 с. [МУК 4.3.2504-09. Caesium-137. Determination of specific activity in food products. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2009. 24 p. (In Russ.)]

⁵ МУК 2.6.1.1194-03. Радиационный контроль. Стронций-90 и Цезий-137. Пищевые продукты. Отбор проб, анализ и гигиеническая оценка. М., 2003 [МУК 2.6.1.1194-03. Radiation control. Strontium-90 and caesium-137. Food products. Sampling, analysis and hygienic assessment. Methodical guidelines. Moscow; 2003. (In Russ.)]

⁶ МР 2.6.1.0094-14. Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах. М., 2014. [MR 2.6.1.0094-14. Radiochemical determination of the specific activity of caesium-137 and strontium-90 in samples of food products, soil, other environmental objects and bioassays. Methodical guidelines. Moscow; 2014. (In Russ.)]

Результаты и обсуждение

В рамках комплексных радиационно-гигиенических обследований НП приграничных территорий в 2019–2022 гг. [1] проведены исследования содержания ^{137}Cs в пробах сельскохозяйственных пищевых продуктов из 238 НП с плотностью радиоактивного загрязнения⁷ почвы территории НП (далее – σ^{137}) до 1,85 МБк/м². Во всех обследованных НП с плотностью радиоактивного загрязнения⁸ почвы до 1,85 МБк/м² максимальные значения содержания радионуклида в пробах картофеля и овощей (порядка 860 проб) не превышали 50 Бк/кг, в пробах овощной зелени (25 проб) – 25 Бк/кг. Содержание ^{137}Cs в луке репчатом и наземных овощах ниже, чем в корнеплодах (морковь, свекла) и в клубнеплодах (картофеле), что объясняется межвидовыми различиями в способности накапливать ^{137}Cs [10]. Различная способность к аккумуляции ^{137}Cs наблюдается и среди листовых овощей: значения удельной активности ^{137}Cs в исследованных пробах садового щавеля варьировали от 7 до 25 Бк/кг, в пробах прочей листовой зелени (лук-перо, укроп, петрушка, салат листовой) содержание данного радионуклида не превышало 10 Бк/кг. Такая особенность щавеля объясняется тем, что щавелевая кислота, содержащаяся в этом растении, способствует ослаблению прочности поглощения радионуклида почвой, в связи с чем щавель не рекомендован к культивированию на дерново-подзолистых заболачиваемых почвах с радиоактивным загрязнением по ^{137}Cs свыше 185 кБк/м² [11].

Превышения допустимых уровней (ДУ) содержания ^{137}Cs были выявлены только в 2 пробах сельскохозяйственных пищевых продуктов животного происхождения. Удельная активность ^{137}Cs в пробе коровьего молока из д. Батуровка Красногорского района ($\sigma^{137} \approx 450$ кБк/км²) составила 116 Бк/кг при значении допустимого уровня для данного вида продукта 100 Бк/кг⁹, в пробе козьего молока из г. Клинцы ($\sigma^{137} \approx 150$ кБк/м²) – 106 Бк/кг. Из исследованных проб мяса сельскохозяйственных животных наиболее высокое содержание ^{137}Cs (почти 100 Бк/кг) выявлено в мясе крупного рогатого скота (КРС) из НП с плотностью σ^{137} , равной 370 кБк/м², однако и это значение ниже установленного допустимого уровня (200 Бк/кг). Содержание ^{137}Cs в пробах куриных яиц не превысило 25 Бк/кг, что тоже удовлетворяет требованиям радиационной безопасности.

Обобщение данных о содержании ^{137}Cs в пищевых продуктах, полученных в рамках работ по обследо-

ванию приграничных НП, с данными радиационно-гигиенического мониторинга, проводимого учреждениями Роспотребнадзора в этих же НП Брянской области в 2019–2022 гг., позволило расширить массив информации и дать более полную характеристику радиологической ситуации (табл. 1). Анализ обобщенного массива данных показал, что превышение ДУ содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах наблюдается только для проб местного коровьего и козьего молока; доля проб с превышением составила около 1% от всех исследованных.

Пробы молока, не соответствующие требованиям радиационной безопасности по содержанию ^{137}Cs (100 Бк/кг¹⁰) были выявлены в НП из городского округа «город Клинцы», Клиновского и Красногорского районов области. 4 пробы коровьего молока с превышением ДУ по ^{137}Cs поступили с территорий, находящихся в границах плотности радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs (σ^{137}) от 37 до 555 кБк/м², 1 проба козьего молока – с территории с σ^{137} от 37 до 185 кБк/м², 7 проб коровьего молока – с территории с σ^{137} от 185 до 555 кБк/м². Согласно данным по структуре групп почв пастбищных и сенокосных угодий, во всех этих НП присутствуют целинные участки с торфяно-болотными почвами.

В картофеле, в овощной продукции и в мясе сельскохозяйственных животных из ЛПХ населения образцов продуктов, не удовлетворяющих радиологическим критериям безопасности, не обнаружено. Содержание ^{90}Sr в исследованных образцах молока и картофеля значительно ниже установленных в России допустимых уровней¹¹ содержания данного радионуклида в пищевой продукции.

Графическое представление распределений значений удельной активности ^{137}Cs в пробах коровьего молока (рис. 1, фрагмент а) и в пробах картофеля (рис. 1, фрагмент б) демонстрирует статистически значимую зависимость увеличения концентрации ^{137}Cs в пищевом продукте с увеличением плотности загрязнения почвы σ^{137} (коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен 0,42 ($p < 0,05$) для коровьего молока и 0,68 для картофеля ($p < 0,05$)). Схематичное изображение статистических характеристик распределений данных на диаграмме размаха (таких как медиана, нижний и верхний квартили) позволяет проследить наличие нетипичных (аномальных) для общего распределения значений. Для проб молока доля таких значений, определенная с использованием метода Тьюки (критерий – полтора межквартильного расстояния) [12], для НП с плотностью загрязнения σ^{137} от

⁷ Здесь и далее – по данным Росгидромет о средней плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории населенного пункта по состоянию на год выполнения исследования, если не оговорено иное [The ^{137}Cs soil surface activity in settlements data is hereafter given as at 01/01/2022 by Rosgidromet], unless otherwise specified.]

⁸ Здесь и далее – по данным Росгидромет о средней плотности загрязнения ^{137}Cs почвы территории населенного пункта по состоянию на год выполнения исследования, если не оговорено иное [The ^{137}Cs soil surface activity in settlements data is hereafter given as at 01/01/2022 by Rosgidromet], unless otherwise specified.]

⁹ СанПиН 2.3.2.1078-01; Доп. и изм. 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.1078-01; Add. and rev. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01 (In Russ.)].

¹⁰ СанПиН 2.3.2.1078-01; Доп. и изм. 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.1078-01; Add. and rev. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01 (In Russ.)].

¹¹ СанПиН 2.3.2.1078-01; Доп. и изм. 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01 [SanPiN 2.3.2.1078-01; Add. and rev. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01 (In Russ.)].

Таблица 1

Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах сельскохозяйственных пищевых продуктов, Бк/кг
(по обобщенным данным комплексных радиационных обследований НП и данным радиационно-гигиенического мониторинга, 2019–2022 гг.)

[Table 1]

Specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in agricultural foodstuffs, Bq/kg
(according to the survey data united with radiation monitoring data, 2019–2022)]

Пищевые продукты [Foodstuffs]	Pn* [Rn*]	Статистические параметры [Statistical parameters] ¹²					
		N	Среднее ¹³ ± стандартная ошибка [Mean ± St.Err.]	Медиана [Median]	Геометрическое среднее [GM]	KB [CV]	Макс. [Max.]
$\sigma^{137} \text{ ** } < 37$ (17 НП [settlements])							
Молоко [milk]	¹³⁷ Cs	11	3,8 ± 1,1	3	2,6	0,97	12
Картофель [potatoes]	¹³⁷ Cs	41	2,6 ± 0,26	3	2,1	0,65	8
Овощи [vegetables]	¹³⁷ Cs	23	2,7 ± 0,16	3	2,7	0,29	3
$37 \leq \sigma^{137} < 185$ (122 НП [settlements])							
Молоко [milk] ***	¹³⁷ Cs	567	12 ± 0,65	8,4	7,6	1,2	150
	⁹⁰ Sr	87	0,75 ± 0,05	0,66	0,63	0,63	3,4
Картофель [potatoes]	¹³⁷ Cs	479	4,1 ± 0,15	3	3,3	0,8	28
	⁹⁰ Sr	92	0,84 ± 0,09	0,59	0,61	0,99	3
Овощи [vegetables]	¹³⁷ Cs	198	3,3 ± 0,12	3	3,2	0,5	11
$185 \leq \sigma^{137} < 555$ (91 НП [settlements])							
Молоко [milk] ***	¹³⁷ Cs	536	21 ± 0,83	15	14	0,94	130
	⁹⁰ Sr	120	1,2 ± 0,06	1,2	1	0,54	3
Картофель [potatoes]	¹³⁷ Cs	546	10 ± 0,39	7,8	7,2	0,91	77
	⁹⁰ Sr	189	0,74 ± 0,03	0,7	0,66	0,62	4,9
Овощи [vegetables]	¹³⁷ Cs	194	10 ± 0,74	7,1	6,3	1	50
$555 \leq \sigma^{137} < 1480$ (7 НП [settlements])							
Молоко [milk]	¹³⁷ Cs	35	27 ± 2,4	29	22	0,52	48
	⁹⁰ Sr	6	0,93 ± 0,22	0,64	0,82	0,57	1,6
Картофель [potatoes]	¹³⁷ Cs	64	18 ± 1,1	18	16	0,47	39
	⁹⁰ Sr	18	1,5 ± 0,26	0,95	1,2	0,7	3
Овощи [vegetables]	¹³⁷ Cs	17	13 ± 2	10	10	0,62	33
$\sigma^{137} > 1480$ (1 НП [settlement])							
Картофель [potatoes]	¹³⁷ Cs	9	18 ± 3,1	22	14	0,52	30
	⁹⁰ Sr	2	0,71 ± 0,29	0,71	0,65	0,58	1

* РН – радионуклиды [Rn – radionuclides].

** Плотность загрязнения ^{137}Cs (σ^{137}) почвы территории НП, кБк/м². В скобках указано количество НП, для которых представлены результаты исследований [^{137}Cs soil surface activity in settlements, kBq/m². The number of the settlements is given in parentheses].

*** Имеются превышения допустимых уровней [There are values exceeding of the permissible levels] ¹⁴.

¹² Здесь и далее используются следующие обозначения статистических параметров: N – количество исследований; Среднее – арифметическое среднее значение; Ст.Ош. – стандартная ошибка среднего; Геом. средн. – геометрическое среднее значение; КВ – коэффициент вариации; Максимум (Макс.) – максимальное значение [The names of statistical parameters are hereafter called as: N – the number of the examinations; Mean – the arithmetic mean; St.Err. – the standard error; Median – the median value; GM – the geometric mean; CV – the coefficient of variation; Maximum (Max.) – the maximum value].

¹³ При расчете средних величин проводилась замена значений ниже порога чувствительности методики на значения нижней границы диапазона измерений [When calculating average values, values below the sensitivity threshold of the technique were replaced with values of the lower limit of the measurement range].

¹⁴ СанПиН 2.3.2.1078-01; Доп. и изм. 18 к СанПиН 2.3.2.1078-01. [SanPiN 2.3.2.1078-01; Add. and rev. 18 to SanPiN 2.3.2.1078-01 (In Russ.)].

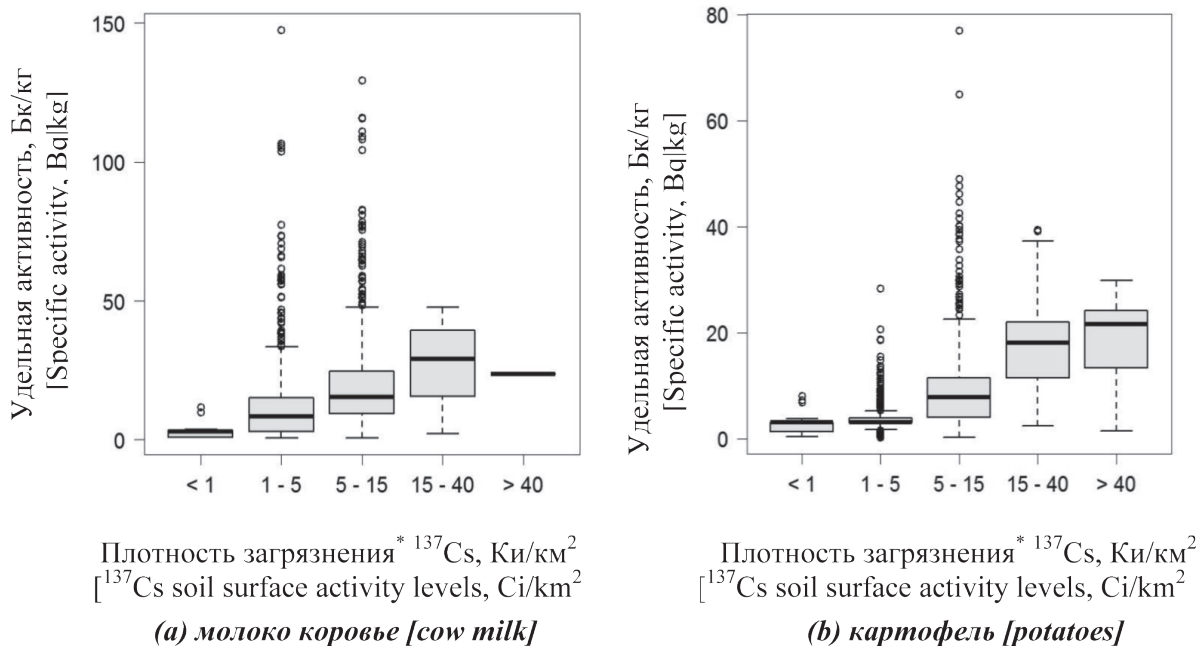


Рис. 1. Диаграмма распределения значений удельной активности ^{137}Cs в пробах сельскохозяйственных пищевых продуктов (по уровням плотности загрязнения почвы НП).

* Плотность загрязнения ^{137}Cs почвы территории НП, Ки/км² (1 Ки/км²=37 кБк/м²)

[Fig. 1.] Distribution of specific activity of ^{137}Cs values for agricultural foodstuff samples from private sector of settlements (by levels of soil surface activity).

* ^{137}Cs soil surface activity levels, Ci/km² (1 Ci/km²=37 kBq/m²)

37 до 185 кБк/м² составила 7%, с плотностью σ^{137} от 185 до 555 кБк/м² – 8%, для проб картофеля – 20% и 7%. Это может указывать на неоднородность распределения ^{137}Cs как в почве пастбищных и сенокосных угодий, так и в пахотных почвах приусадебных участков.

В связи с этим интерес представляет анализ характеристик распределений обнаруженных в образцах пищевых продуктов значений удельных активностей ^{137}Cs , стандартизованных по плотности радиоактивного загрязнения территорий. На рисунках 2 и 3 представлены графики распределений нормированных величин удельной активности в пробах молока и картофеля.

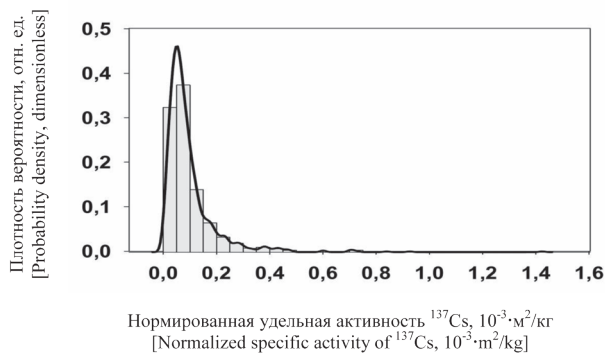


Рис. 2. Удельная активность ^{137}Cs в пробах коровьего молока, нормированная на плотность загрязнения почвы, $10^{-3}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$

[Fig. 2.] Specific activity of ^{137}Cs in cow milk samples and potato samples normalized to soil contamination density values, $10^{-3}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$

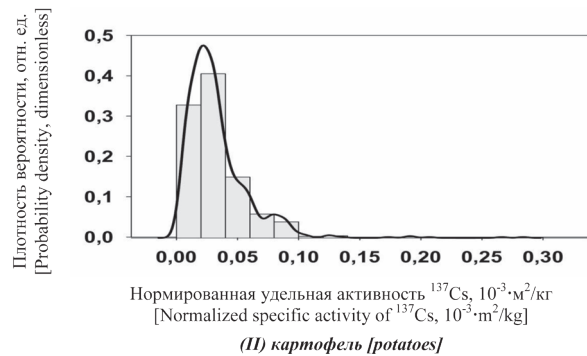


Рис. 3. Удельная активность ^{137}Cs в пробах картофеля, нормированная на плотность загрязнения почвы, $10^{-3}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$

[Fig. 3.] Specific activity of ^{137}Cs in cow milk samples and potato samples normalized to soil contamination density values, $10^{-3}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$

Асимметрия линий плотности вероятности может указывать на значительную неравномерность распределения ^{137}Cs по территории населенного пункта и его ареала, а также и на иные обстоятельства: в случае для проб молока, к примеру, – на использование кормов, заготовленных вне ареала населенного пункта либо на заливных лугах пойменных территорий, а для проб картофеля – на использование для улучшения плодородия огородной почвы удобрений, имеющих нетипичное (отличное от других ЛПХ в НП) происхождение (органические удобрения, зола древесных материалов и пр.) [6, 23]. Более пологая форма линии плотности вероятности распределений нор-

мированных значений удельной активности ^{137}Cs в пробах картофеля демонстрирует и сортовое разнообразие (а значит, и несколько отличающуюся способность к аккумуляции радиоцезия) этого вида сельскохозяйственного растения.

В таблице 2 для проб коровьего молока и картофеля из ЛПХ представлены значения удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr , нормированные на среднюю плотность загрязнения данными радионуклидами почвы территории населенного пункта и его ареала.

Примечательно, что оцененные в данном исследовании усредненные значения нормированных величин удельной активности ^{137}Cs в пробах молока из НП Брянской области (коэффициент его перехода из дер-

ново-подзолистых почв в пищевой продукт) согласуются с прогнозными оценками на период длительностью до 40 лет после аварии на ЧАЭС, данными еще в 2008 г. [16], а нормированные величины для ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах картофеля, а также ^{90}Sr в пробах молока не противоречат трендам изменения содержания радионуклидов в этих видах пищевых продуктов, установленным 15 лет назад.

Изучение свойств распределений значений удельной активности радионуклидов в пробах коровьего молока с группированием по периоду содержания молочного КРС (стойловому и выпасному) позволило исследовать влияние сезона вскармливания молочного скота на содержание в молоке ^{137}Cs . Анализ соотношений средних значений концентрации ^{137}Cs в молоке стойлового и выпасного

Таблица 2

Нормированная удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах коровьего молока и картофеля из ЛПХ жителей обследованных НП, $10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$

(нормирование по среднему значению плотности загрязнения почвы территории радионуклидом)

[Table 2]

Normalized specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in agricultural foodstuff samples from private sector of surveyed settlements, $10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}$ (normalized to the average value of soil surface activity)]

РН* [Rn*]	Статистические параметры [Statistical parameters] ³						
	N	Среднее [Mean]	Ст. откл. средн. [SD]	Геом. средн. [GM]	Ст. откл. геом. средн. [GSD]	K95 [Q95]	Макс. [Max.]
Молоко коровье [cow milk]							
^{137}Cs	882	0,094	0,083	0,069	2,2	0,26	0,60
^{90}Sr	185	0,19	0,12	0,16	1,9	0,43	0,66
Картофель [potatoes]							
^{137}Cs	761	0,033	0,024	0,026	2	0,081	0,19
^{90}Sr	254	0,11	0,066	0,099	1,7	0,24	0,39

* РН – радионуклиды [Rn – radionuclides].

Таблица 3

Статистические характеристики нормированных величин удельной активности ^{137}Cs в пробах коровьего молока в различные периоды содержания КРС, отн. ед (нормирование по групповому среднему значению)

[Table 3]

Statistical parameters of normalized specific activity of ^{137}Cs in cow milk samples for different cattle keeping seasons, dimensionless (scaled to the group mean value)]

Период содержания КРС [Cattle keeping season]	Статистические параметры [Statistical parameters] *					
	N	Медиана [Median]	KB [CV]	KA [Skew.]	КЭ [Kurt.]	Максимум [Maximum]
Песчаные и супесчаные, легко- и среднесуглинистые [Sandy and sandy loam, light and medium loamy]						
Выпасной [grazing]	113	0,93	0,53	1,5	3,7	3,2
Стойловый [indoor]	24	1	0,39	0,95	1,7	2,1
Песчаные и супесчаные, легко- и среднесуглинистые, торфяно-болотные [Sandy and sandy loam, light and medium loamy, peat-bog]						
Выпасной [grazing]	708	0,96	0,52	1,2	2,5	3,4
Стойловый [indoor]	258	1	0,42	1,9	6,5	3,2

* Здесь используются следующие обозначения статистических параметров: KA – коэффициент асимметрии, КЭ – коэффициент эксцесса; Максимум – максимальное значение [The names of statistical parameters are hereafter called as: 'Skew' – the skewness, 'Kurt.' – the kurtosis, Maximum – the maximum value].

периодов для разных НП, где проводился пробоотбор в разные времена года, показал, что в некоторых НП разброс оцененных значений достигает почти 3 раз. Это наблюдается как в период пастбищного выпаса, так и в период с преобладанием стойлового кормления скота.

Значения удельной активности ^{137}Cs в пробах молока были сгруппированы по периоду содержания и нормированы на среднее значение для каждой группы в пределах одного НП. Для НП, где на пастбищных и сенокосных угодьях преобладают песчаные/супесчаные, легко-/среднесуглинистые и торфяно-болотные почвы (табл. 3), сравнительный анализ распределений величин удельной активности ^{137}Cs показал, что значения концентрации ^{137}Cs в пробах молока выпасного периода имеют больший разброс, чем в пробах стойлового периода. При этом в образцах продукта из НП, где на кормовых угодьях нет участков с торфяно-болотными почвами, отклонение максимальных значений концентрации ^{137}Cs от среднего значения для стойлового периода практически не превышает 2 раз. В НП с заболоченными территориями максимальные значения концентрации ^{137}Cs превышают средние значения почти в 3 раза и сопоставимы с таковыми для выпасного периода. Для распределений обеих групп величин характерна правосторонняя скошенность и островершинность, причем последняя характеристика, в особенности в отношении проб молока стойлового периода из НП с торфяно-болотными почвами, указывает на присутствие аномальных значений в распределении. Сопоставление же для таких НП величин удельной активности в пробах молока выпасного и стойлового периода, нормированных на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы ареала НП, значимых различий не выявило ($p > 0,05$; t -критерий в модификации Уэлча с предварительным тестом принадлежности выборок к нормальному распределению с использованием критерия Шапиро – Уилка и тестом на гомогенность дисперсий с использованием критерия Левена). Следует отметить, что в большинстве обследованных НП на пастбищных и сенокосных угодьях, выделенных жителям для ведения хозяйственной деятельности, преобладают территории с торфяно-болотными почвами.

Заключение

Подводя итоги проведенного анализа современных уровней содержания радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах, произведенных в ЛПХ жителей приграничных с Республикой Беларусь НП Брянской области, можно сделать вывод, что радиологическим критериям безопасности содержания ^{137}Cs в пищевых продуктах не отвечает только незначительная часть исследованных образцов молока (около 1% от всего объема проб этого вида продукта). По результатам нашего исследования максимальное значение содержания ^{90}Sr в пробах молока не превысило 3,4 Бк/л (молоко выпасного периода).

В результате анализа закономерностей изменения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в пробах коровьего молока и картофеля в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения территории определены современные значения величин, характеризующих распределение отношений концентрации радионуклидов в пищевых продуктах к плотности радиоактивного загрязнения почвы

территории. Анализ соотношений средних значений концентрации ^{137}Cs в молоке стойлового и выпасного периодов для разных НП, где проводился пробоотбор в разные времена года, показал, что в некоторых НП разброс оцененных значений достигает почти 3 раз. Это наблюдается как для периода пастбищного выпаса, так и для периода с преобладанием стойлового кормления скота. Однако статистический анализ сопоставленных для таких НП характеристик распределений величин удельной активности в пробах молока выпасного и стойлового периода, нормированных на плотность загрязнения ^{137}Cs почвы территории, значимых различий не выявил.

Анализ результатов исследований содержания техногенных радионуклидов (^{137}Cs и ^{90}Sr) в пробах сельскохозяйственных пищевых продуктов, наиболее потребляемых населением обследованных НП [2], проведенных в рамках выполнения Программы, позволяет сделать вывод о том, что для населения территорий чернобыльского следа в контексте радиационной безопасности в настоящее время, как и в прежние годы, к наиболее критичным сельскохозяйственным продуктам относятся коровье и козье молоко местного производства.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Романович И.К. – общее и научное руководство проектом, разработка концепции изложения материалов исследования, содержательное редактирование текста статьи.

Базюкин А.Б. – поиск и анализ литературных источников данных, сбор и систематизация материалов исследования, редактирование текста статьи.

Братилова А.А. – координация работы участников проекта, организация экспедиционных работ, сбор и систематизация данных, поиск литературных источников, обработка полученных результатов.

Брук Г.Я. – разработка концепции, определение цели и формулирование задач исследования, дизайн проекта, координация работы участников проекта, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов исследования.

Дроздова Е.А. – обработка и систематизация первичных материалов исследования.

Жеско Т.В. – обработка и систематизация первичных материалов исследования.

Кадука М.В. – обработка и систематизация первичных материалов исследования, поиск литературных данных, содержательное редактирование текста статьи.

Кравцова О.С. – поиск и анализ литературных источников информации, обобщение, систематизация и обработка материалов исследования, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность и признательность за содействие в работе В.А. Яковлеву и О.С. Баженовой (специалистам Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева в период проведения исследований), Е.И. Злотниковой (врачу по санитарно-гигиеническим лабораторным исследованиям радиологи-

ческой лаборатории ФБУЗ ЦГиЭ в Брянской области), А.В. Кудряшову (главный врач филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области), В.А. Лалаяну (заместитель главного врача по санитарно-эпидемиологическим вопросам филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области), А.А. Ладику (эксперту-физику по контролю за источниками ионизирующих и неионизирующих излучений филиала ФБУЗ ЦГиЭ в городе Клинцы Брянской области). Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и рекомендации.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование выполнено в рамках работ по государственному контракту от 18.10.2019 № 0173100001419000019 с Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Литература

1. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 23–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-22-36.
2. Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 2: Структура рационов питания населения // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 7–21. DOI: 0.21514/1998-426X-2023-16-4-7-21.
3. Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // Радиационная гигиена, 2022, Т. 15, № 4, С. 45–55.
4. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области: Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2018 г. Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 2019. 266 с.
5. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области: Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2019 г.: Брянск: Департамент природных ресурсов и экологии Брянской области, 2020. 276 с.
6. Панов А.В., Ратников А.Н., Свириденко Д.Г. и др. Проблемы ведения животноводства в юго-западных районах Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. С. 372–375.
7. Спиридонов С.И., Иванов В.В., Титов И.Е., Нуштаева В.Э. Радиэкологическая оценка кормовых сельскохозяйственных угодий юго-западных районов Брянской области на основе комплекса статистических моделей // Радиация и риск, 2021, Т. 30, № 2, С. 38–49.
8. Никитин А.Н., Тагай С.А., Ласько Т.В. и др. Оценка современных уровней содержания ^{137}Cs в почве и растениях поймы реки Сож // Радиобиология и экологическая безопасность. – Гомель: ИВЦ Минфина (Минск), 2022. С. 94–97.
9. Поцепай С.Н. Эффективность агротехнических и агрохимических мероприятий при улучшении естественных и сеяных кормовых угодий в среднем Подесенье: дисс. канд. сельскохозяйств. наук. Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2020. 194 с.
10. Седукова Г.В., Исаченко С.А., Тимченко Е.А. Интенсивность накопления ^{137}Cs сельскохозяйственными культурами в отдаленный период после чернобыльской катастрофы // Радиобиология и экологическая безопасность. Гомель: ИВЦ Минфина (Минск), 2022. С. 137–142.
11. Подоляк А.Г. Научные аспекты сельскохозяйственного производства в постчернобыльских условиях. Мозырь: МГПУ им. И. П. Шамякина, 2017. 242 с.
12. Андреа К., Шевляков Г.Л. Обнаружение выбросов с помощью боксплотов, основанных на новых высокоэффективных робастных оценках масштаба: Информатика. Телекоммуникации. Управление // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2013, Т. 5, № 181, С. 39–45.
13. Козелько Н.А., Толстая Е.В., Аблековская О.Н. Реабилитация территорий, загрязненных в результате аварии на ЧАЭС: методическое пособие. Минск: Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова», 2017.
14. Ершов А.А. Стабильные методы оценки параметров // Автоматика и телемеханика, 1978, Т. 8, С. 66–100.
15. Hampel F.R. The influence curve and its role in robust estimation // Journal of the American Statistical Association, 1974, Vol. 69, P. 382–393.
16. Шутов В.Н., Кадука М.В., Брук Г.Я. и др. Динамика радиоактивного загрязнения пищевых продуктов сельскохозяйственного производства и природного происхождения после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена, 2008, Т. 1, № 3, С. 25–30.

Поступила: 09.04.2024 г.

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

Базюкин Анатолий Борисович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Братилова Анжелика Анатольевна – заведующий лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: bratilova@gmail.com

Брук Геннадий Яковлевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Дроздова Елена Анатольевна – ведущий инженер-исследователь 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

Жеско Татьяна Викторовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории внутреннего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Кадука Марина Валерьевна – кандидат биологических наук, заведующий радиохимической лабораторией 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

Кравцова Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, исполняющая обязанности старшего научного сотрудника отдела «База данных «Человек» Уральского научно-практического центра радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

Для цитирования: Романович И.К., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Брук Г.Я., Дроздова Е.А., Жеско Т.В., Кадука М.В., Кравцова О.С. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 3: Содержание радионуклидов в сельскохозяйственных пищевых продуктах // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 7–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-7-17

Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 3: Radionuclide content in agricultural food products

Ivan K. Romanovich¹, Anatoly B. Bazyukin¹, Anzhelika A. Bratilova¹, Gennadiy Ya. Bruk¹, Elena A. Drozdova¹, Tatyana V. Zhesko¹, Marina V. Kaduka¹, Olga S. Kravtsova²

¹Saint-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

²Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

The third article in a series of publications devoted to the results of studying the current radiation situation in the territories of the Bryansk region bordering the Republic of Belarus presents results of studies of the content of radionuclides (¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr) in samples of agricultural food products produced in the personal subsidiary plots of the population. The regularities of changing ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr content in samples of cow's milk and potatoes depending on the level of radioactive contamination of the territory were studied; the present values of the quantities characterizing the distribution of the ratio of the activity concentration of radionuclides in agricultural food products to the density of radioactive contamination of the soil of the territory were determined. The ratios of average values of ¹³⁷Cs activity concentration in milk from stalled and grazing periods for cattle were analyzed. The results of the study show that some dairy product samples (less than 1%) do not meet the radiological safety criterion. Exceedances of the hygienic standards were not found in the studied samples of potatoes, vegetables, and meat of farm animals.

Key words: accident at the Chernobyl NPP, population, internal exposure, cesium-137, strontium-90, agricultural food products.

Anzhelika A. Bratilova

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

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

Information about personal contribution of the authors

Romanovich I.K. – general and scientific management of the project, development of the concept of presentation of research materials, substantive editing of the text of the article.

Bazyukin A.B. – search and analysis of literary data sources, collection and systematization of research materials, substantive editing of the text of the article.

Bratilova A.A. – coordination of work of the project participants, organization of expedition works, collection and systematization of data, search of literature sources, processing of the obtained results.

Bruk G.Ya. – concept development, definition of the goal and formulation of the research objectives, project design, coordination of the work of the project participants, carrying out calculations, analysis and interpretation of the research results.

Drozdova E.A. – population survey, processing and systematization of primary research materials.

Zhesko T.V. – population survey, processing and systematization of primary research materials.

Kaduka M.V. – design of questionnaire cards for the population, surveying the population, processing and systematization of primary research materials, literature search, substantive editing of the text of the article.

Kravtsova O.S. – design of survey cards, search and analysis of literary sources of information, surveying the population, generalization, systematization and processing of research materials, carrying out calculations, analysis and interpretation of research results, writing the text of the article.

Acknowledgements

The authors express their gratitude and appreciation for assistance in the work to V.A. Yakovlev and O.S. Bazhenova (who were employees of the St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. P.V. Ramzaev during the period of the study), as well as to the reviewers for constructive comments and recommendations, Zlotnikova E.I. (doctor on sanitary-hygienic laboratory studies of radiological laboratory of FBUZ CDPH in the Bryansk region), Kudryashov A.V. (chief doctor of the branch of FBUZ CDPH in Klintsy, Bryansk region), Lalayan V.A. (deputy chief doctor for sanitary and epidemiological issues of the branch of FBUZ CDPH in Klintsy, Bryansk region), Ladik A.A. (expert-physicist for control of ionizing and non-ionizing radiation sources of the branch of FBUZ CDPH in Klintsy, Bryansk region). The authors are grateful to the reviewers for their constructive comments and recommendations.

Information on conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Information about the source of funding

The study was performed within the framework of the work under the state contract No. 0173100001419000019 dated 18.10.2019 with the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing.

References

- Romanovich IK, Bazyukin AB, Barkovsky AN, Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 22–36. (In Russian).
- Romanovich IK, Bazyukin AB, Bratilova AA, Bruk GYa, Varfolomeeva KV, Drozdova EA, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 2: Population's food preferences (diet). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 7–21. (In Russian).
- Fesenko SV, Prudnikov PV, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 45–57. (In Russian).
- Natural resources and environment of the Bryansk region: Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2018. Bryansk: Department of Natural Resources and Ecology of the Bryansk Region; 2019. 266 p.
- Natural resources and environment of the Bryansk region: Annual report on the environmental situation in the Bryansk region in 2019. Bryansk: Department of Natural Resources and Ecology of the Bryansk Region; 2020. 276 p.
- Panov AV, Ratnikov AN, Sviridenko DG, Isamov NN, Tsygvintsev PN. Problems of livestock farming in the southwestern regions of the Bryansk region in the long-term period after the accident at the Chernobyl NPP – to the 35th anniversary of the Chernobyl accident: Collection of reports of the international scientific-practical conference. Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2021. P. 372–5. (In Russian).
- Spiridonov SI, Ivanov VV, Titov IE, Nushtaeva VE. Radioecological assessment of forage agricultural land in the southwestern areas of the Bryansk region based on a set of statistical models. *Radiatsia i risk = Radiation and Risk* 2021;30(2): 38–49. (In Russian).
- Nikitin AN, Tagay SA, Lasko TV, Shurankova OA, Mishchenko EV, Leferd GA, et al. Estimation of current levels of ^{137}Cs in soil and plants of the river Sozh floodplain. In: Radiobiology and environmental safety. Gomel: Information Computing Center of the Ministry of Finance (Minsk); 2022. 94–7 (In Russian).
- Potsepai SN. The effectiveness of agrotechnical and agrochemical measures in improving natural and sown forage lands in the middle Polesnye region [dissertation]. Bryansk: Bryansk State Agrarian University; 2020. 194 p. (In Russian).
- Sedukova GV, Isachenko SA, Timchenko EA. The intensity of ^{137}Cs accumulation by agricultural crops in the long-term period after the Chernobyl disaster. In: Radiobiology and environmental safety. Gomel: Information Computing Center of the Ministry of Finance (Minsk); 2022. 137–42. (In Russian).
- Podolyak AG Scientific aspects of agricultural production in post-Chernobyl conditions. Eds.: Podolyak AG, Valetov VV, Karpenko AF. Mazyr: Mazyr State Pedagogical University named after I.P. Šamiakin; 2017. 242 p. (In Russian).
- Andrea K, Shevlyakov GL. Outlier detection with box-plots based on new highly efficient robust estimates of scale. Scientific and technical bulletins of St. Petersburg Polytechnic University. 2013;5(181): 39–45. (In Russian).
- Kozelko NA, Tolstaya EV, Ablekovskaya ON. Rehabilitation of territories contaminated as a result of the Chernobyl accident: a methodological manual. Minsk: "International State Ecological Institute named after AD Sakharov"; 2017. (In Russian).
- Ershov AA. Stable methods for parameter estimation. Automation and telemechanics. 1978;8: 66–100. (In Russian).
- Hampel FR. The influence curve and its role in robust estimation. *Journal of the American Statistical Association*. 1974;69: 382–93.
- Shutov VN, Kaduka MV, Bruk GYa, Bazyukin AB, Basalaeva LN. Dynamics of radioactive contamination of agricultural food products and natural foodstuffs after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(3): 25–30. (In Russian).

Received: April 09, 2024

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

Anatoly B. Bazyukin – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, 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 correspondence: Angelika A. Bratilova – Head of the Laboratory of Internal Exposure at the 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, Russia, 197101; E-mail: bratilova@gmail.com)

Gennadiy Ya. Bruk – Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Internal Irradiation, 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

Elena A. Drozdova – Leading Research Engineer, Laboratory of Dosimetry of Natural Sources, 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

Tatiana V. Zhesko – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Internal Irradiation, 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

Marina V. Kaduka – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher, Head of the Radiochemical Laboratory 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

Olga S. Kravtsova – Candidate of Biological Sciences, Acting Senior Researcher of the Human Database Department, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Romanovich I.K., Bazyukin A.B., Bratilova A.A., Bruk G.Ya., Drozdova E.A., Zhesko T.V., Kaduka M.V., Kravtsova O.S. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 3: Radionuclide content in agricultural food products. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17 No. 2. P. 7–17. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-7-17

Риск развития злокачественных новообразований органов пищеварения, исключая кишечник, в Уральской когорте аварийно-облученного населения

Л.Ю. Крестинина, Д.А. Завьялов

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

Проблема оценки влияния малых доз облучения на здоровье населения остается актуальной, и требует дополнительных результатов исследований, чтобы приблизиться к ее пониманию. Особенно значимым вкладом в решение данной проблемы становятся исследования отдаленных эффектов облучения с получением прямых оценок риска в популяции, представляющей все слои населения по полу и возрасту, разным исходным уровням здоровья, принадлежности к разным социальным слоям, а также с длительным периодом наблюдения и достаточной численности. В данной работе впервые представлены результаты анализа риска заболеваемости злокачественных новообразований всех органов пищеварения, за исключением кишечника, и отдельно рака желудка у членов Уральской когорты аварийно-облученного населения в зависимости от дозы, накопленной в желудке за период с 1956 по 2018 г. Данная когорта объединяет лиц, облученных на Южном Урале в 2 радиационных авариях (на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе) в период с 01.01.1950 по 31.12.1960, включая лиц, которые в этот период родились и могли быть дополнительно облучены внутриутробно или иметь облученных родителей. Население подверглось длительному комбинированному облучению (внешнему и внутреннему) в диапазоне низких и промежуточных доз на мягкие ткани (до 1,1 Гр). Численность когорты для анализа заболеваемости составила 47 282 человека. Число человеко-лет за период наблюдения с 01.01.1956 по 31.12.2018 составило 1 292 930, средняя доза на желудок составила за весь период 47 мГр, максимальная — 1132 мГр. Избыточный относительный риск онкологической заболеваемости органов пищеварения оценивался с применением регрессионного анализа с Пуассоновским распределением программами статистического пакета EPICURE. Избыточный относительный риск при 2-летнем минимальном латентном периоде для рака желудка составил 0,98/Гр ($p=0,026$), а для всех органов пищеварения, исключая кишечник, он составил 0,58/Гр ($p=0,06$). Не было выявлено значимой модификации эффекта нерадиационными факторами. Данные величины избыточного относительного риска не противостоят результатам аналогичных исследований в Японской когорте, выживших после атомной бомбардировки, с близким возрастным составом, но подвергшихся острому облучению и в более высоких дозах. Значимой дозовой зависимости заболеваемости злокачественными новообразованиями органов полости рта, пищевода, печени, поджелудочной железы на данном этапе не выявлено.

Ключевые слова: рак желудка, избыточный относительный риск, ЗНО органов пищеварения, хроническое облучение, малые дозы, Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН).

Введение

В результате деятельности ПО «Маяк» по производству плутония в 1950-е гг. произошло два значимых радиационных события. С 1949 по 1956 г. осуществлялись плановые и аварийные сбросы жидких радиоактивных отходов производства в реку Течу, приведшие к радиоактивному загрязнению прибрежных сел реки Течи. В 1957 г. произошел термохимический взрыв одной из емкостей хранилища жидких радиоактивных отходов, который привел к возникновению Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). В результате данных инцидентов были загрязнены территории 3 областей: Челябинской, Курганской

и Свердловской. Население этих территорий подверглось хроническому радиационному воздействию [1].

В течение последних 70 лет сотрудники Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) оказывают помощь в лечении и обследовании облученного населения, параллельно занимаясь изучением последствий для здоровья облученных лиц. За данный промежуток времени были сформированы когорты населения, облученного в прибрежных селах реки Течи, и когорты населения, облученного на ВУРС. В 2018 г. в связи с совершенствованием методов наблюдения за населением, облученным на Южном Урале, и возможностью рас-

Крестинина Людмила Юрьевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

чета индивидуальных доз по единой дозиметрической системе, лица, облученные на реке Тече и на ВУРСе были объединены в одну когорту, которая получила название Уральской когорты аварийно-облученного населения (УКАОН). Лица, входящие в УКАОН, подверглись многолетнему хроническому радиационному воздействию, обусловленному как внешним гамма-излучением, так внутренним за счет употребления воды и продуктов питания местного производства [1, 2].

Основным эффектом отдаленных последствий хронического облучения населения является увеличение онкологических заболеваний. Но до настоящего времени имеются противоречивые данные о последствиях облучения в диапазоне малых доз (которому подверглось 90% членов Уральской когорты). Оценка эффектов от воздействия малых доз облучения является трудной задачей с точки зрения достижения достаточной статистической значимости исследования. Увеличение численности анализируемой когорты после объединения облученного населения позволило провести анализ дозовой зависимости онкологической заболеваемости для отдельных органов и систем и по отдельным параметрам. Первые исследования в УКАОН показали статистически значимое увеличение риска заболеваний и смерти от всех солидных ЗНО с воздействием дозы [3, 4], а также риска рака молочной железы и репродуктивных органов у женщин УКАОН. На данном этапе продолжается работа по исследованию радиогенного риска развития ЗНО отдельных органов или систем в УКАОН. Выбор локализаций ЗНО для анализа связан с частотой заболеваний в стране, а также с числом ЗНО в изучаемой когорте. Согласно опубликованным данным [5], в России на 2022 г. ЗНО органов пищеварительной системы (ОПС) составляли 17% от новых случаев ЗНО в России, 3,3% новых случаев приходилось на ЗНО желудка, ЗНО ОПС без ЗНО кишечника – 6,8%. По оценкам проекта GLOBOCAN, на 2020 г. (185 стран, 35 видов ЗНО, 19,2 млн новых случаев в 2020 г.) рак желудка является причиной более 1 млн новых случаев заболевания в 2020 г. и, по оценкам, занимает 5-е место по заболеваемости – 5,6% от всех новообразований и 4-е место по смертности – 7,7% случаев. Рак пищевода занимает 7-е место по заболеваемости и 6-е место по смертности [6]. Высокая частота случаев ЗНО ОПС, хронический характер облучения и влияние не только внешнего, но и внутреннего облучения за счет употребления продуктов питания и воды, загрязненных радионуклидами в первые годы после радиационных событий, обуславливают важность изучения влияния облучения на риск развития ЗНО органов пищеварительной системы в УКАОН.

В данной работе приводится описание результатов анализа дозовой зависимости риска заболеваемости ЗНО желудка и всех ОПС суммарно, исключая ЗНО кишечника (анализ риска ЗНО кишечника проводился отдельно в зависимости от дозы, накопленной в кишечнике, которая существенно превышала дозу на желудок).

Материалы и методы

Объектом исследования являлось население, облученное на Южном Урале в результате последствий деятельности ПО «Маяк» [1]. УКАОН объединяет лиц, облученных на Южном Урале в 2 радиационных авариях (на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе – ВУРСе) в пе-

риод с 01.01.1950 г. по 31.12.1960 г., включая лиц, которые в этот период родились и могли быть дополнительно облучены внутриутробно или иметь облученных родителей [2].

Когорта

Общая численность УКАОН составляет около 63 000 человек. Для анализа заболеваемости период наблюдения начинался с 01.01.1956, поэтому в анализ были включены только члены УКАОН, которые на 01.01.1956 проживали на территории наблюдения за заболеваемостью (ТНЗ). ТНЗ включает 5 районов из Челябинской области, по которым протекает река Теча (Каслинский, Аргаяшский, Сосновский, Кунашакский, Красноармейский), которые также включают территорию ВУРСа и города наибольшей миграции (г. Челябинск и г. Озерск). Из общей численности УКАОН были исключены лица, умершие, заболевшие ЗНО или мигрировавшие с ТНЗ до 01.01.1956. Период наблюдения составил 63 года, с 01.01.1956 по 31.12.2018. В результате численность когорты для анализа заболеваемости составила 47 282 человека.

К концу 2018 г. с ТНЗ мигрировало 11 610 человек, 22 942 человека (48,5%) умерли, 8329 человек проживают на ТНЗ на 31.12.2018 г., для 4401 человека жизненный статус к 31.12.2018 г. не известен. Доля известных причин смерти среди всех умерших на ТНЗ составила 91,5%.

В таблице 1 представлены данные с описательными характеристиками когорты. Доля женщин в изучаемой когорте (55%) несколько больше, чем мужчин, что связано с послевоенным периодом начала наблюдения. Средний возраст у женщин относительно мужчин старше на 4 года, средняя и максимальная доза также немного выше, чем у мужчин. По этническому признаку преобладает русское население (64%), средний возраст которого на 3 года старше такового среди татар и башкир (что связано с большим количеством детей в семьях татар и башкир). Средняя доза выше в группе татар и башкир, а максимальная выше у русских (см. табл. 1). К началу облучения 80% членов когорты были моложе 40 лет, средняя доза на желудок в этой группе несколько меньше, чем у лиц 40 лет и старше. Преобладали (58%) члены когорты, облученные в прибрежных селах реки Течи, 42% облучены на территории ВУРСа.

Описание случаев ЗНО

Основным источником информации о случаях ЗНО являлось «Извещение о больном с впервые в жизни установленным диагнозом злокачественного новообразования» (форма N 090/У) из онкологического диспансера Челябинской области или других медицинских учреждений. Дополнительными источниками могли быть выписки из стационаров, данные протоколов экспертных советов по установлению связи заболевания с облучением, журналы морфологических исследований, протоколы вскрытий, а также в части случаев – только свидетельства о смерти.

За 63 года наблюдения у членов УКАОН на территории наблюдения было зарегистрировано 1933 случая ЗНО органов пищеварения. При исключении из общего числа ЗНО ОПС случаев ЗНО тонкого и толстого кишечника число ЗНО ОПС составило 1447 случаев, из них 736 ЗНО желудка (табл. 2).

Таблица 1

Характеристики когорты

[Table 1]

Cohort characteristics]

Характеристики [Characteristics]	Человек [Persons]	Средний возраст [Mean age]	Доза на желудок [Stomach dose]	
			Средняя [Mean]	Максимальная [Maximum]
Мужчины [Male]	21 191 (45%)	40,3	43,9	978,2
Женщины [Female]	26 091 (55%)	45,4	49,2	1132,3
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	17 007 (36%)	42,0	55,7	721,3
Русские [Russians]	30 275 (64%)	43,9	41,2	1132,3
Возраст начала облучения, лет [Age at exposure, years]				
< 40	38 002 (80%)	13,9	46,8	1132,3
≥ 40	9280 (20%)	57,8	47,8	1132,3
Облучены на реке Тече [Exposed on Techa River]	27 337 (58%)	43,2	66,7	1132,3
Облучены на ВУРС [On the EURT]	19 945 (42%)	43,2	12,5	120,9
Всего [Total]	47 282 (100%)	43,2	46,9	1132,3

Таблица 2

Верификация диагнозов ЗНО за весь период наблюдения

[Table 2]

Verification of cancer diagnoses for the entire period of follow-up]

Локализация ЗНО [Cancer sites]	Морфологическое [Morphological]	Инструментальное [Instrumental]	Клиническое [Clinical]	Свидетельство о смерти [Death certificate only]	Всего [Total]
Желудок [Stomach]	281 (38%)	73 (10%)	177 (24%)	205 (28%)	736 (100%)
Все ЗНО ОПС без кишечника [All cancers of digestive organs without intestines]	636 (44%)	149 (10%)	302 (21%)	360 (25%)	1447 (100%)

В таблице 2 указана доля подтвержденных диагнозов на основе информации, которой мы располагаем, но надо отметить, что поскольку информация о случаях ЗНО с 1950-х гг. копировалась или выписывалась из данных онкологической службы, то доля подтвержденных диагнозов была больше, но не все архивные документы за ранние годы сохранились. Подтверждение диагнозов значительно выше в период с 1990 по 2018 г., например, доля морфологического

и инструментального подтверждения всех ЗНО ОПС (исключая ЗНО кишечника) за эти годы составила 92% (535 из 580), а ЗНО желудка – 95% (247 из 267 за 1990–2018 гг.), что согласуется с данными для других стран [7].

В таблице 3 представлены случаи ЗНО ОПС, исключая 486 случаев ЗНО кишечника, зарегистрированные за весь период на ТНЗ по локализациям и отдельным характеристикам.

Таблица 3

Случаи ЗНО ОПС по локализациям в зависимости от характеристик

[Table 3]

Cancer cases of digestive organs by sites and parameters]

Параметры [Parameters]	Человеко-лет [Person- years]	Случаев ЗНО на ТНЗ [Cancer cases in the incidence catchment area]					Всего [Total]
		Ротовой полости [Oral cavity]	Пищевода [Esophagus]	Желудка [Stomach]	Печени, желчного пузыря и протоков [Liver, gallbladder and ducts]	Поджелудочной железы [Pancreas]	
Мужчины [Male]	551 249	158	116	396	61	70	801
Женщины [Female]	741 681	60	106	340	87	53	646
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	566 478	69	147	267	58	33	574
Русские [Russians]	726 452	149	75	469	90	90	873
Возраст [Age], < 40 лет, [years]	556 093	11	0	22	4	6	43
≥ 40 лет, [years]	736 837	207	222	714	144	117	1404

Параметры [Parameters]	Человеко-лет [Person-years]	Случаев ЗНО на ТНЗ [Cancer cases in the incidence catchment area]					Всего [Total]
		Ротовой полости [Oral cavity]	Пищевода [Esophagus]	Желудка [Stomach]	Печени, желчного пузыря и протоков [Liver, gallbladder and ducts]	Поджелудочной железы [Pancreas]	
Облучены на реке Теча [Exposed on the Techa River]	849 934	141	135	492	100	85	953
Облучены на ВУРС [On the EURT]	442 996	77	87	244	48	38	494
Всего [Total]	1 292 930	218	222	736	148	123	1447
%		15,1%	15,3%	50,9%	10,2%	8,5%	100%

Число ЗНО ОПС, зарегистрированных у мужчин, больше, чем у женщин, у русских больше, чем у татар и башкир, 97% случаев ЗНО зарегистрированы после 40 лет. У облученных на реке Теча ЗНО ОПС встречаются чаще, чем у облученных на ВУРС. При этом для отдельных локализаций тенденции могут отличаться. Так, ЗНО пищевода встречается у татар и башкир в 2 раза чаще, чем у русских (147 случаев против 75), а женщины имеют ЗНО печени и желчных протоков чаще мужчин (87 и 61). По частоте случаев лидируют ЗНО желудка (50,9% от всего количества), далее идут ЗНО пищевода и ротовой полости (15,3% и 15,1% соответственно), остальные 18,7% – ЗНО печени и желчных протоков и поджелудочной железы.

Дозы

Население, облученное на Южном Урале, получило комбинированное облучение: внутреннее за счет употребления воды и продуктов питания местного производства (основными дозообразующими радионуклидами являлись долгоживущие ^{90}Sr и ^{137}Cs), внешнее в связи с повышенным после аварий γ -фоном на территории населенных пунктов и прилегающих районов. Расчет суммарной дозы облучения за весь период в конкретном органе каждого члена когорты проводился с использованием детерминистской версии усовершенствованной дозиметрической системы TRDS-2016D, разработанной сотрудниками биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦ РМ) [8–10]. Для оценки риска ЗНО желудка и всех ОПС, исключая кишечник, была выбрана доза на желудок, которая близка к уровням облучения большинства других ОПС. Время нахождения пищи в кишечнике значительно дольше, чем в желудке, что обусловило более высокие дозы на кишечник, поэтому в данном анализе ЗНО кишечника исключены. Доза, накопленная в стенках желудка, была рассчитана на каждый год наблюдения. Средняя доза на желудок составила за весь период 47 мГр, медианная – 13 мГр, максимальная – 1132 мГр.

Статистические методы

Для расчета риска ЗНО использовался регрессионный анализ с Пуассоновским распределением и простая параметрическая модель избыточного относительного риска. Статистическая значимость и доверительные интервалы оценены методом максимального правдоподобия

с 95% значимостью для рака желудка и 90% значимостью для ИОР заболеваемости ЗНО всех ОПС, за исключением кишечника. Расчет проводился с помощью статистического пакета EPICURE, программами DATAB и AMFIT [11]. Более подробно статистические методы, используемые для анализа рисков в УКАОН, описаны в ранее опубликованных статьях [3–4].

Многофакторный анализ зависимости показателей заболеваемости ЗНО ОПС от дозы, проведенный с помощью программ пакета EPICURE, позволяет оценить дозовый эффект с одновременным учетом зависимости базовых показателей от нерадиационных факторов риска. В связи с этим анализ включает два этапа исследования: выявление факторов, существенно влияющих на базовые уровни заболеваемости ЗНО без учета дозы, и оценку дозовой зависимости после коррекции базовых уровней от выявленных факторов.

Результаты и обсуждение

Зависимость базовых уровней от нерадиационных факторов

Для оценки влияния нерадиационных факторов на заболеваемость ЗНО все данные с помощью программы DATAB были организованы в таблицы случаев ЗНО и человеко-лет, стратифицированные по доступным нерадиационным факторам. В перечень страт в данном анализе вошли: пол, возраст начала облучения (категории по 20 лет от 0 до 60+), этническая принадлежность (русские или татары и башкиры), факт эвакуации, территория первого облучения (река Теча или ВУРС), статус облучения (облучен после рождения, дополнительно облучен внутриутробно или дополнительно облучены родители), наличие рака у родственников (да, нет, неизвестно), курение (курит, не курит, не известно), образование (менее 4 классов, среднее или высшее, неизвестно), ожирение (индекс массы тела <30, >30, неизвестно), территория проживания (сельская местность или город), достигнутый возраст (категории по 5 лет до 80+), календарный период (по 10 лет, начиная с 01.01.1956 до 31.12.2018), год рождения членов когорты (до 1937 г. и после), дозовые категории с латентным периодом 0, 2, 5, 10 и 15 лет (с нижней границей 0; 0,002; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 > Гр). Влияние параметров на уровни заболеваемости ЗНО ОПС было проверено как отдельно, так и в различных сочетаниях

с помощью программы AMFIT статистического пакета EPICURE. Для расчета базовых уровней заболеваемости были выбраны только факторы, оказывающие статистически значимое влияние на них. Так, при расчете величины ИОР ЗНО желудка в модель оценки базовых уровней заболеваемости были включены следующие факторы: пол, национальность, курение, радиационная ситуация, городской/сельский житель, год рождения когорты и достигнутый возраст, связанный с полом. При этом наблюдалась следующая зависимость базовых уровней (без влияния дозы): показатель заболеваемости был выше у мужчин относительно женщин, у русских выше, чем у татар и башкир, у курящих выше, чем у некурящих, у облученных на реке выше, чем на ВУРС, у сельских жителей выше, чем у городских, у родившихся до 1937 г. выше, чем у родившихся после 1937 г., и показатели увеличивались с увеличением достигнутого возраста.

При расчете величины ИОР ЗНО всех ОПС, исключая кишечник, в модель базовых уровней заболеваемости, кроме указанных выше, были дополнительно включены факторы влияния: индекс массы тела и образование, а исключен фактор национальности. Показатели ЗНО ОПС были также выше у мужчин, у курящих, у облученных на реке Тече, у сельских жителей, у родившихся до 1937 г., они увеличивались с увеличением возраста, а также были выше при отсутствии ожирения и выше при наличии среднего или высшего образования.

Дозовая зависимость заболеваемости ЗНО желудка и всех органов пищеварения, исключая кишечник

Оценка значимого минимального латентного периода и вида дозовой зависимости ИОР для рака желудка

Так как со времени развития изменений в клетке человека до образования видимой опухоли необходим определенный период, который может отличаться в зависимости от органа, где развивается опухоль, и от причин, вызвавших заболевание и их особенностей (в данном случае от высокой или низкой дозы, острого или хронического облучения), то при оценке риска развития ЗНО используется показатель «Минимальный латентный период» (МЛП). Чтобы понять, какой МЛП характерен для

ЗНО ОПС при хроническом облучении в УКАОН, при анализе дозовой зависимости уровней заболеваемости ЗНО ОПС на каждого человека и на каждый календарный год были рассчитаны дозы с МЛП развития ЗНО ОПС в 2, 5, 10 и 15 лет, которые были использованы при расчете величин ИОР с этими вариантами МЛП. Практически ЗНО, зарегистрированное в календарном году, связывалось с дозой, которую человек получил раньше (при 2-летнем МЛП – раньше даты диагноза на 2 года, при 5-летнем МЛП – раньше на 5 лет и т.д.). Также были протестированы модели дозовой зависимости ИОР: линейная, квадратичная и линейно-квадратичная. Результаты анализа ИОР заболеваемости рака желудка в зависимости от МЛП и вида дозовой зависимости представлены в таблице 4.

Значимые величины ИОР были получены только при 0- и 2-летнем МЛП линейной зависимости. При этом величины ИОР и доверительные интервалы были почти одинаковыми. Увеличение МЛП до 5, 10 или 15 лет приводило к увеличению неопределенности оценки ИОР. Учитывая, что МЛП необходим для развития ЗНО, то для дальнейшего анализа и расчетов модификации риска нерадиационными факторами нами была использована доза с МЛП в 2 года, а не 0. Величина ИОР при этом составила 0,98/Гр (95% ДИ 0,09; 2,10), $p=0,029$.

Дозовая зависимость лучше всего описывалась линейной моделью ($p<0,03$). При использовании квадратичной ($p=0,19$) и линейно-квадратичной модели ($p>0,5$, данные в таблице не приводятся) величина ИОР становилась незначимой. Атрибутивный риск (АР) был рассчитан как доля избыточных случаев рака желудка, рассчитанных по модели, к общему числу раков желудка в когорте. Согласно линейной модели с МЛП в 2 года АР для рака желудка составил 4,9%, и вероятно, что 36 из 736 случаев рака желудка могли быть связаны с радиационным воздействием.

Аналогичный анализ был проведен для ЗНО всех ОПС, исключая кишечник (табл. 5). При расчете величины ИОР заболеваемости всех ОПС без кишечника была получена статистически значимая положительная величина при МЛП для 0, 2 и 5 лет, но достоверность результата составила только 90%. Лучшие показатели для величины риска наблюдались при 0- и 2-летнем МЛП и были очень

Таблица 4

Величины ИОР заболеваемости ЗНО желудка

[Table 4]

ERR values of stomach cancer incidence]

МЛП, лет [Minimal latent period, years]	ИОР/Гр, 95% ДИ [ERR/ Gy, 95% CI]	P	Отклонение модели [Deviance]	Избыточные ЗНО [Excess cancers]	Атрибутивный риск [Attributable risk], %
<i>Линейная модель [Linear model]</i>					
0	0,99 (0,11; 2,11)	0,026	7029,412	37,3	5,1
2	0,98 (0,09; 2,10)	0,029	7029,656	36,3	4,9
5	0,83 (-0,04; 1,95)	0,06	7030,967	30,2	4,1
10	0,55 (-0,29; 1,63)	0,222	7032,902	18,0	2,4
15	0,31 (-0,51; 1,39)	>0,5	7033,944	9,0	1,2
<i>Квадратичная модель [Quadratic model]</i>					
2	1,16 (-0,48; 3,33)	0,19	7032,654	11,0	1,5

Величины ИОР заболеваемости ЗНО всех ОПС, за исключением кишечника

Таблица 5

[Table 5]

Cancer incidence ERR values of all digestive organs, excluding intestines]

МЛП, лет [Minimal latent period, years]	ИОР/Гр, 90% ДИ [ERR/ Gy, 90% CI]	P	Отклонение модели [Deviance]	Избыточные ЗНО [Excess cancers]	Атрибутивный риск, % [Attributable risk]
Линейная модель [Linear model]					
0	0,59 (0,07; 1,20)	0,059	11984,396	45,3	3,95
2	0,58 (0,06; 1,19)	0,064	11984,531	44,2	3,85
5	0,52 (0,0002; 1,13)	0,099	11985,248	38,6	3,37
10	0,26 (-0,24; 0,85)	0,41	11987,268	17,6	1,53
15	0,11 (-0,39; 0,70)	>0,5	11987,851	6,4	0,56
Квадратичная модель [Quadratic model]					
2	0,74 (-0,45; 1,94)	0,234	11986,541	13,8	1,20

близки. Для сопоставимости с ИОР по раку желудка мы ориентировались на величину ИОР с 2-летним МЛП, которая составила 0,58/Гр (90% ДИ: 0,06; 1,19), $p=0,064$. Тестирование квадратичной ($p=0,23$, табл. 5) и линейно-квадратичной моделей ($p=0,19$, в таблице 5 не приводится) не выявило дозовой зависимости.

Результаты анализа риска развития ЗНО всех ОПС по отдельным локализациям по линейной модели с 2- и 5-летними минимальными латентными периодами представлены в таблице 6.

Можно видеть, что линейная дозовая зависимость при $p < 0,05$ наблюдается только для ЗНО желудка и при $p < 0,1$ для всех ЗНО ОПС. Квадратичная и линейно-квадратичные модели не выявили значимой дозовой зависимости

заболеваемости ЗНО для других локализаций и здесь не приводятся.

Модификация дозового ответа

Программа AMFIT позволяет оценивать модификацию дозового ответа путем расчета дозовой зависимости в разных группах когорты, объединенных каким-либо признаком или фактором риска. Результаты оценки модификации ИОР заболеваемости ЗНО желудка и ОПС, исключая кишечник, по линейной модели с МЛП 2 года представлены в таблице 7.

Статистически значимые величины ИОР заболеваемости ЗНО желудка были получены только в одной из

Величины ИОР заболеваемости ЗНО ОПС разных локализаций

Таблица 6

[Table 6]

ERR values of cancer morbidity in different localizations of the digestive organs]

Локализация ЗНО [Cancer sites]	Случаи [Cases]	МЛП 2 года [Minimum latency period, 2 years]		МЛП 5 лет [Minimum latency period, 5 years]	
		ИОР/Гр (95%ДИ) [ERR/Gy, 95%CI]	P	ИОР/Гр (95%ДИ) [ERR/Gy, 95% CI]	P
Полость рта [Oral cavity]	218	0,16 (nf<-1,09; 1,98)	> 0,5	0,11 (nf<-1,13; 1,93)	>0,5
Пищевод [Esophagus]	222	1,08 (-0,43; 3,31)	0,19	1,17 (-0,39; 3,46)	0,17
Желудок [Stomach]	736	0,98 (0,09; 2,1)	0,03	0,84 (-0,04; 1,95)	0,06
Печень, желчные протоки, желчный пузырь [Liver, gallbladder and bile ducts]	148	0,31 (-1,33; 2,8)	>0,5	0,25 (nf < -1,38; 2,74)	>0,5
Поджелудочная железа [Pancreas]	123	0,02 (-1,78; 2,78)	>0,5	0,06 (-1,77; 2,87)	>0,5
Поджелудочная железа и печень [Liver + pancreas]	271	0,13 (-1,09; 1,85)	>0,5	0,09 (-1,12; 1,80)	>0,5
Все ЗНО ОПС без кишечника [Digestive organs excluding intestines]	1447	0,58 (-0,03; 1,31)	0,06	0,52 (-0,09; 1,26)	0,10

nf* – граница 95% ДИ не может быть вычислена в связи с большой неопределенностью [nf* (not found) 95% confidence interval bounds cannot be calculated due to large uncertainty].

Модификация ИОР заболеваемости ЗНО желудка и всех ОПС без кишечника

Таблица 7

ERR modification of the stomach cancer incidence and of all digestive organs]

[Table 7]

Параметры [Parameters]	Желудок [Stomach]			ЗНО ОПС без кишечника [Cancers of all digestive organs excluding intestines]		
	n	ИОР/Гр [ERR/Gy] 95% ДИ [95% CI]	P	n	ИОР/Гр [ERR/Gy] 95% ДИ [95% CI]	P
Вся когорта [Whole cohort]	736	0,98 (0,09; 2,10)	0,03*	1447	0,58 (-0,03; 1,31)	0,06
Национальность [Ethnicity]						
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	267	1,53 (-0,07; 3,77)	0,108	574	0,91 (0,03; 1,95)	<0,05*
Русские [Russians]	469	0,74 (-0,22; 2,03)	0,172	873	0,36 (-0,30; 1,20)	0,33
Пол [Sex]						
Мужчины [Male]	396	1,25 (0,03; 2,90)	<0,05*	801	0,44 (-0,39; 1,27)	0,29
Женщины [Female]	340	0,68 (-0,44; 2,26)	0,297	646	0,76 (-0,21; 1,73)	0,13
Факт переселения [Resettlement]						
Переселенные [Resettled]	309	0,98 (0,09; 2,10)	<0,05*	596	0,57 (-0,33; 1,92)	0,08
Непереселенные [Non-resettled]	427	0,92 (-1,81; 4,57)	> 0,5	851	-1,03 (-2,90; 0,84)	0,28
Облучение родителей [Parental exposure]						
Не облучены [not exposed]	696	0,97 (0,09; 2,10)	<0,05*	1351	0,58 (-0,03; 1,32)	0,09
Облучены [exposed]	40	1,17 (-5,46; 7,81)	> 0,5	96	0,69 (-3,19; 4,75)	>0,5
Территория первого облучения [First exposure area]						
Река Теча [Techa River]	492	1,00 (0,11; 2,14)	0,04*	953	0,61 (-0,02; 1,37)	0,08
ВУРС [EURT]	244	-0,65 (-4,49; 4,69)	> 0,5	494	1,69 (-3,56; 3,07)	>0,5
Городской/сельский житель [Urban/rural]						
Сельский [Rural]	642	0,89 (0,02; 2,03)	<0,05*	1236	0,47 (-0,19; 1,14)	0,165
Городской [Urban]	94	2,64 (nf<0; 9,63)	0,22	211	1,97 (-0,56; 4,50)	0,127
Календарный период [Calendar period]						
1956–1985	408	0,48 (-0,45; 1,71)	0,38	720	0,22 (-0,54; 0,97)	>0,5
1986–2018	328	1,96 (0,40; 4,06)	0,02*	727	1,15 (0,18; 2,35)	<0,05*
Рак у родственников [Cancer in relatives]						
Нет [No]	370	0,41 (-0,74; 1,57)	0,49	740	0,37 (-0,46; 1,21)	0,38
Есть [Yes]	286	1,16 (0,02; 2,64)	<0,05*	582	0,78 (-0,01; 1,76)	0,06
Нет информации [No information]	80	3,81 (-0,40; 8,02)	0,08	125	0,34 (-1,84; 2,51)	> 0,5

*Статистически значимый показатель [*Statistically significant indicator].

групп по каждому рассматриваемому фактору, кроме национальности. Достоверных различий в группах не наблюдалось.

Для всех ЗНО ОПС без кишечника были получены статистически значимые коэффициенты для татар и башкир (ИОР/Гр=0,91; 95%ДИ:0,03;1,95), $p<0,05$, но значимых отличий от русских – нет), а также для календарного периода после 1986 г. (ИОР/Гр=1,15, 95%ДИ (0,18;2,35), $p<0,05$, но отличия не значимы от периода с 1956 по 1985 г.).

В таблице 8 представлены результаты анализа влияния достигнутого возраста и возраста начала облучения на дозовую зависимость заболеваемости ЗНО желудка и всех ОПС без кишечника.

По данным таблицы 8 можно видеть, что увеличение как достигнутого возраста (с 30 до 60 лет) так и возраста начала облучения (с 10 до 30 лет) приводит к увеличению величины ИОР и ее статистической значимости как для рака желудка, так и для ЗНО всех ОПС, за исключением кишечника. При этом не наблюдалось достоверных отличий при разных возрастах.

Также было оценено влияние на величины риска таких факторов, как ожирение, курение и уровень образования. Полученные оценки ИОР с данными факторами имели большие неопределенности, поэтому сделать вывод об их влиянии на величину дозовой зависимости на данном этапе не представилось возможным, и они не приводятся.

ИОР заболеваемости ЗНО желудка и всех ОПС без кишечника в зависимости от возраста

Таблица 8

[Table 8]

ERR of stomach cancer incidence and cancer of all digestive organs, excluding intestines, by age]

Параметры [Parameters]	Желудок [Stomach]			ЗНО ОПС без кишечника [Cancers of all digestive organs excluding intestines]		
	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [95% CI]	Р	ИОР/Гр [ERR/Gy]	95% ДИ [95% CI]	Р
<i>Достигнутый возраст [Attained age]</i>						
30 лет [30 years]	0,56	-1,70;2,82	> 0,5	0,30	-1,01;1,60	> 0,5
60 лет [60 years]	0,62	0,02;1,77	<0,05	0,59	0,05;1,31	<0,05
<i>Возраст на начало облучения [Age at exposure]</i>						
10 лет [10 years]	0,33	-0,46;1,12	0,41	0,31	-0,35;0,98	0,359
30 лет [30 years]	0,66	0,02;1,90	<0,05	0,52	0,02;1,27	<0,05

Заключение

Ранее в облученных популяциях уже была зарегистрирована связь между возникновением ЗНО ОПС и облучением. Так, в когорте работников ПО «Маяк» было обнаружено увеличение стандартизованных по возрасту и полу показателей заболеваемости раком желудка, связанное с профессиональным внешним γ -облучением, при поглощенной в стенке желудка дозе более 0,2 Гр [12]. В этой же когорте получен статистически значимый относительный риск заболеваемости раком желудка 1,48 (95% ДИ 1,10; 1,98) при поглощенной в стенке желудка дозе внешнего гамма-излучения более 1,0 Гр [13].

В исследовании риска ЗНО верхнего пищеварительного тракта (ротовая полость, пищевод, желудок) в японской когорте выживших после ядерной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки (LSS) рак слюнной железы продемонстрировал линейную зависимость от дозы с ИОР 2,54/Гр (95% ДИ: 0,69; 6,1). ИОР для рака пищевода с учетом курения составил 0,36/Гр (95% ДИ: 0,01;0,86, $p < 0,05$). Риск рака желудка значительно увеличивался с увеличением дозы, в соответствии с линейной моделью ИОР, и составил 0,36/Гр (95% ДИ 0,22;0,50) [14].

При оценке риска заболеваемости солидными ЗНО в УКАОН в 2020 г., ИОР 1 Гр составил 0,75 (95% ДИ: 0,39; 1,13), $p < 0,001$. В структуре заболеваемости солидных ЗНО в УКАОН все органы пищеварительной системы (ОПС) составляли 40% от всех случаев ЗНО (1822 случая из 4537), ЗНО желудка – 16% от всех ЗНО (726 случаев), ЗНО ОПС без кишечника – 30% (1375 случаев) [3].

В текущем исследовании впервые был проведен анализ риска заболеваемости ЗНО желудка в когорте лиц, хронически облученных на Южном Урале, и показано наличие положительного и статистически значимого дозового ответа за 63-летний период. Дозовая зависимость имела линейный характер и наблюдалась уже при 2-летнем минимальном латентном периоде: ИОР составил 0,98/Гр (95% ДИ 0,09;2,10), $p=0,029$. Результаты согласуются с данными в Японской когорте (доверительные интервалы перекрываются) и с данными в когорте работников ПО «Маяк».

Для ЗНО всех ОПС, исключая кишечник, была получена положительная линейная дозовая зависимость с 90% значимостью ИОР=0,58/Гр (95% ДИ: -0,03;1,31; 90% ДИ:

0,06;1,19). Величины риска развития ЗНО других органов пищеварительной системы (ротовой полости, пищевода, печени, желчного пузыря и желчных протоков, поджелудочной железы) не показали значимой дозовой зависимости от дозы на желудок. Не было получено доказательств модификации дозового ответа нерадиационными факторами (пол, возраст начала облучения, достигнутый возраст, этническая принадлежность, факт эвакуации, ситуация облучения, курение, ожирение, рак у родственников, календарный период).

Созданная когорта, объединяющая лиц, облученных в 2 авариях, является хорошим потенциалом для будущих исследований отдельных локализаций ЗНО. Готовится статья с анализом риска ЗНО кишечника от дозы на кишечник.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Крестинина Л.Ю. – дизайн исследования, анализ риска, интерпретация данных, дизайн статьи, написание статьи.

Завьялов Д.А. – участие в анализе риска, обсуждение результатов, подготовка разделов статьи, оформление таблиц, форматирование.

Благодарности

Выражаем благодарность коллективу биофизической лаборатории УНПЦ РМ и лично М.О. Дегтевой, Е.А. Шишкиной, Е.И. Толстых за предоставленные оценки индивидуальных доз и коллективу отдела Базы данных «Человек» под руководством Н.В. Старцева за обновленные данные регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ, а также коллективу эпидемиологической лаборатории и Епифановой С.Б. за подготовку данных к анализу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках выполнения НИР по Государственному заданию при финансовой поддержке ФМБА России.

Литература

1. Аклев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю. Радио-эпидемиологические исследования на Урале: итоги и перспективы // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 31-44. DOI:10.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44.
2. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Аклев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения. Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393-402.
3. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Риск заболеваемости солидными злокачественными новообразованиями в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1956–2017 // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 6–17. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
4. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. Риск смерти от солидных злокачественных новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения: 1950–2019 // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 19-31. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
5. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. 239 с.
6. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L. et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries // CA A Cancer Journal for Clinicians. 2021. Vol. 71. № 3. P. 209-249. doi:10.3322/caac.21660.
7. Parkin D.M., Whelan S.L., Ferlay J. et al. Cancer Incidence in Five Continents volume VIII. IARC Scientific publication. Lyon, France. 2002. № 155. P. 831.
8. Дегтева М.О., Напье Б.А., Толстых Е.И. и др. Распределение индивидуальных доз в когорте людей, облученных в результате радиоактивного загрязнения реки Течи // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 3. С. 46–53. DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475.
9. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose from Environmental Exposures // Health Physics. 2019. Vol. 117, № 4. P. 378–87. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
10. Shishkina E.A., Napier B.A., Preston D.L., Degteva M.O. Dose estimates and their uncertainties for use in epidemiological studies of radiation-exposed populations in the Russian Southern Urals // PLOS One. 2023. Vol. 18, № 8. DOI: 10.1371/journal.pone.0288479.
11. Preston D.L., Lubin J., Pierce D., McConney. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Company, 1993.
12. Жунтова Г.В., Азизова Т.В., Григорьева Е.С. и др. Показатели заболеваемости раком желудка в когорте работников предприятия атомной промышленности // Вопросы радиационной безопасности. 2022. № 3 (107). С. 80-87.
13. Жунтова Г.В., Григорьева Е.С., Азизова Т.В. Риск заболеваемости раком желудка у работников радиационно опасного предприятия // Анализ риска здоровью. 2019. № 1. С. 40–49. DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.04.
14. Sakata R., Preston D.L., Brenner A.V. et al. Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors // Radiation Research. 2019. Vol. 192, № 3, P. 331–344. DOI:10.1667/RR15386.1.

Поступила: 27.10.2023 г.

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

ORCID: 0000-0003-0497-5879

Завьялов Данила Александрович – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

ORCID: 0009-0005-8754-1655

Для цитирования: Крестинина Л.Ю., Завьялов Д.А. Риск развития злокачественных новообразований органов пищеварения, исключая кишечник, в Уральской когорте аварийно-облученного населения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 18–28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-18-28

The risk of developing cancer of the digestive organs (excluding intestines) in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort

Lyudmila Yu. Krestinina, Danila A. Zavyalov

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

Evaluation of the low dose effect on population health is still a relevant issue. It requires further studies to improve our understanding of these effects. To solve this problem, it is important to conduct studies of the late effects of radiation exposure with direct risk estimation in the population that combines all strata of the society: people of different sex, age, initial health status, social and economic status. Moreover, this population should be sizeable and has been followed up for a long-term period. This manuscript is the first to present the findings of the analysis of the incidence risk of cancer of all the digestive organs, excluding intestines, and stomach cancer taken separately in members of the Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort depending on the dose accumulated in the stomach over the period from 1956 through 2018. This cohort is comprised of individuals exposed in the Southern Urals in two radiation accidents (on the Techa River and in the East-Urals Radioactive Trace) over the period from 01.01.1950 through 31.12.1960. The cohort also includes those who were born during this period; they could have additional in utero exposure or have exposed parents. The population was affected by long-term combined exposure (external and internal) at the low-to-medium soft tissue dose range (up to 1.1 Gy). The size of the incidence cohort was 47,282 people. Over the follow-up period 01.01.1956–31.12.2018, the number of person-years made up 1 292 930; mean dose to the stomach was 47 mGy, maximum – 1,132 mGy. Excess relative risk of the cancer incidence of the digestive organs was assessed using the Poisson regression analysis. Calculations were performed using the EPICURE Statistical software package. Excess relative risk for stomach cancer with a 2-year minimal, was 0.98/Gy ($p=0.026$), for all cancers of the digestive organs, excluding intestines, – 0.58/Gy, $p=0.06$. There was no significant modification of the effect by non-radiation factors. These values of excess relative risk do not disagree with the results of similar studies in the Japanese cohort of the atomic bomb survivors who were compatible in terms of age but had acute exposure at higher doses. No significant dose dependence of the cancer incidence of the oral cavity, esophagus, liver, or pancreas was detected at this stage.

Key words: stomach cancer, excess relative risk, cancers of digestive organs, chronic exposure, low doses, Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort (SUPER Cohort).

Authors' personal contribution

Krestinina L.Yu. – study design, risk analysis, data interpretation, article design, article writing. D.A. Zavyalov – participation in risk analysis, discussion of results, preparation of sections of the article, design of tables, text formatting.

Acknowledgments

We express our gratitude to the team of the biophysical laboratory of the Ural Research Center for Radiation Medicine and personally to M.O. Degteva, E.A. Shishkina, E.I. Tolstykh for providing estimates of individual doses, and to the team of the Human Database department under the leadership of N.V. Startsev. for updated data from the registers of the medical and dosimetric database of the URCRM, as well as to the team of the epidemiological laboratory and S.B. Epifanova. for preparing the data for analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of financing

The work was carried out as part of the research work on the Government assignment with the financial support of the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

References

1. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO. Radioepidemiological studies in the Urals: outcomes and future directions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4):31-44. (In Russian) DOI: 0.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44.
2. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019; 21 (3): 393-402. (In Russian).
3. Krestinina LYu, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Solid cancer incidence risk in the Ural cohort of the accidentally exposed population: 1956–2017. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13 (3): 6-17. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-6-17.
4. Krestinina LYu, Silkin SS. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950–2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4):31-44. (In Russian) DOI: 0.21514/1998-426X-2021-14-4-31-44.

Lyudmila Yu. Krestinina

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

- Hygiene*. 2023; 16 (1): 19-31. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
5. Kaprin AD, Starinsky VV, Shakhzadova AO. Zlokachestvennye novoobrazovaniya v Rossii v 2022 godu (zabolevaemost' i smertnost') = Malignant neoplasms in Russia in 2022 (morbidity and mortality). Moscow: Moscow P.A. Herzen Institute – branch of the Federal State Budgetary Institution "National Institute of Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2022. 239 p. (In Russian).
 6. Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, et al. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA Cancer Journal for Clinicians*. 2021;71 (3): 209-249. DOI: 10.3322/caac.21660.
 7. Parkin DM, Whelan SL, Ferlay J, Teppo L, Thomas DB. Cancer Incidence in Five Continents volume VIII. № 155. Lyon, France: IARC Scientific publication; 2002. 831 p.
 8. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Bougrov NG, Krestinina LY, et al. Individual Dose Distribution in Cohort of People Exposed as a Result of Radioactive Contamination of the Techa River. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and radiation safety*. 2019;3: 46-53. (In Russian) DOI: 10.12737/article_5cf2364cb49523.98590475.
 9. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AY, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures. *Health Physics*. 2019;117 (4): 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
 10. Shishkina EA, Napier BA, Preston DL, Degteva MO. Dose estimates and their uncertainties for use in epidemiological studies of radiation-exposed populations in the Russian Southern Urals. *PLOS One*. 2023;18 (8): e0288479. DOI: 10.1371/journal.pone.0288479.
 11. Preston D., Lubin J, Pierce D, McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.
 12. Zhuntova GV, Azizova TV, Grigoryeva YES, Zavarukhina TP, Fomin YEP. Stomach cancer incidence rates in a cohort of workers employed at a nuclear production facility. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Issues of radiation safety*. (In Russian) 2022;3 (107): 80-87.
 13. Zhuntova GV, Grigoryeva ES, Azizova TV. Risk of morbidity with stomach cancer among workers employed at radiation-hazardous enterprise. *Analiz Riska Zdorov'yu = Health Risk Analysis*. 2019;1: 40-49. (In Russian) DOI: 10.21668/health.risk/2019.1.04.eng.
 14. Sakata R, Preston, DL, Brenner AV, Sugiyama H, Grant EJ, Rajaraman P, et al. Radiation-Related Risk of Cancers of the Upper Digestive Tract among Japanese Atomic Bomb Survivors. *Radiation research*. 2019;192 (3): 331-344. DOI: 10.1667/RR15386.1.

Received: October 27, 2023

For correspondence: Lyudmila Yu. Krestinina – candidate of medical sciences, head of the epidemiological laboratory of Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (Vorovsky str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ludmila@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0003-0497-5879

Danila A. Zavyalov – researcher of epidemiological laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0009-0005-8754-1655

For citation: Krestinina L.Yu., Zavyalov D.A. The risk of developing cancer of the digestive organs (excluding intestines) in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. (In Russian). P. 18–28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-18-28

Риск развития злокачественных новообразований толстого кишечника в Уральской когорте аварийно-облученного населения

С.С. Силкин, Л.Д. Микрюкова

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

Злокачественные новообразования толстого кишечника (ободочной кишки, прямой кишки, ректосигмоидного соединения и ануса) являются одной из самых распространенных локализаций. Помимо основных факторов риска развития онкологии данной локализации (нарушения в диете, ожирение, употребление алкоголя и табака, контакт с некоторыми химическими веществами), ряд авторов отмечают в своих исследованиях влияние ионизирующего излучения. Целью данного исследования являлась прямая оценка избыточного относительного риска заболевания злокачественными новообразованиями толстого кишечника у населения, подвергшегося длительному хроническому облучению преимущественно в диапазоне малых доз и низкой мощности дозы, входящего в Уральскую когорту аварийно-облученного населения. Материалы и методы: аналитическая когорта включала 47 282 человека, период наблюдения — 63 года (с 1956 по 2018 г.), число человеко-лет под риском — 1 292 930. Территория наблюдения за заболеваемостью ограничена 5 районами Челябинской области, городами Челябинском и Озерском. За период с 1956 по 2018 гг. на территории наблюдения зарегистрировано 462 случая заболевания злокачественными новообразованиями толстого кишечника. В качестве реперной использовалась доза на толстый кишечник. Средняя поглощенная доза составила 69 мГр, максимальная — 1824 мГр. Анализ проводился с использованием программ статистического пакета EpiSure методом Пуассоновской регрессии с применением простой параметрической модели избыточного относительного риска. Значимость результатов оценивалась методом максимального правдоподобия с 95% вероятностью. Результаты: у членов Уральской когорты аварийно-облученного населения выявлена зависимость базовых уровней заболеваемости злокачественными новообразованиями толстого кишечника от таких факторов, как пол ($p < 0,001$), национальность ($p = 0,001$), достигнутый возраст ($p < 0,001$), образование ($p < 0,001$), год рождения членов когорты ($p < 0,001$), наличие рака у родственников первой линии ($p = 0,03$). Анализ риска не выявил статистически значимой дозовой зависимости избыточного относительного риска заболеваний злокачественными новообразованиями всего толстого кишечника, так же, как и не было выявлено значимой зависимости избыточного риска заболеваний злокачественными новообразованиями ободочной кишки, прямой кишки. Проведена оценка влияния модифицирующих факторов на величину радиогенного риска. Оценка избыточного относительного риска развития злокачественных новообразований толстого кишечника в данной когорте проводится впервые.

Ключевые слова: Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН), злокачественные новообразования толстого кишечника, избыточный относительный риск, облученное население.

Введение

Злокачественные новообразования (ЗНО) толстого кишечника занимают одно из лидирующих мест в структуре онкологической заболеваемости в мире и в России. По данным IARC (Международного агентства по изучению рака), в мире ежегодно регистрируется более 1 млн заболевших раком данной локализации [1]. В России ЗНО ободочной кишки (7,1%) и прямой кишки, ректосигмоидного соединения (РСС), ануса (5,1%) находятся на 5-м и 7-м местах соответственно среди самых распространенных локализаций ЗНО в общей (оба пола) структуре онкологической заболеваемости. Среди мужского населения эти локализации занимают 5-е и 6-е места (ободочной киш-

ки — 7%, прямой кишки, РСС и ануса — 5,8%), у женщин — ЗНО ободочной кишки на 4-м месте — 7,2%, ЗНО прямой кишки, РСС и ануса — на 6-м месте (4,6%). В динамике наблюдается повышение заболеваемости ЗНО данных локализаций. За последнее десятилетие прирост ЗНО ободочной кишки по России составил 25,3%, ЗНО прямой кишки, РСС, ануса — 15,5%. Среднегодовой прирост составляет 1,4–2,2% [2].

Основными факторами риска развития ЗНО толстого кишечника являются возраст (коэффициенты заболеваемости резко возрастают после 50-летнего возраста и достигают пика в возрасте 85 лет и старше, средний возраст пациентов составляет 67 лет) [2], нарушения в диете

Силкин Станислав Сергеевич

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

(чрезмерное потребление жиров, мясных продуктов с высоким содержанием миоглобина), употребление алкоголя и табакокурение, низкая двигательная активность и ожирение [3]. ЗНО толстого кишечника встречаются чаще у мужчин, чем у женщин, и эта разница наиболее выражена в возрасте 65–74 лет, в котором соотношение заболеваемости у мужчин и женщин составляет 17 к 10 [4].

Как известно, слизистая желудочно-кишечного тракта отличается высокой пролиферативной способностью, следовательно, является чувствительной к действию ионизирующего излучения. Помимо этого, толстый кишечник является органом, который активно участвует в выведении радионуклидов. Именно в толстом кишечнике радионуклиды задерживаются на наиболее длительное время.

В некоторых исследованиях отмечается влияние ионизирующего излучения на риск развития ЗНО толстого кишечника. У лиц, переживших атомную бомбардировку в Японии, отмечено повышение риска на 53% по отношению к общей популяции [5]. Кроме того, повышение риска развития ЗНО прямой кишки и толстого кишечника отмечается среди пациентов, которые перенесли лучевую терапию по поводу ЗНО органов малого таза [6,7]. В когорте INWORKS (работники атомной промышленности из США, Великобритании и Франции) было отмечено повышение избыточного относительного риска (ИОР) заболеваний ЗНО толстого кишечника и прямой кишки, но зависимость от дозы была статистически не значимой [8].

Цель исследования – получение прямых оценок радиогенного риска заболеваний ЗНО толстого кишечника в Уральской когорте аварийно-облученного населения (УКАОН) за период с 1956 по 2018 г.

УКАОН включает в себя лиц, облученных на Южном Урале на территории Челябинской и Курганской областей в период с начала 1950 г. по конец 1960 г. в результате 2 радиационных аварий (сброс жидких радиоактивных отходов в реку Течу и авария 1957 г. в хранилище жидких радиоактивных отходов, которая привела к образованию Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа) [9].

Данная работа является продолжением серии публикаций, посвященных анализу риска развития органоспецифических ЗНО у членов УКАОН. Ранее аналогичных исследований среди облученных на Южном Урале не проводилось в связи с недостаточной статистикой.

Материалы и методы

Сбор информации о заболеваемости ЗНО на постоянной основе проводился в УНПЦ РМ с 1956 г. на территории 5 районов Челябинской области (Кунашакский, Аргаяшский, Сосновский, Каслинский и Красноармейский), а также городов Челябинска и Озерска. Эти территории определяли территорию наблюдения за заболеваемостью ЗНО в УКАОН. Период наблюдения был ограничен началом 1956 г., когда началась официальная регистрация ЗНО в Челябинской области. В соответствии с этим из аналитической когорты были исключены лица со случаями заболеваний ЗНО, зарегистрированные до 1956 г. (начало наблюдения) и после 2018 г. (конец периода наблюдения). Также были исключены лица, которые не проживали на территории наблюдения за заболеваемостью в период с 1956 по 2018 г. В конечном итоге численность когорты для анализа ра-

диогенного риска заболеваний ЗНО толстого кишечника составила 47 282 человека.

Демографические характеристики когорты УКАОН для анализа риска заболеваний ЗНО толстого кишечника представлены в таблице 1.

В когорте преобладают женщины (55%), русские составляют 64%. На начало наблюдения в когорте преобладают лица молодого возраста (до 40 лет) – 78%. Из общего числа члены когорты, облученные в прибрежных населенных пунктах реки Течи, составляют 58%, облученные на ВУРСе – 42%.

Жизненный статус

Жизненный статус членов когорты на конец периода наблюдения представлен на рисунке 1.

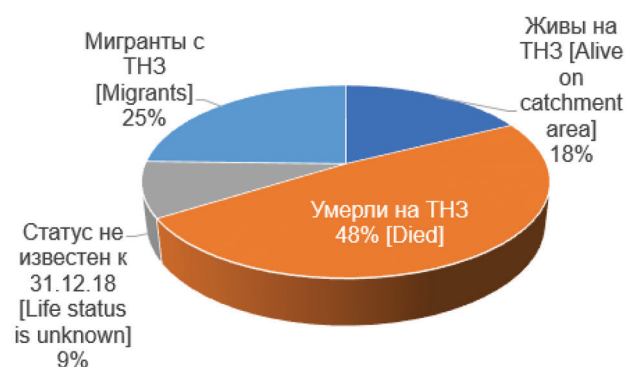


Рис. 1. Жизненный статус членов УКАОН на 31 января 2018 г. [Fig. 1. Life status of the cohort members at January 31, 2018]

Известно, что к концу 2018 г. живыми на территории наблюдения за заболеваемостью оставались 8329 (18%) человек, умерло 22 942 (48%) человека. У 92% умерших известна причина смерти (имеются акты о смерти). Статус не известен у 4401 (9%) человек. Мигрантами с территории наблюдения являются 11 610 (25%) человек.

Случаи ЗНО

С 1956 г. информация о случаях ЗНО собиралась на бумажных носителях. Начиная с 2006 г., осуществлялось сопоставление данных ракового регистра Уральского научно-практического центра радиационной медицины (УНПЦРМ) с популяционным регистром Челябинского областного онкологического диспансера. Основными источниками служили извещения о впервые выявленном случае ЗНО и медицинские свидетельства о смерти. Дополнительными источниками выступали данные о ЗНО из других медицинских документов (информация из Межведомственного экспертного совета, данные ВТЭК, медицинская документация клиники УНПЦРМ – истории болезни, амбулаторные карты, выписные эпикризы из других лечебных учреждений).

Всего на территории наблюдения за заболеваемостью за период с 1956 по 2018 г. было зарегистрировано 462 случая ЗНО толстого кишечника (включая слепую, ободочную и сигмовидную кишки, прямую кишку, ректосигмоидное соединение), из них 221 случай ЗНО ободочной кишки, 187 случаев прямой кишки. Распределение случаев ЗНО толстого кишечника по полу, этнической принадлежности, возрасту на начало облучения представлено в таблице 2.

Демографические характеристики когорты УКАОН за период с 1956 по 2018 г.

Таблица 1

[Table 1]

Demographic characteristics of the SUPER cohort for 1956–2018]

Характеристики [Characteristics]	Человек в когорте [Persons]	На территории наблюдения [On catchment area]		
		Человеко-лет [Person-years]	Доза на ободочную кишку, Гр [Colon dose, Gy]	
			Средняя [Mean]	Максимальная [Maximum]
Пол [Sex]				
Мужчины [Male]	21 191	551 249	0,07	1,72
Женщины [Female]	26 091	741 681	0,07	1,82
Этническая принадлежность [Ethnicity]				
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	17 007	566 478	0,09	1,36
Русские [Russians]	30 275	726 452	0,06	1,82
Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]				
< 40	36 808	556 093	0,06	1,82
≥ 40	10 474	736 838	0,08	1,66
Авария, приведшая к облучению [Accident of exposure]				
Облученные на реке Тече [Techa River exposed]	27 337	849 934	0,10	1,82
Облученные на ВУРСе [EURT exposed]	19 945	442 997	0,02	0,23
Вся когорта [Total]	47 282	1 292 930		

Таблица 2

Распределение случаев ЗНО толстого кишечника в УКАОН в зависимости от демографических характеристик за период с 1956 по 2018 г.

[Table 2]

Distribution of cases of colon cancer in the cohort depending on demographic characteristics for 1956–2018]

Характеристики [Characteristics]	ЗНО ободочной кишки (C18) [Colon cancer cases]	ЗНО прямой кишки (C20) [Rectum cancer cases]	ЗНО других отделов толстого кишечника (ректосигмоидное соединение, задний проход, анальный канал) (C19, C21) [Cancer of other parts of the large intestine (rectosigmoid, anus, anal canal)]	Всего ЗНО толстого кишечника (C18-C21) [Total colon cancer cases]
<i>Пол [Sex]</i>				
Мужчины [Male]	84	98	25	207
Женщины [Female]	137	89	29	255
<i>Этнические группы [Ethnicity]</i>				
Татары и башкиры [Tatars and Bashkirs]	79	59	25	163
Русские [Russians]	142	128	29	299
<i>Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]</i>				
< 40	4	1	0	5
≥ 40	217	186	54	457
<i>Авария, приведшая к облучению [Accident of exposure]</i>				
Облученные на реке Тече [Techa River exposed]	147	137	39	323
Облученные на ВУРСе [EURT exposed]	74	50	15	139
Вся когорта [Total]	221	187	54	462

На рисунке 2 показаны методы верификации диагнозов в изучаемой когорте лиц со злокачественными новообразованиями кишечника за 63-летний период наблюдения. Среди всей исследуемой когорты за весь период наблюдения (с 1956 по 2018 г.) доля диагнозов, верифицированных только на основании свидетельств о смерти, составила 12% (55 случаев). Диагноз подтвержден морфологическими методами исследования в 69% от всех случаев ЗНО данной локализации, инструментальными методами исследования – в 8%, только на основании клинических методов – в 11%. В сумме морфологический и инструментальный методы исследования за весь период наблюдения составили 77% от всех способов подтверждения диагноза ЗНО толстого кишечника. За последние годы наблюдения процент морфологических и инструментальных методов подтверждения ЗНО толстого кишечника значительно выше – 85%. Учитывая факт, что часть информации о случаях ЗНО была получена на основе ретроспективных данных, эти показатели качества следует считать удовлетворительными.

Дозы

Для расчета доз облучения использовалась разработанная в УНПЦ РМ дозиметрическая система TRDS-2016 [10]. Она позволяет рассчитать дозы облучения 23 органов с учетом внешнего и внутреннего облучения, а также истории проживания членов когорты, пола, возраста каждого человека. Расчет дозы осуществляется для ^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , ^{103}Ru , ^{106}Ru . В системе учитывались рацион питания, а также метаболизм, связанный с возрастом и размерами тела [11–13].

В качестве реперной в анализе была использована поглощенная доза на толстый кишечник. Индивидуальная доза на толстый кишечник рассчитывалась с момента вступления человека в когорту до момента последнего известного жизненного статуса или смерти. Для анализа заболеваемости учитывалась доза, накопленная к моменту диагноза ЗНО с учетом минимального латентного периода. Средняя поглощенная доза на толстый кишечник у членов УКАОН составила 69 мГр, максимальная – 1824 мГр.

Статистические методы

Для проведения многофакторного анализа и стратификации данных использовался статистический пакет EPICURE (программы Amfit и Datab).

В программе Datab все случаи ЗНО толстого кишечника и человеко-годы были стратифицированы по следующим характеристикам: полу, этнической принадлежности (русские, татары и башкиры), факту переселения, году рождения членов когорты (до 1937 г. и после), календарному периоду (7 пятилетних периодов с 1956 по 2018 г.), возрасту начала облучения (0–9, 10–19, 20–39, 40–59, 60 лет и старше), принадлежности к аварии, в которой произошло облучение (река Теча, ВУРС, обе аварии), территории наблюдения, наличию ЗНО у родственников первой линии родства (есть ЗНО, нет, не известно), образованию (начальное, среднее или высшее образование, не известно), курению (курит, не курит, курил, но бросил, не известно), ожирению (нет, есть, не известно), городской/сельский житель (городским считался житель, который после миграции из сельской местности прожил в городе

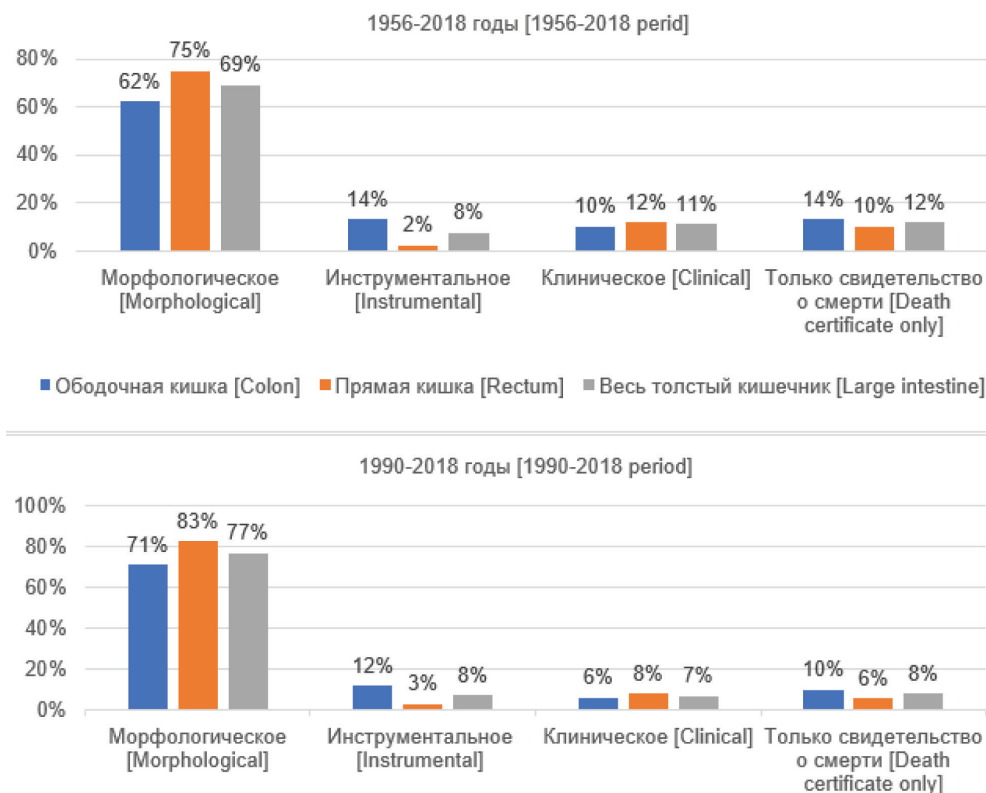


Рис. 2. Методы верификации случаев ЗНО
[Fig. 2. Verifying methods of cancer cases]

не менее 10 лет). Также была проведена стратификация случаев ЗНО и человеко-лет по дозовым группам с нижней границей дозы (0, 2, 10, 20, 50, 100, 200, 500, более 500 мГр).

Базовые уровни оценивались в программе Amfit. Она позволяет провести многофакторный анализ и оценить одномоментное влияние сразу нескольких факторов на показатели заболеваемости ЗНО, независимо от дозы, а также оценить статистическую значимость каждого из факторов.

Расчет избыточного относительного риска (ИОР) проводился в программе Amfit. Для расчета использовалась простая параметрическая модель ИОР:

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

где $\lambda(a,d,z)$ – общий риск заболеваний ЗНО в зависимости от достигнутого возраста (a), дозы (d) и других факторов (z); z_0 – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни (λ_0); z_i – факторы, которые могут модифицировать ИОР. Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа $p(d)$ на функцию модификации эффекта ($\varepsilon(z_i)$).

Результаты исследования

Оценка зависимости заболеваемости ЗНО толстого кишечника от характеристик, не связанных с облучением

Для оценки влияния различных нерадиационных факторов на базовые уровни заболеваемости ЗНО толстого кишечника в программе Amfit были протестированы все доступные факторы, по которым была проведена стратификация. Для заболеваемости ЗНО ободочной кишки статистически значимыми факторами были: принадлежность к этнической группе ($p=0,047$), год рождения членов когорты ($p<0,001$), пол, связанный с возрастом ($p<0,001$), образование ($p<0,001$).

В случае заболеваемости ЗНО прямой кишки факторами, влияющими на базовые уровни, выступали: пол ($p<0,001$), этническая принадлежность ($p=0,001$), наличие ЗНО у родственников первой линии родства ($p=0,03$), год рождения членов когорты ($p<0,001$), достигнутый возраст ($p<0,001$).

При анализе заболеваемости ЗНО всего толстого кишечника вместе (ободочной кишки, прямой кишки, ректосигмоидного соединения и ануса) оценка факторов, включаемых в модель расчета базовых уровней, показала статистически значимое влияние на величину коэффициентов заболеваемости ЗНО толстого кишечника при одновременном включении в модель следующих параметров: пол ($p<0,001$), национальность ($p=0,004$), образование ($p<0,001$), наличие ЗНО у родственников

первой линии родства ($p=0,03$), достигнутый возраст ($p<0,001$).

Все статистически значимые переменные в итоге были включены в конечную модель оценки дозовой зависимости.

Оценка дозовой зависимости

Анализ риска заболеваний ЗНО всего толстого кишечника, ЗНО ободочной и прямой кишки у членов когорты УКАОН проводился с использованием дозы на толстый кишечник. В программе Amfit протестированы виды зависимости заболеваний ЗНО от дозы (линейная, квадратичная и линейно-квадратичная). В результате было получено, что, несмотря на отсутствие значимых величин, риска, дозовая зависимость лучше описывалась линейной моделью. Квадратичная модель ($p>0,5$) так же, как и добавление квадратичного компонента к линейной модели, были статистически не значимы ($p>0,5$).

Расчет ИОР заболеваний всеми ЗНО толстого кишечника, ободочной кишки и прямой кишки проведен с использованием линейной модели и двухлетнего минимального латентного периода. В результате анализа получен положительный ИОР заболеваний всеми ЗНО толстого кишечника, равный 0,17/Гр, но статистически незначимый ($p>0,5$; 95% ДИ: -0,61;0,95) (табл. 3).

В таблице 3 также представлены ИОР заболеваний ЗНО ободочной кишки, который был отрицательным (-0,26/Гр) и статистически не значимым ($p>0,5$; 95% ДИ: -1,22;0,71), а также ИОР заболеваний ЗНО прямой кишки, который был положительным (0,36), но статистически не значимым ($p>0,5$; 95% ДИ: -0,91;1,62).

Была проведена оценка возможной модификации величины риска заболевания ЗНО всего толстого кишечника и отдельно ЗНО ободочной кишки и прямой кишки нерадиационными факторами (пол, этническая принадлежность, факт переселения, принадлежность к облученному населению в населенных пунктах на реке Тече/ВУРСа, принадлежность к поколению облученных, курение, индекс массы тела, городской житель/сельский житель, наличие ЗНО у родственников первой линии родства, период наблюдения, образование, достигнутый возраст, возраст начала облучения). В результате не было выявлено статистически значимых величин ИОР для данных локализаций в различных группах населения при оценке возможной модификации эффектов.

Обсуждение

Анализ риска заболеваний ЗНО толстого кишечника и отдельных его частей проведен впервые. Исследования, посвященные риску развития ЗНО различных локализа-

Величина избыточного относительного риска заболеваний ЗНО толстого кишечника в УКАОН

Таблица 3

[Table 3]

ERR values of colorectal cancer incidence]

Локализация [Localization of cancer]	ИОР/ Гр [ERR/Gy]	P	95% ДИ [95% CI]
Ободочная кишка (C18) [Colon]	-0,26	>0,5	-1,22;0,71
Прямая кишка (C20) [Rectum]	0,36	>0,5	-0,91;1,62
Весь толстый кишечник (C18-C21) [Whole large intestine]	0,17	>0,5	-0,61;0,95

ций, стали возможны благодаря объединению облученного населения в 2 радиационных авариях, произошедших на Южном Урале, в одну когорту. Это способствовало увеличению статистической силы исследования за счет увеличения численности изучаемой популяции, увеличению количества анализируемых случаев заболеваний ЗНО.

Интерес к риску развития ЗНО пищеварительной системы в целом и толстого кишечника в частности у лиц, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения, обусловлен широким распространением данной локализации ЗНО как у облученных лиц, так и у всего населения. Показано, что по данным Российского государственного медико-дозиметрического регистра 35,5% от всех ЗНО, выявленных у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС, приходится на ЗНО пищеварительной системы [14]. Однако литературные данные, посвященные радиогенному риску развития ЗНО толстого кишечника, содержат противоречивую информацию относительно наличия значимой зависимости «доза – эффект», и их крайне мало.

Исследования в японской когорте LSS свидетельствуют о связи риска развития ЗНО толстого кишечника с дозой внешнего облучения по данным как заболеваемости, так и смертности. В работе Pierce D.A., Shimizu Y., Preston D.L. et al. показан статистически значимый риск смерти от ЗНО толстого кишечника, равный 0,51/Гр (90% ДИ: 0,25;0,86). ИОР смерти от ЗНО прямой кишки был отрицательным и статистически не значимым (-0,03, 90% ДИ: n/a;0,26) [15]. Sugiyama H., Misumi M., исследовавшие заболеваемость колоректальным раком, обнаружили статистически значимую линейную зависимость «доза – эффект» для ЗНО всего толстого кишечника (ИОР/Гр для 70-летних лиц, подвергшихся облучению в 30-летнем возрасте, равен 0,63, 95% ДИ: 0,34;0,98). Для ЗНО прямой кишки не было выявлено значимого риска как в исследованиях японской когорты (ИОР/Гр = 0,023, 95% ДИ: -0,081;0,13) [16], в исследованиях когорт работников атомных производств [17], так и в нашем исследовании в УКАОН (ИОР был положительным, но статистически не значимым, 0,36/Гр; 95% ДИ: -0,91;1,62). Для понимания различий с японской когортой в риске заболеваний ЗНО всего толстого кишечника (в УКАОН получен незначимый положительный риск, равный 0,17/Гр; 95% ДИ: -0,61;0,95) необходимо дальнейшее изучение возможного влияния на эффект дополнительных модифицирующих факторов, а также разного влияния острого и хронического облучения, мощности дозы.

Результаты данной работы достаточно сопоставимы с таковыми, полученными в исследовании риска заболеваний солидными ЗНО в когорте реки Течи [18], в котором были получены незначимые риски для ободочной кишки (ИОР/100 мГр равен 0,01; 95% ДИ: <0;0,50) и прямой кишки (ИОР/100 мГр равен -0,00; 95% ДИ: <-0,01;0,43) без учета фактора курения и отрицательными статистически незначимыми (ИОР/100 мГр равен -0,01; 95% ДИ: <-0,02;0,45 для ободочной кишки, -0,03; 95% ДИ: <-0,03;0,37 для прямой) при учете курения.

В отчете НКДАР ООН за 2000 г. [19] рассмотрены данные о риске развития ЗНО толстого кишечника в зависимости от характера излучения и сделан вывод о низкой точности в исследованиях в диапазоне малых доз внеш-

него воздействия радиации с низкой ЛПЭ и внутреннего воздействия с низкой и высокой ЛПЭ. В отчете за 2006 г. [20] сообщается, что информации о радиогенном риске развития ЗНО прямой кишки при дозах менее 1 Гр очень мало или вообще нет, но очевиден риск при высоких дозах в десятки Гр.

Увеличение периода наблюдения в будущих исследованиях, большее количество случаев заболеваний ЗНО толстого кишечника, возможно, помогут снизить неопределенности.

Заключение

В результате проведенного анализа не было получено доказательства дозовой зависимости заболеваемости всеми ЗНО толстого кишечника суммарно и отдельно ЗНО ободочной кишки и прямой кишки для членов УКАОН, получивших хроническое внешнее и внутреннее облучение в диапазоне доз до 1,82 Гр.

Определение ИОР в различных группах членов когорты с целью оценки возможной модификации риска в зависимости от таких факторов, как: пол, этническая принадлежность, факт переселения, принадлежность к облученному населению в населенных пунктах на реке Тече/ВУРСа, принадлежность к поколению облученных, курение, индекс массы тела, городской житель/сельский житель, наличие ЗНО у родственников первой линии родства, период наблюдения, образование, достигнутый возраст, возраст начала облучения, также не выявило значимой зависимости.

Полученные результаты могут являться дополнением знаний и количественных оценок риска ЗНО органов пищеварительной системы при длительном хроническом облучении в диапазоне доз ниже 1–2 Гр.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Силкин С.С. – разработка дизайна исследования, анализ риска, интерпретация данных, написание статьи.

Микрюкова Л.Д. – участие в анализе риска, обсуждение результатов, подготовка разделов статьи.

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам биологической лаборатории УНПЦ РМ (М.О. Дегтевой, Е.А. Шишкиной, Е.И. Толстых) за расчет оценок индивидуальных доз, а также сотрудникам отдела Базы данных «Человек» УНПЦ РМ под руководством Н.В. Старцева за данные регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ, а также сотрудникам эпидемиологической лаборатории и лично С.Б. Епифановой за подготовку данных к анализу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России в рамках реализации государственного заказа по теме «Риски развития органоспецифических новообразований при хроническом облучении в Уральской когорте аварийно-облученного населения».

Литература

1. Arnold M., Sierra M.S., Laversanne M. et al. Global patterns and trends in colorectal cancer incidence and mortality // *Gut*. 2017. Vol. 66, No. 4. P. 683-691. DOI: 10.1136/gutjnl-2015-310912.
2. Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность) / Под редакцией А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. 252 с.
3. Ханевич М.Д., Хазов А.В., Хрыков Г.Н. и др. Факторы риска и профилактика колоректального рака // *Профилактическая медицина*. 2019. Т. 22, № 3. С. 107-111. DOI: 10.17116/profmed201922031107
4. Bray F., Ferlay J., Soerjomataram I. et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries // *CA Cancer Journal for Clinicians*. 2018. Vol. 68, No 6. P. 394-424.
5. Semmens E.O., Kopecky K.J., Grant E. et al. Relationship between anthropometric factors, radiation exposure, and colon cancer incidence in the Life Span Study cohort of atomic bomb survivors // *Cancer Causes Control*. 2013. Vol. 24, No. 1. P.27-37. DOI: 10.1007/s10552-012-0086-8.
6. Baxter N.N., Tepper J.E., Durham S.B. et al. Increased risk of rectal cancer after prostate radiation: a population-based study // *Gastroenterology*. 2005. Vol. 128, No 4. P. 819-24. DOI: 10.1053/j.gastro.2004.12.038. PMID: 15825064.
7. Parkin D.M., Darby S.C. Cancers in 2010 attributable to ionising radiation exposure in the UK // *British Journal of Cancer*. 2011. Vol. 105, № 2. P. 57-65. DOI: 10.1038/bjc.2011.485.
8. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D. et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS) // *British Medical Journal*. 2015. Vol. 351. h5359. DOI: 10.1136/bmj.h5359.
9. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев В.Н. и др. Уральская когорта аварийно-облученного населения // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019. № 3. С. 393-402.
10. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // *Health Physics*. 2019. Vol. 117, № 4. P. 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
11. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90 // *Health Physics*. 2011. Vol. 101, No. 1. P. 28-47.
12. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: 137Cs // *Health Physics*. 2013. Vol. 104, No. 5. P. 481-498.
13. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, No. 1. P. 87-127. DOI: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
14. Бирюков А.П., Иванов В.К., Максютов М.А. и др. Ионизирующее излучение как фактор риска развития злокачественных новообразований органов пищеварения (научный обзор) // *Радиация и риск*. 2001. Т. 12. С. 99-108.
15. Pierce D.A., Shimizu Y., Preston D.L. et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, part 1. Cancer: 1950-1990/RERF report N 11-95 // *Journal of Radiation Research*. 1996. Vol. 146. P. 9-17.
16. Sugiyama H., Misumi M., Brenner A. et al. Radiation risk of incident colorectal cancer by anatomical site among atomic bomb survivors: 1958-2009 // *International Journal of Cancer*. 2020. Vol. 146, No. 3. P. 635-645. DOI: 10.1002/ijc.32275.
17. Sont W.N., Zielinski J.M., Ashmore J.P. et al. First analysis of cancer incidence and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada // *American Journal of Epidemiology*. 2001. Vol. 153, No. 4. P. 309-318.
18. Davis F.G., Yu K.L., Preston D. et al. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956-2007 // *Radiation Research*. 2015. Vol. 184, No. 1. P. 56-65. DOI: 10.1667/RR14023.1.
19. United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources; Volume II: Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publications E.00.IX.3 and E.00.IX.4. United Nations: New York, 2000.
20. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. 13-322. United Nations: New York, 2008.

Поступила: 03.11.2023 г.

Силкин Станислав Сергеевич – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 454141, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: ssilkin@urcrm.ru
ORCID: 0000-0002-4412-4481

Микрюкова Людмила Дмитриевна – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории, Уральский научно-практический центр радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства России, Челябинск, Россия

Для цитирования: Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. Риск развития злокачественных новообразований толстого кишечника в Уральской когорте аварийно-облученного населения // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 2. С. 29-37. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-29-37

Radiogenic risk of colorectal cancer in the Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort

Stanislav S. Silkin, Lyudmila D. Mikryukova

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

Colorectal cancer (colon, rectum, rectosigmoid and anus) is one of the most frequently registered cancer sites. Apart from main risk factors for the development of cancer of this localization (dietary disorders, obesity, alcohol and tobacco use, contact with certain chemicals), a number of authors have noted in their studies the effect of ionizing radiation. The objective of this study was to directly assess the excess relative risk of colorectal cancer in the population exposed to long-term chronic radiation mainly in the range of low-dose and low dose rates. These people are included in the Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort. Materials and methods: the analytical cohort included 47,282 people, the follow-up period was 63 years (from 1956 to 2018), and the number of person years at risk was 1,292,930. The incidence catchment area includes five Chelyabinsk Oblast raions, the cities of Chelyabinsk and Ozersk. For the period from 1956 to 2018, 462 cases of colon cancer were registered in the follow-up territory. The colon dose was used as a reference dose. The mean absorbed dose was 69 mGy, the maximum dose – 1,824 mGy. The analysis was performed using Epicure statistical package programs by Poisson regression method with a simple parametric model of excess relative risk. Significance of the results was assessed by the maximum likelihood method with 95% probability. Results: In SUPER members, baseline colorectal cancer incidence rates were found to be dependent on such factors as sex ($p < 0.001$), ethnicity ($p = 0.001$), attained age ($p < 0.001$), education ($p < 0.001$), year of birth of cohort members ($p < 0.001$), presence of cancer in first degree relatives ($p = 0.03$). The risk analysis did not reveal statistically significant dose dependence of the excess relative risk of malignant neoplasms of the whole large intestine, as well as no significant dependence of the excess risk of malignant neoplasms of the colon and rectum. The influence of modifying factors on the magnitude of radiogenic risk was evaluated. Assessment of the excess relative risk of colorectal cancer in this cohort is carried out for the first time.

Key words: Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort (SUPER), colorectal cancer, excess relative risk, exposed population.

Authors' personal contribution

Silkin S.S. – development of study design, risk analysis, data interpretation, article design, article writing.

Mikryukova L.D. – participation in risk analysis, discussion of results, preparation of sections of the article.

Acknowledgments

We express our gratitude to the staff of the biophysical laboratory of the Ural Research Center for Radiation Medicine (M.O. Degteva, E.A. Shishkina, E.I. Tolstykh) for calculating estimates of individual doses, as well as to the staff of the Human Database department under the leadership of N.V. Startsev for data from the registers of the medical and dosimetric database of the URCRM, as well as to the employees of the epidemiological laboratory and personally S.B. Epifanova for preparing the data for analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of financing

The work was carried out with financial support from the Federal Medical and Biological Agency of Russia as part of

the implementation of a state order on the topic «Risks of the development of site-specific cancers during chronic exposure in the Ural cohort of emergency exposed population».

References

1. Arnold M, Sierra MS, Laversanne M, Soerjomataram I, Jemal A, Bray F. Global patterns and trends in colorectal cancer incidence and mortality. *Gut*. 2017;66(4): 683-691. doi: 10.1136/gutjnl-2015-310912.
2. Kaprin AD, Starinsky VV, Shachzadova AO. (eds). Malignant neoplasms in Russia in 2022 (morbidity and mortality). Moscow; 2022. 252 p. (In Russian).
3. Khanevich MD, Khazov AV, Khrykov GN, Medzhidov OA. Risk factors and prevention of colorectal cancer. *Profilakticheskaya Meditsina = Preventive medicine*. 2019;22(3): 107111. (In Russian).
4. Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, Siegel RL, Torre LA, Jemal A. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer Journal for Clinicians* 2018;68(6): 394-424. doi: 10.3322/caac.21492.
5. Semmens EO, Kopecky KJ, Grant E, Mathes RW, Nishi N, Sugiyama H, et al. Relationship between anthropometric factors, radiation exposure, and colon cancer incidence in the Life Span Study cohort of atomic bomb survivors. *Cancer Causes Control*. 2013;24(1): 27-37. doi: 10.1007/s10552-012-0086-8.

Stanislav S. Silkin

Ural Research Center for Radiation Medicine

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

6. Baxter NN, Tepper JE, Durham SB, Rothenberger DA, Virnig BA. Increased risk of rectal cancer after prostate radiation: a population-based study. *Gastroenterology*. 2005;128(4): 819-24. doi: 10.1053/j.gastro.2004.12.038.
7. Parkin DM, Darby SC. 12. Cancers in 2010 attributable to ionising radiation exposure in the UK. *British Journal of Cancer*. 2011;105(2): S57-65. DOI: 10.1038/bjc.2011.485.
8. Richardson DB, Cardis E, Daniels RD, Gillies M, O'Hagan JA, Hamra, et al. Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: Retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS). *British Medical Journal*. 2015;351: h5359. <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>.
9. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev VN, Akleev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393-402. (In Russian).
10. Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387. doi: 10.1097/HP.0000000000001067.
11. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoschapov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: Strontium-90. *Health Physics*. 2011;101(1): 28-47.
12. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Vorobiova MI, Anspaugh LR, et al. Reconstruction of longlived radionuclide intakes for Techa riverside residents: ¹³⁷Cs. *Health Physics*. 2013;104(5): 481-98.
13. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87-127.
14. Biryukov AP, Ivanov VK, Maksyutov MA, Ivanova IN. Ionizing radiation as a risk factor in development of malignant neoplasms of the digestive system (scientific review). *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2001;12: 99-108 (In Russian).
15. Pierce DA, Shimizu Y, Preston DL, et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12, part 1. Cancer: 1950-1990/RERF report N 11-95. *Journal of Radiation Research*. 1996;146: 9-17.
16. Sugiyama H, Misumi M, Brenner A, Grant EJ, Sakata R, Sadakane A, et al. Radiation risk of incident colorectal cancer by anatomical site among atomic bomb survivors: 1958-2009. *International Journal of Cancer*. 2020;146(3): 635-645. doi: 10.1002/ijc.32275.
17. Sont WN, Zielinski JM, Ashmore JP, Jiang H, Krewski D, Fair ME, et al. First analysis of cancer incidence and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada. *American Journal of Epidemiology*. 2001;153(4): 309-18. doi: 10.1093/aje/153.4.309.
18. Davis FG, Yu KL, Preston D, Epifanova S, Degteva M, Akleyev AV. Solid Cancer Incidence in the Techa River Incidence Cohort: 1956-2007. *Radiation Research*. 2015;184(1): 56-65. doi: 10.1667/RR14023.1.
19. United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources; Volume II: Effects. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. United Nations sales publications E.00.IX.3 and E.00.IX.4. United Nations, New York; 2000.
20. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). UNSCEAR 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. 13-322. United Nations, New York; 2008.

Received: November 03, 2023

For correspondence: Stanislav S. Silkin – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher of the epidemiological laboratory, Ural Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia (Vorovsky str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: ssilkin@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0002-4412-4481

Lyudmila D. Mikryukova – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher of the epidemiological laboratory, Ural Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical-Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

For citation: Silkin S.S., Mikryukova L.D. Radiogenic risk of colorectal cancer in the Southern Urals Population Exposed to Radiation Cohort. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 29-37. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-29-37

Возможность использования дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией более 10 МэВ

А.Н. Барковский¹, С.А. Огородников²

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

² Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Скантроник», Санкт-Петербург, Россия

В Российской Федерации наблюдается постоянный рост количества используемых радиационных медицинских установок с ускорителями электронов. За последние 4 года их количество возросло в 2,5 раза. Данные установки содержат импульсные ускорители электронов, генерирующие импульсное тормозное излучение с максимальной энергией от 6 до 21 МэВ. В государственном реестре средств измерений Российской Федерации в настоящее время отсутствуют приборы, предназначенные для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией более 10 МэВ. Наиболее широко используется для проведения радиационного контроля импульсных ускорителей электронов дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123, предназначенный для дозиметрии импульсного тормозного излучения с энергией до 10 МэВ. Цель настоящей работы — оценить возможность использования данного прибора для дозиметрии импульсного тормозного излучения с максимальной энергией до 20 МэВ. Авторами были проведены расчеты энергетических спектров тормозного излучения для точечного источника с максимальной энергией 20 МэВ за плоскими бетонными экранами толщиной 1 м, 2 м и 3 м методом Монте-Карло с использованием расчетной программы GEANT4. Проведена экстраполяция энергетической зависимости эффективности регистрации дозиметра ДКС-АТ1123 в область энергий 10–50 МэВ в керма-приближении, т.е. без учета переноса энергии вторичными электронами. Предполагалось, что она соответствует энергетической зависимости полного массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде. С использованием конверсионных коэффициентов перевода флюенса моноэнергетических фотонов в мощность эффективной дозы для передне-задней геометрии облучения были получены реальные значения мощности дозы, а с использованием энергетической зависимости показаний дозиметра — прогнозируемые результаты измерения дозиметром ДКС-АТ1123 единичной мощности дозы за бетонной защитой толщиной 1, 2 и 3 м. Показано, что максимальное ожидаемое занижение результатов измерений не превысит 40% и практически не зависит от толщины бетонной защиты в диапазоне толщин от 1 до 3 м. Для учета данного занижения необходимо использовать значение дополнительной погрешности измерений за счет энергетической зависимости чувствительности данного прибора для энергии фотонного излучения более 10 МэВ, равное 70%. Это позволяет использовать результаты измерений, полученные с использованием данного дозиметра, для адекватной характеристики состояния радиационной обстановки при эксплуатации импульсных ускорителей электронов с максимальной энергией до 20 МэВ. Для компенсации данного занижения возможно использование поправочного коэффициента к результатам измерений, равного для рассмотренных условий $1,63 \pm 0,04$. Предложенный подход может быть использован для создания методики радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией до 20 МэВ с использованием данного дозиметра, при наличии поправочных коэффициентов для встречающихся на практике конфигураций радиационной защиты и энергий излучения.

Ключевые слова: радиационные медицинские установки с ускорителями электронов, импульсное тормозное излучение, дозиметрия импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ.

Введение

В Российской Федерации наблюдается постоянный рост количества используемых радиационных медицинских установок с ускорителями электронов (РМУ УЭЛ).

За последние 4 года их количество возросло в 2,5 раза [1, 2]. Важную роль в обеспечении радиационной безопасности при эксплуатации РМУ УЭЛ играет проведение радиационного контроля при их эксплуатации в соот-

Барковский Анатолий Николаевич

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: anbarkovski@yandex.ru

ветствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2573-10¹ и МУК 2.6.1.3805-22².

РМУ УЭЛ содержат импульсные ускорители электронов, генерирующие импульсное тормозное излучение с длительностью импульса несколько микросекунд и частотой следования импульсов около 400 Гц. Поэтому для проведения радиационного контроля при использовании РМУ УЭЛ должны использоваться дозиметры, предназначенные для радиационного контроля импульсного тормозного излучения. Максимальная энергия ускоренных электронов, а следовательно, и максимальная энергия тормозного излучения для различных типов РМУ УЭЛ составляет от 6 МэВ до 21 МэВ.

В государственном реестре средств измерений Российской Федерации в настоящее время имеется три прибора, предназначенные для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией до 10 МэВ [3]. Их характеристики приведены в таблице 1 [4–6].

Как видно, дозиметр RAM ION имеет минимально измеримую величину мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) фотонного излучения 1 мкЗв/ч, что ограничивает возможность его применения для проведения производственного радиационного контроля РМУ УЭЛ, поскольку значительная часть (до 90%) результатов измерений при проведении данного вида радиационного контроля не превышают данную величину. Кроме того, он предназначен для дозиметрии фотонного излучения с максимальной энергией 10 МэВ. Производство дозиметра ДКС-96 прекращено. В государственном реестре средств измерений Российской Федерации имеется дозиметр ДКГ-РМ1621 со счетчиком Гейгера – Мюллера, предназначенный для дозиметрии фотонного излучения с энергией до 20 МэВ, но он не предназначен для дозиметрии импульсного излучения. В работе [7] обо-

сновывается возможность применения его для дозиметрии импульсного тормозного излучения медицинских ускорителей электронов с максимальной энергией до 20 МэВ, но данный вопрос требует дополнительного обоснования, и этот дозиметр пока не используется на практике для проведения радиационного контроля таких ускорителей.

В настоящее время для радиационного контроля РМУ УЭЛ в подавляющем большинстве случаев используется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 производства НПУП «АТОМТЕХ» (Республика Беларусь) [8]. Максимальная энергия тормозного излучения, для дозиметрии которого он предназначен, составляет 10 МэВ. При этом достаточно большое количество эксплуатируемых в настоящее время РМУ УЭЛ имеют максимальную энергию тормозного излучения более 10 МэВ. Но в государственном реестре средств измерений Российской Федерации вообще отсутствуют дозиметрические приборы для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией более 10 МэВ.

На рисунке 1 приведена энергетическая зависимость чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123 относительно гамма-излучения ¹³⁷Cs с энергией 0,662 МэВ [8]. Как видно из представленного рисунка, в области энергий от 3 до 10 МэВ занижение показаний дозиметра составляет до 40%. Для больших энергий данные по энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123 в его технической документации не приводятся.

Цель исследования – анализ возможности использования данного дозиметра для проведения радиационного контроля при использовании РМУ УЭЛ с максимальной энергией тормозного излучения до 20 МэВ и оценка ожидаемой погрешности получаемых результатов.

Характеристики дозиметров импульсного фотонного излучения

Таблица 1

Characteristics of pulsed photon radiation dosimeters]

[Table 1

Модель [Model]	Тип детектора [Type of detector]	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Диапазон МАЭД, мкЗв/ч [ADER range, μSv/h]	Минимальная длительность импульса, нс [Minimum pulse duration, ns]	Основная погрешность, % [The basic error, %]
ДКС-АТ1123	Пластиковый сцинтиллятор [Plastic scintillator]	0,015–10	0,1–10 ⁷	10	30
RAM ION	Ионизационная камера [Ionizing chamber]	0,02–10	1,0–5×10 ⁵	10	30
ДКС-96 с блоком БДКС-966	Пластиковый сцинтиллятор [Plastic scintillator]	0,015 – 10	0,05 – 5×10 ⁶	10	30

¹ СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ». Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 18.01.2010 № 3. Зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 17.03.2010, регистрационный № 16641 [SanPiN 2.6.1.2573-10 «Hygienic requirements for the placement and operation of electron accelerators with energy up to 100 MeV». Approved by Resolution No. 3 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 01/18/2010. Registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on 03/17/2010, registration No. 16641. (In Russ.)]

² МУК 2.6.1.3805-22 «Проведение радиационного контроля при использовании медицинских ускорителей электронов». Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 2 декабря 2022 г. [MUC 2.6.1.3805-22 «Conducting radiation monitoring when using medical electron accelerators». Approved by the Head of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation A. Y. Popova on December 2, 2022. (In Russ.)]

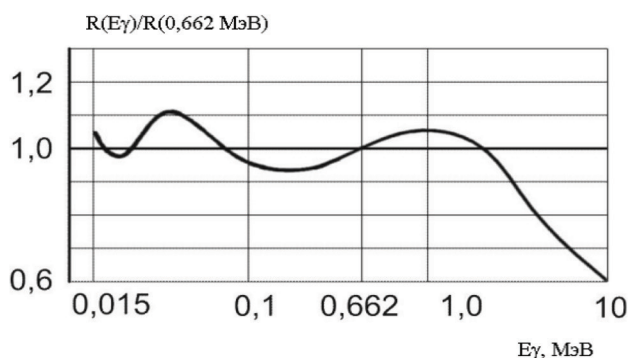


Рис. 1. Энергетическая зависимость чувствительности дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 относительно гамма-излучения ^{137}Cs с энергией 0,662 кэВ
[Fig. 1.] The energy dependence of the sensitivity of the dosimeter DKS-AT1123 to X-ray and gamma radiation relative to gamma radiation from ^{137}Cs with the energy of 0.662 keV]

Материалы и методы

Проведенный анализ имеющихся в литературе энергетических спектров тормозного излучения, генерируемого пучком электронов с энергией 20 МэВ, показал, что исследовались либо спектры тормозного излучения источника [9–13], либо спектры тормозного излучения в водных фантомах. Спектры тормозного излучения с максимальной энергией более 10 МэВ за радиационной защитой из бетона, который чаще всего используется в конструкциях стационарной радиационной защиты процедурных РМУ УЭЛ, в научной литературе найти не удалось.

Поэтому авторами были проведены расчеты энергетического спектра тормозного излучения, генерируемого пучком ускоренных электронов с энергией 20 МэВ в вольфрамовой мишени до и после прохождения бетонной защиты различной толщины. Использовалась модель точечного источника и плоской защиты. Расчеты были проведены специалистами ООО «Скантроник Системс» с использованием специального программного обеспечения GEANT4 [14], позволяющего проводить статистический расчет дозовых полей тормозного излучения методом Монте-Карло. В программе GEANT4 моделируются процессы взаимодействия гамма-квантов в различных веществах. В GEANT4 рассматривалось распространение квантов тормозного излучения, генерируемых в тормозной мишени линейного ускорителя электронов, с последующим прохождением их через бетонную защиту плотностью 2,3 г/см³.

На рисунке 2 представлены нормированные на единичный источник рассчитанные энергетические спектры тормозного излучения непосредственно за источником и за бетонными барьерами толщиной 1 м, 2 м и 3 м.

Как видно из представленных результатов, в спектре тормозного излучения после прохождения через бетонные барьеры значительно увеличивается доля квантов высоких энергий, которые ослабляются защитой слабее, чем кванты более низкой энергии.

Для количественной оценки показаний дозиметра ДКС-АТ1123 в области энергий до 20 МэВ авторами была проведена экстраполяция представленной на рисунке 1 энергетической зависимости дозиметра ДКС-АТ1123 в область больших энергий фотонов вплоть до 50 МэВ. Расчет был выполнен в керма-приближении, т.е. без учета переноса энергии вторичными электронами. Поскольку показания

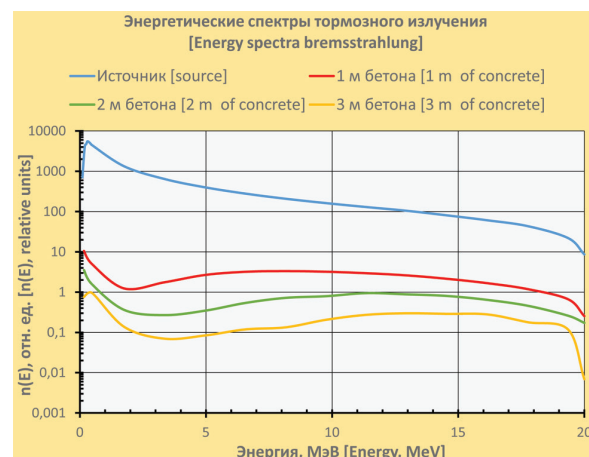


Рис. 2. Нормированные на единичный источник энергетические спектры тормозного излучения непосредственно за источником и за бетонными барьерами толщиной 1 м, 2 м и 3 м
[Fig. 2.] Energy spectra of *bremsstrahlung* normalized for a single source directly behind the source and behind concrete barriers with a thickness of 1 m, 2 m, and 3 m]

дозиметра определяются энергией, выделяемой в датчике прибора при нахождении его в поле контролируемого излучения, энергетическая зависимость его чувствительности должна определяться энергетической зависимостью сечения поглощения энергии фотонного излучения в материале датчика прибора. Поскольку датчик дозиметра ДКС-АТ1123 изготовлен из тканеэквивалентной пластмассы, хорошим приближением к которой является вода, экстраполяция энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123 была проведена в предположении, что энергетическая зависимость эффективности регистрации данного дозиметра в области энергий 10–50 МэВ соответствует энергетической зависимости полного массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде. На рисунке 3 красным цветом отмечена энергетическая зависимость эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123. Зеленым цветом отмечена экстраполированная часть этой зависимости в область энергий более 10 МэВ. Синие кружки соответствуют энергетической зависимости массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде, нормированного на 1 в точке $E = 2,0$ МэВ. Значения массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде были заимствованы из [15].

Как видно из рисунка 3, энергетическая зависимость эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 достаточно хорошо совпадает с энергетической зависимостью массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде в области энергий от 2 до 10 МэВ, что позволяет говорить о корректности данной экстраполяции в область энергий более 10 МэВ. На основе этих данных были получены средние значения эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 для используемых при проведении дальнейших оценок диапазонов энергий фотонов в области от 0 до 20 МэВ.

Для перевода рассчитанных значений флюенса тормозного излучения различной энергии в мощность дозы использовались значения конверсионных коэффици-

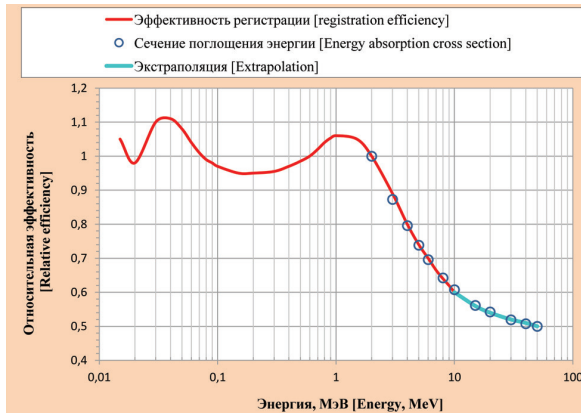


Рис. 3. Энергетическая зависимость эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123, полного массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде и экстраполированной части эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123
[Fig. 3. Energy dependence of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation by the DKS-AT1123 dosimeter, the total mass attenuation coefficient for the absorbed energy of gamma quanta in water, and the extrapolated part of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation by the DKS-AT1123 dosimeter]

ентов перевода флюенса моноэнергетических фотонов в мощность эффективной дозы для передне-задней геометрии облучения, заимствованные из [16]. На рисунке 4 приведены эти данные для области энергий до 50 МэВ.

На их основе были получены средние значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы для используемых диапазонов энергий фотонов в области от 0 до 20 МэВ.

Полученные средние значения эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 и средние значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы для используемых при проведении дальнейших оценок диапазонов энергий фотонов приведены в таблице 2.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 представлены относительные вклады фотонов различных энергий во флюенс ($B\Phi_i$), в мощность дозы тормозного излучения ($ВМД_i$), генерируемого в вольфрамо-

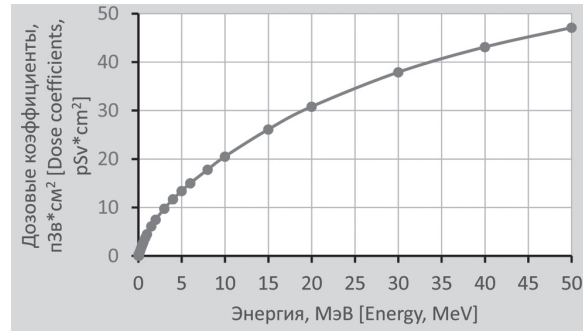


Рис. 4. Энергетическая зависимость конверсионных коэффициентов перевода флюенса моноэнергетических фотонов в мощность эффективной дозы для передне-задней геометрии облучения
[Fig. 4. The energy dependence of the coefficients of the conversion of the fluence of monoenergetic photons into the effective dose rate at the anterior-posterior irradiation geometry]

вой мишени толщиной 1 мм при падении на нее пучка ускоренных электронов с энергией 20 МэВ, после прохождения через плоские бетонные барьеры толщиной 1 м, 2 м и 3 м и в показания дозиметра ДКС-АТ1123 ($ВПД_i$) с учетом экстраполированной энергетической зависимости его эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения.

$$B\Phi_i = \frac{\int_{E_{i-1}}^{E_i} \Phi(E) dE}{\int_0^{E_N} \Phi(E) dE} \quad (1)$$

$$ВМД_i = \frac{B\Phi_i \cdot K_i^0}{\sum_{i=1}^N B\Phi_i \cdot K_i^0} \quad (2)$$

$$ВПД_i = ВМД_i \cdot ЭПД_i \quad (3)$$

где: $\Phi(E)$ – рассчитанный дифференциальный энергетический спектр плотности потока тормозного излучения, $1/(\text{см}^2 \times \text{с} \times \text{МэВ})$;

$B\Phi_i$ – относительный вклад во флюенс тормозного излучения i -го диапазона энергий фотонов;

$ВМД_i$ – относительный вклад в мощность дозы тормозного излучения i -го диапазона энергий фотонов;

Таблица 2

Средние значения эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 и средние значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы

[Table 2

Average values of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation with the DKS-AT1123 dosimeter and the average values of the coefficients of conversion of photon fluence into effective dose rate]

Номер [Number] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Дозовый коэффициент для передне-заднего облучения $10^{-12} \text{ Зв} \times \text{см}^2$ [Dose coefficient for anterior-posterior irradiation $10^{-12} \text{ Sv} \times \text{cm}^2$]	Энергетическая зависимость показаний дозиметра [Energy dependence of the dosimeter readings]
1	0–0,5	1,2	0,95
2	0,5–1	3,5	1,03
3	1–1,5	5,3	1,06
4	1,5–2	6,8	1,03
5	2–4	9,6	0,9
6	4–6	13,4	0,75
7	6–8	16,4	0,67
8	8–10	19,1	0,62

Номер [Number] <i>i</i>	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Дозовый коэффициент для передне-заднего облучения 10^{-12} Зв×см ² [Dose coefficient for anterior-posterior irradiation 10^{-12} Sv×cm ²]	Энергетическая зависимость показаний дозиметра [Energy dependence of the dosimeter readings]
9	10–12	21,7	0,59
10	12–14	23,9	0,57
11	14–16	26,1	0,56
12	16–18	28,1	0,55
13	18–20	30,0	0,54

Таблица 3

Вклады во флюенс, в мощность дозы и в показания дозиметра ДКС-АТ1123 фотонов различных энергий за плоской бетонной защитой толщиной 1 м, 2 м и 3 м для тормозного излучения, генерируемого в вольфрамовой мишени толщиной 1 мм электронами с энергией 20 МэВ

[Table 3]

Contributions of photons of various energies to the fluence, dose rate and dosimeter readings of DKS-AT1123 behind a flat concrete shield with a thickness of 1 m, 2 m. and 3 m for bremsstrahlung generated in a 1 mm thick tungsten target by electrons with an energy of 20 MeV]

Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	1 м бетона [1 m concrete]			2 м бетона [2 m concrete]			3 м бетона [3 m concrete]		
	ВФ	ВМД	ВПД	ВФ	ВМД	ВПД	ВФ	ВМД	ВПД
0–0,5	0,090	0,0063	0,0060	0,098	0,0063	0,0060	0,202	0,0142	0,0135
0,5–1	0,028	0,0056	0,0058	0,032	0,0060	0,0062	0,039	0,0081	0,0083
1–1,5	0,015	0,0046	0,0049	0,018	0,0051	0,0054	0,015	0,0047	0,0050
1,5–2	0,026	0,0100	0,0103	0,014	0,0051	0,0053	0,022	0,0086	0,0089
2–4	0,065	0,036	0,0323	0,040	0,0206	0,0186	0,031	0,0173	0,0156
4–6	0,100	0,077	0,0581	0,055	0,0396	0,0297	0,039	0,0303	0,0227
6–8	0,132	0,126	0,0841	0,090	0,0793	0,0531	0,049	0,0474	0,0318
8–10	0,140	0,155	0,0958	0,125	0,128	0,0795	0,071	0,0800	0,0496
10–12	0,123	0,154	0,0909	0,140	0,163	0,0962	0,122	0,155	0,0913
12–14	0,106	0,146	0,0832	0,136	0,175	0,0995	0,137	0,192	0,1096
14–16	0,084	0,126	0,0708	0,120	0,168	0,0942	0,119	0,182	0,1020
16–18	0,061	0,099	0,0544	0,085	0,128	0,0705	0,092	0,152	0,0837
18–20	0,031	0,055	0,0294	0,047	0,076	0,0409	0,061	0,108	0,0584
0–10	0,596	0,420	0,626	0,472	0,290	0,606	0,468	0,211	0,600
10–20	0,404	0,580		0,528	0,710		0,532	0,789	

$ВПД_i$ – относительный вклад в показания дозиметра ДКС-АТ1123 *i*-го диапазона энергий фотонов для единичного значения мощности дозы тормозного излучения;

K_i^0 – среднее значение коэффициента перевода флюенса тормозного излучения в мощность дозы для *i*-го диапазона энергий фотонов, Зв×см²;

$ЭЗПД_i$ – среднее значение эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 для *i*-го диапазона энергий фотонов;

N – количество используемых диапазонов энергий фотонов;

E_i – границы используемых диапазонов энергий фотонов, МэВ.

i-й диапазон энергий соответствует энергии фотонов от E_{i-1} до E_i .

Сумма $ВПД_i$ для всего диапазона энергий тормозного излучения соответствует показаниям дозиметра при измерении единичной мощности дозы тормозного излучения для всех рассматриваемых ситуаций.

Спектр тормозного излучения заметно изменяется после прохождения через защиту, в нем увеличивается доля квантов высоких энергий, которые ослабляются защитой

слабее, чем кванты более низкой энергии. Этот процесс частично компенсируется добавкой в область низких энергий рассеянного излучения, но все же первый процесс превалирует, и происходит ужесточение спектра. Еще более значителен вклад высоких энергий в мощность дозы тормозного излучения за защитой. Сразу после источника максимальный вклад в мощность дозы имеет место для области энергий 0–2 МэВ, за бетонной защитой толщиной 1 м – для области энергий 8–10 МэВ, а за бетонной защитой толщиной 2 и 3 м – для области энергий 12–14 МэВ. Вклад в мощность дозы (во флюенс) фотонов тормозного излучения с энергией от 10 до 20 МэВ составляет 27% (9%) сразу за мишенью, 58% (40%) за бетонной защитой толщиной 1 м, 71% (53%) за бетонной защитой толщиной 2 м и 79% (53%) за бетонной защитой толщиной 3 м. Тем не менее, прогнозируемое занижение результатов измерения мощности дозы тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ дозиметром ДКС-АТ1123 для рассматриваемых толщин бетонной защиты не превышает 40% и практически не изменяется для диапазона толщин бетонной защиты от 1 м до 3 м. Поправочный коэффициент для измеренных значений в этом случае составляет $1,63 \pm 0,04$.

Таким образом, прогнозируемые результаты измерения дозиметром ДКС-АТ1123 единичной мощности дозы за бетонной защитой толщиной 1, 2 и 3 м для источника тормозного излучения, генерируемого пучком ускоренных электронов с энергией 20 МэВ, составляют 0,626, 0,606 и 0,600 соответственно. Т.е. максимальное ожидаемое занижение результата измерений составляет около 40%, причем оно практически не зависит от толщины бетонной защиты, по крайней мере, в диапазоне толщин от 1 до 3 м. Для учета данного занижения необходимо использовать значение дополнительной погрешности измерений за счет энергетической зависимости чувствительности данного прибора для энергии фотонного излучения более 10 МэВ, равное 70%. Это позволит использовать результаты измерений, полученные с использованием данного дозиметра, для адекватной характеристики состояния радиационной безопасности при эксплуатации РМУ УЭЛ с максимальной энергией до 20 МэВ.

Тем не менее, с формальной точки зрения, такой подход нельзя признать полностью легитимным, поскольку данный вид измерений не предусматривается в описании типа средства измерения данного дозиметра.

Проблема разработки и организации серийного производства дозиметров импульсного тормозного излучения с максимальной энергией не менее 20 МэВ по-прежнему чрезвычайно актуальна и требует своего решения. Это отмечено и в «Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»³. В качестве одного из основных направлений реализации государственной политики в области ядерной и радиационной безопасности в данном документе отмечается необходимость разработки средств измерения импульсных ионизирующих излучений высоких энергий⁴.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что при использовании дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля РМУ УЭЛ с максимальной энергией тормозного излучения до 20 МэВ дополнительная погрешность измерений за счет энергетической зависимости чувствительности дозиметра составляет 70%, причем в сторону занижения получаемых результатов. Это занижение слабо зависит от толщины радиационной защиты и может быть учтено поправочным коэффициентом, учитывающим максимальную энергию тормозного излучения источника и реальную толщину защиты. Для получения набора таких поправочных коэффициентов необходимо провести расчеты для максимальных энергий тормозного излучения 10, 15, 20, 25 МэВ и толщин бетонной защиты 30, 50, 80, 100, 200 и 300 см, в том числе после свинцового экрана толщиной 17 см. Этот набор исчерпывает практически все встречающиеся на практике конструкции радиационной защиты процедурных РМУ УЭЛ. Наличие таких данных обеспечит возможность разработки методики радиационного кон-

троля медицинских ускорителей электронов с энергией до 20 МэВ с использованием данного дозиметра с поправочными коэффициентами для всех основных конфигураций радиационной защиты и энергий излучения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. – концепция, написание рукописи.

Огородников С.А. – проведение расчетов спектров тормозного излучения за защитой и анализ полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2017 год. Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2018. 128 с.
2. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 125 с.
3. Мартынюк Ю.Н. Государственный реестр средств измерений. Часть 2. Дозиметры общего назначения, импульсные и специальные // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 3-13.
4. Описание типа средства измерений. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. Приложение к свидетельству № 75466 об утверждении типа средств измерений.
5. Описание типа средства измерений. Дозиметры RAM ION. Приложение к свидетельству № 64658 об утверждении типа средств измерений.
6. Описание типа средства измерений. Дозиметры-радиометры ДКС-96. Приложение к свидетельству № 43717 об утверждении типа средств измерений.
7. Титов Н.В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 76-80.
8. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1121А, ДКС-АТ1123, ДКС-АТ1123А. Руководство по эксплуатации. 69 с.
9. Мордасов Н.Г., Иващенко Д.М., Членов А.М., Астахов А.А. Моделирование методов экспрессного определения энергетического спектра тормозного излучения ускорителей электронов // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 9. С. 108-115.
10. Абибуллаев Н.А., Бегимкулов Х.Х., Салихбаев У.С. Энергетические спектры и угловое распределение тормозного излучения, испускаемого из толстой вольфрамовой мишени электронами с энергией 11,8 МэВ // Атомная энергия. 2002. Т. 92, вып. 3. С. 247-249.
11. Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н., Каракаш А.И. и др. Радиационная безопасность в лучевой терапии с использованием ускорителей электронов // АНРИ. 2014. № 1. С. 15-21 с.

³ Утверждены Указом Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585 [Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 585 dated October 13, 2018. (In Russ.)]

⁴ 18 абзац подпункта а) пункта 13 «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» [18 paragraph of subparagraph (a) of paragraph 13 of the «Fundamentals of state policy in the field of ensuring nuclear and radiation safety of the Russian Federation for the period up to 2025 and beyond». (In Russ.)]

12. Абибуллаев Н.А., Салихбаев У.С. Энергетические спектры и угловые распределения тормозного излучения, испускаемого электронами с энергией 20 МэВ из толстой вольфрамовой мишени // Известия РАН. 2000. Т. 64, № 1. С. 152-160.
13. Сахаров В.К. Спектры тормозного излучения и фотонейтронов из вольфрамовой мишени ускорителя электронов энергией 5 – 90 МэВ // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 4. С. 228-231.
14. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53, No. 1. P. 270-278.
15. Сторм Э., Израэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001 – 100 МэВ и элементов с 1 по 100) Справочник. Перевод с английского В.А. Климанова, Е.Д. Чистова. М.: Атомиздат, 1973. 256 с.
16. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures // Annals of the ICRP. 2010. Vol. 40, No 2-5. P. 1-257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001.

Поступила: 25.01.2024 г.

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

Огородников Сергей Анатольевич – генеральный директор Общества с ограниченной ответственностью «Лаборатория Скантроник», Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Огородников С.А. Возможность использования дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией более 10 МэВ // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 38–45. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-38-45

The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of more than 10 MeV

Anatoly N. Barkovsky¹, Sergey A. Ogorodnikov²

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 Limited liability company «Laboratory Scantronic», Saint-Petersburg, Russia

In the Russian Federation, there is a constant increase in the number of radiation medical installations with electron accelerators. Over the past 4 years, their number has increased 2.5 times. These installations contain pulsed electron accelerators that generate pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy from 6 to 21 MeV. Currently, there are no devices designed for dosimetry of the pulsed photon radiation with energy of more than 10 MeV in the state register of measuring instruments of the Russian Federation. The most widely used radiation monitoring device for pulsed electron accelerators is the DKS-AT1123 X-ray and gamma radiation dosimeter designed for dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation with an energy of up to 10 MeV. The purpose of this work is to evaluate the possibility of using this device for dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy of up to 20 MeV. The authors calculated the energy spectra of bremsstrahlung radiation for a point source with a maximum energy of 20 MeV behind flat concrete screens with a thickness of 1 m, 2 m and 3 m by the Monte Carlo method using the GEANT4 calculation program. The energy dependence of the registration efficiency of the DKS-AT1123 dosimeter was extrapolated to the energy range of 10–50 MeV in the kerma-approximation without taking into account the energy transfer by secondary electrons. It was assumed that it corresponds to the energy dependence of the total mass attenuation coefficient for the absorbed energy of gamma quanta in water. Using conversion coefficients for converting the fluence of monoenergetic photons into the effective dose rate at an anterior-posterior radiation incidence on the human body, real dose rates were calculated, and using the energy dependence of the dosimeter readings, the predicted results of measuring the unit dose rate with the DKS-AT1123 dosimeter behind a concrete protection with a thickness of 1, 2 and 3 m were obtained. It is shown that the maximum expected underestimation of the measurement results will not exceed 40% and practically does not depend on the thickness of the concrete shield in the thickness range from

Anatoly N. Barkovsky

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

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

1 to 3 m. To account for this underestimation, it is necessary to use the value of additional measurement error due to the energy dependence of the sensitivity of this device for the photon radiation energy of more than 10 MeV, equal to 70%. This makes it possible to use the measurement results obtained using this dosimeter to adequately characterize the state of radiation safety during operation of pulsed electron accelerators with a maximum energy of up to 20 MeV. It is possible to use a correction factor to the measurement results equal to 1.63 ± 0.04 to compensate for this underestimation. The proposed approach can be used to create a methodology for using this dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of up to 20 MeV, if there are correction factors for radiation protection configurations and radiation energies encountered in practice.

Key words: radiation medical installations with electron accelerators, pulsed bremsstrahlung radiation, dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy of 20 MeV.

Personal participation of the authors

Barkovsky A.N. – the concept, the writing of the manuscript.

Ogorodnikov S.A. – calculations of the spectra of braking radiation behind the protection and analysis of the results obtained.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

1. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2017 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2018. 128 p. (In Russian).
2. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2021 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2022. 125 p. (In Russian).
3. Martinuk U.N. The State Register of Measuring Instruments. Part 2. General-purpose, pulse and special dosimeters. *ANRI = ANRI*. 2020;4(103):3-13. (In Russian).
4. Description of the type of measuring instrument. X-ray and gamma radiation dosimeters DKS-AT1121, DKS-AT1123. Appendix to Certificate No. 75466 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
5. Description of the type of measuring instrument. RUMION dosimeters. Appendix to Certificate No. 64658 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
6. Description of the type of measuring instrument. Dosimeters-radiometers DKS-96. Appendix to Certificate No. 43717 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
7. Titov NV. The possibility of using dosimeters with a Geiger-Muller counter for dosimetry of pulsed radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation hygiene*. 2019;12(2): 76-80. (In Russian).
8. X-ray and gamma radiation dosimeters DKS-AT1121, DKS-AT1121A, DKS-AT1123, DKS-AT1123A. User Manual. 69 p. (In Russian).
9. Mordasov NG, Ivaschenko DM, Chlenov AM, Astakhov AA. Modeling of methods for express determination of the energy spectrum of the bremsstrahlung radiation of electron accelerators. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2004;74(9): 108-115. (In Russian).
10. Abibullaev NA, Begimkulov HH, Salihbaev US. Energy spectra and angular distribution of the bremsstrahlung radiation emitted from a thick tungsten target by electrons with an energy of 11.8 MeV. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2002;92(3): 247-249. (In Russian).
11. Nurlybaev K, Martinyuk UN, Karakash AI, Sinnikov LL, Lykova EN, Galjautdinova ZZ, et al. Radiation safety in radiation therapy using electron accelerators. *ANRI = ANRI*. 2014;1: 15-21. (In Russian).
12. Abibullaev NA, Salikhbaev US. Energy spectra and angular distributions of the bremsstrahlung radiation emitted by electrons with an energy of 20 MeV from a thick tungsten target. *Izvestiya RAN = Izvestiya RAS*. 2000;64(1): 152-160. (In Russian).
13. Sakharov VK. Spectra of bremsstrahlung radiation and photoneutrons from a tungsten target of an electron accelerator with an energy of 5 – 90 MeV. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2016;120(4): 228-231. (In Russian).
14. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Arajo H, Dubois PA, Asaiet M, et al. Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2006;53(1): 270-278.
15. Storm E, Israel H. Cross sections of the interaction of gamma radiation (for energies 0.001 – 100 MeV and elements from 1 to 100) Handbook. Translated from English by Candidates of Technical Sciences VA Klimanov, ED Chistova. Moscow: Atomizdat; 1973. 256 p. (In Russian).
16. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. *Annals of the ICRP*. 2010;40(2-5): 1-257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001.

Received: January 25, 2024

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Center of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: anbarkovski@yandex.ru)

Sergey A. Ogorodnikov – General Director of «Scantronic Laboratory» Limited liability company, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Ogorodnikov S.A. The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of more than 10 MeV. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 38–45. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-38-45

О необходимой толщине стационарной защиты в рентгеновских стоматологических кабинетах

В.Ю. Голиков

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

В статье на основе анализа научной информации в отношении параметров проведения и характеристик полей излучения для 3 дентальных рентгенологических процедур (внутриротовые снимки, обзорные снимки на ортопантомографах и конусно-лучевая компьютерная томография) кратко описана методология и приведены примеры расчетов необходимой толщины стационарной защиты кабинетов с разным рентгеновским оборудованием. Показано, что в большинстве случаев в кабинетах, где выполняются внутриротовые снимки и обзорные снимки на ортопантомографах, обычные внутрикомнатные перегородки из гипсокартона толщиной 20 мм обеспечивают необходимую защиту для соблюдения в соседнем помещении предела дозы для населения. Для кабинетов, где проводятся дентальные исследования с применением компьютерных томографов, необходима дополнительная защита из свинца толщиной до 1,5 мм в зависимости от условий проведения и категории защищаемых лиц в соседнем помещении.

Ключевые слова: медицинские исследования, рентгеновский стоматологический кабинет, стационарная защита, коэффициент рассеяния, прямое излучение, рассеянное излучение.

Введение

Проектирование стационарной защиты для стоматологических рентгеновских кабинетов можно было бы считать тривиальной задачей, по сравнению с разработкой защиты для рентгеновских кабинетов в других областях медицинской радиологии из-за относительно низких доз излучения. Однако эту задачу не следует обходить вниманием по ряду причин:

1. Стоматологические рентгеновские кабинеты часто расположены в жилых зданиях. При этом рентгеновский аппарат может быть расположен близко к стене, смежной с жилым помещением.

2. В стоматологической практике нередко в одной процедурной располагаются два рентгеновских аппарата для решения различных задач (например, аппараты для проведения внутриротовых снимков и панорамных снимков).

3. Для стоматологов дополнительные расходы на защиту могут превысить стоимость рентгеновского аппарата.

Кроме того, в стоматологической практике Российской Федерации в первом десятилетии XXI в. ежегодно выполнялось около 15 млн стоматологических рентгенограмм [1].

Методология расчета стационарной защиты любого рентгеновского кабинета, изложенная в СанПиН 2.6.1.1192-03¹, устарела и не отражает реальных условий и значений физико-технических параметров проведения медицинских исследований [2]. В отношении же стоматологического рентгеновского кабинета, смежного с жилым помещением, в СанПиН 2.6.1.1192-03 требуется выполнение правил радиационной безопасности внутри кабинета, т.е. наличие стен кабинета в качестве ослабляющего излучение барьера не учитывается вовсе. Часто это приводит к необходимости устанавливать вну-

¹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.02.2003 № 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03» (СанПиН 2.6.1.1192-03. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских аппаратов и проведению рентгенологических исследований). (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.03.2003 № 4282) [Decree of the Chief state sanitary doctor of Russia №8, 18.02.2003 "On the establishment of the SanPiN 2.6.1.1192-03" (SanPiN 2.6.1.1192-03. Hygienic requirements on the construction and use of the X-ray units and radiography examinations). Registered in the Ministry of Justice of Russia №4282, 14.03.2003(In Russ.)]

Голиков Владислав Юрьевич

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

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

три кабинета дополнительную защиту, что приводит к росту непроизводственных расходов.

Цель исследования – демонстрация того, какая в действительности стационарная защита будет обеспечивать требования радиационной безопасности в зависимости от типа рентгеновского оборудования стоматологического кабинета и количества принимаемых в нем пациентов.

Материалы и методы

В качестве исходных данных для расчета необходимой толщины стационарной защиты в стоматологическом рентгеновском кабинете использовали современные данные литературы, характеризующие как условия проведения различных стоматологических процедур (геометрия проведения процедур, число пациентов и т.п.), так и параметры, определяющие поле рентгеновского излучения (тип рентгеновского оборудования, напряжение на трубке, произведение дозы на площадь поля излучения для разных типов дентальных процедур и т.п.). Рассматривались кабинеты, содержащие три типа рентгеновского стоматологического оборудования: для проведения внутриротовых снимков, панорамных снимков (ортопаномографы) и получения изображения методом конусно-лучевой компьютерной томографии. Все параметры, зависящие от времени, были привязаны к временному интервалу 1 неделя. При этом округленно принималось, что в году 50 недель. Фактор занятости помещения (occupancy factor) во всех случаях полагался равным единице.

Толщина защиты рассчитывалась по формуле [3]:

$$x = \frac{1}{\alpha \cdot \gamma} \cdot \ln \left[\frac{B^{-\gamma} + \beta / \alpha}{1 + \beta / \alpha} \right], \text{ мм} \quad (1)$$

где: B – доля излучения, прошедшего через барьер (величина, обратная коэффициенту ослабления, используемому в СанПиН 2.6.1.1192-03); x – толщина барьера, мм; α мм⁻¹, β мм⁻¹, γ отн.ед. – параметры, зависящие от напряжения на рентгеновской трубке и фильтрации излучения, т.е. его энергетического спектра и материала защиты [4].

Для ряда рентгеновских аппаратов, согласно их конструктивным особенностям, расчет стационарной защиты кабинета, где проводятся исследования, определяется только рассеянным излучением (компьютерный томограф, ортопантомограф, С-дуга, маммограф). Значение кермы рассеянного компонента поля рентгеновского излучения в воздухе зависит от интенсивности компонента прямого излучения, его энергетического спектра, площади поля прямого излучения, падающего на объект, и может быть рассчитано согласно соотношению:

$$K_s = S \cdot ПДП, \text{ мкГр} \quad (2)$$

где S – коэффициент рассеяния мГр·(Гр·см²)⁻¹; ПДП – произведение дозы на площадь (Гр·см²).

Значение S зависит также от угла рассеяния и достигает максимальной величины S_m при угле рассеяния около 120°. На расстоянии 1 м от точки рассеяния значение S_m может быть рассчитано согласно эмпирическому соотношению [5]:

$$S_m = 0.031 \cdot \text{кВ} + 2.5 \text{ мкГр} \cdot (\text{Гр} \cdot \text{см}^2)^{-1} \quad (3)$$

где кВ – напряжение на трубке в кВ.

Тогда значение кермы рассеянного компонента поля рентгеновского излучения в воздухе на расстоянии d (м) от пациента рассчитывается согласно соотношению:

$$K_s = \frac{S_m \cdot ПДП}{d^2} \quad (4)$$

Результаты и обсуждение

Кабинет для проведения внутриротовых снимков

При проведении внутриротовых снимков для расчета защиты могут быть использованы следующие типичные исходные данные [4, 6–9]:

1. Входная поверхностная доза – 1–3 мГр (зависит от проекции, чувствительности пленки, напряжения на трубке и т.д.).

2. Площадь поля на конце тубуса: максимум 28 см², минимум 12 см² (6 см диаметр для кругового коллиматора или 4×3 см² для прямоугольного коллиматора, соответственно).

3. ПДП – 0,01–0,1 Гр см².

4. Напряжение на трубке – 60–70 кВ.

5. Коэффициент рассеяния S – 0,5–5 мкГр (Гр см²)⁻¹ на 1 м [10].

При максимальной поверхностной дозе 3 мГр и круговом коллиматоре максимальная доза рассеянного компонента будет: $3 \cdot 10^{-3} \times 28 \times 5 \sim 0.4$ мкГр на 1 снимок.

Пучок первичного излучения при внутриротовой рентгенографии всегда пересекает тело пациента и конструкцию приемника изображения. Для целей расчета защиты можно предположить, что при дентальной внутриротовой рентгенографии пропускание первичного излучения составляет 0,03% от поверхностной дозы [10], что для 3 мГр будет менее 1 мкГр за экспозицию.

Если предположить, что внутриротовые снимки делаются в условиях, когда луч направлен в одном из трех направлений (соответствующих направлениям на стены А, Б и В (рис.)), и что каждое из этих направлений равновероятно, то средневзвешенная доза первичного плюс рассеянного излучения на расстоянии 1 м составит менее 0,5 мкГр на 1 снимок. Рекомендуется использовать это значение для расчета защиты, если нет веских оснований предполагать, что доза может существенно отличаться.

Необходимое ослабление защитным барьером в зависимости от расстояния от головы пациента до барьера и еженедельного количества снимков на основе ограничения годовой эффективной дозы 1 мЗв можно рассчитать следующим образом. Исходные данные:

1. Расстояние до стены – 1 м.

2. Средневзвешенная доза первичного плюс рассеянного излучения на расстоянии 1 м – 0,5 мкГр на один снимок.

Количество снимков в неделю – 100.

Тогда необходимое ослабление защитным барьером должно быть не менее:

$$\frac{1000 \text{ (мкЗв/год)}/50 \text{ (нед/год)}}{0,5 \text{ (мкЗв/снимок)} \cdot 100 \text{ (снимков/нед)}} = 0,4.$$

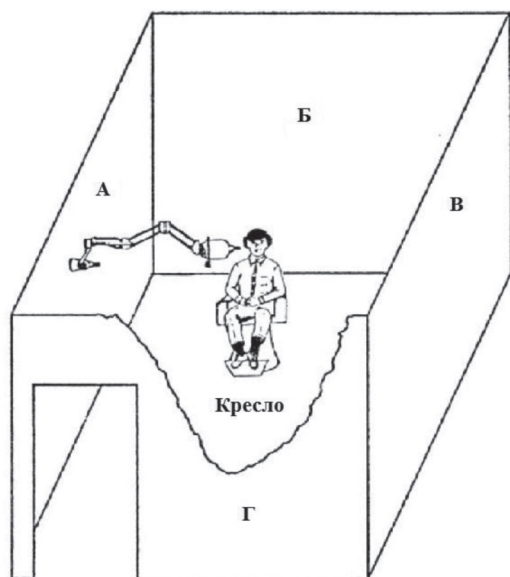


Рис. Схема проведения внутриротовых снимков [4]. Прямое излучение может пересекать боковые стены А, Б и В. Рассеянное излучение пересекает все стены, пол и потолок [Fig. Scheme of intraoral radiographs [4]. The primary radiation can cross the side walls A, B and C. The scatter radiation crosses all walls, floor and ceiling]

В таблице 1 показано необходимое дополнительное ослабление защитным барьером в зависимости от расстояния от головы пациента до барьера и еженедельных рабочих нагрузок на основе ограничения годовой эффективной дозы 1 мЗв.

Из данных таблицы 1 следует, что не требуется никакой защиты при загрузке 20 снимков в неделю и расстоянии между пациентом и барьером по крайней мере 1 м. При загрузке 50 снимков в неделю не требуется никакой защиты при расстоянии между пациентом и барьером более 1,5 м.

При напряжении на трубке 70 кВ (обычно верхний предел для внутриротовой рентгенографии) 20 мм стены из гипсокартона обеспечивают пропускание 25% излучения. В таблице 2 приведены рассчитанные по формуле (1) значения толщин барьеров из гипсокартона, обеспечиваю-

щих ослабление излучения для случаев, представленных в таблице 1.

Из приведенных в таблице 2 данных следует, что обычные внутрикомнатные перегородки (~20 мм гипсокартона) обеспечат необходимую защиту при практически любой мыслимой загрузке в неделю и расстоянии от пациента до барьера 1 м и более.

Стены кабинета из кирпича или бетонных блоков должны обеспечивать достаточную защиту при любых обстоятельствах.

Кабинет для проведения панорамных снимков

Для панорамных стоматологических рентгеновских аппаратов (ортопантомографов) расчеты защиты необходимо производить только для рассеянного компонента излучения, поскольку кассета и держатель кассеты обеспечивают достаточную защиту от прямого излучения, проходящего через голову пациента.

Для расчета компонента дозы рассеянного излучения использовали значения ПДП, которые в случае проведения дентальных исследований на ортопантомографах находятся в пределах 0,05–0,15 Гр см² [4, 9, 11–13]. При максимальном напряжении на трубке для этих исследований 90 кВ коэффициент рассеяния равен 5,3 мкГр (Гр см²)⁻¹ (формула (3)). Таким образом, значение рассеянного компонента воздушной кермы на расстоянии 1 м для наибольшего ПДП = 0,15 Гр см² составит 0,8 мкГр за исследование. Эта оценка компонента кермы рассеянного излучения подтверждается результатами измерений с помощью термолюминесцентных детекторов ~0,5 мкГр за исследование при напряжении на трубке в среднем за период времени измерений около 75 кВ [11].

Максимальное количество панорамных исследований в неделю, не требующее дополнительной защиты, можно, например, рассчитать следующим образом. Исходные данные:

1. Расстояние до стены – 50 см.
2. Значение рассеянного компонента кермы – $0,8 / (0,5)^2 = 3,2$ мкГр.

Тогда максимальное количество исследований в неделю без какой-либо дополнительной защиты при ограничении годовой дозы 1 мЗв будет:

Таблица 1

Необходимое дополнительное ослабление защитным барьером в зависимости от расстояния от головы пациента до барьера и еженедельного количества снимков на основе ограничения годовой эффективной дозы 1 мЗв

[Table 1

Necessary additional barrier attenuation depending on the distance from the patient's head to the barrier and the number of weekly radiographs based on the annual effective dose limit of 1 mSv]

Количество снимков в неделю [Number of weekly radiographs]	Расстояние до барьера, м [Distance to barrier, m]			
	1	1,5	2	2,5
20	Не требуется [not required]	Не требуется [not required]	Не требуется [not required]	Не требуется [not required]
50	0,80	Не требуется [not required]	Не требуется [not required]	Не требуется [not required]
100	0,40	0,89	Не требуется [not required]	Не требуется [not required]
200	0,20	0,46	0,80	Не требуется [not required]

Таблица 2

Толщина защитного барьера из гипсокартона (мм) в зависимости от значений ослабления излучения для случаев, представленных в таблице 1

[Table 2]

Thickness of the plasterboard shielding barrier (mm) depending on the radiation attenuation values for the cases provided in Table 1]

Количество снимков в неделю [Number of weekly radiographs]	Расстояние до барьера, м [Distance to barrier, m]			
	1	1,5	2	2,5
20	0	0	0	0
50	2,2	0	0	0
100	10	1,1	0	0
200	21	8,5	2,2	0

$$\frac{1000 \text{ мкЗв/год}}{50 \text{ нед/год}} \cdot \frac{1}{3.2 \text{ мкГр}} \approx 6 \text{ снимков/нед}$$

В таблице 3 приведены рассчитанные значения толщин барьеров из гипсокартона, обеспечивающих ослабление излучения в зависимости от расстояния до барьера и указанных недельных рабочих нагрузок на основе ограничения годовой дозы 1 мЗв.

Из данных таблицы 3 следует, что не требуется никакой дополнительной защиты, кроме обычных внутрикомнатных перегородок из гипсокартона толщиной 20 мм при загрузке до 20 снимков в неделю и расстоянии между пациентом и барьером 0,5 м или больше. Аналогичный вывод также справедлив для загрузки до ~ 60 снимков в неделю и расстоянии более 1 м между пациентом и барьером. При расстоянии между пациентом и барьером более 1,5 м загрузка кабинета может составлять более 100 снимков в неделю с обычными внутрикомнатными перегородками.

Кабинет с дентальным компьютерным томографом

Стоматологическая конусно-лучевая компьютерная томография является сравнительно новым методом, предназначенным для получения изображений перед специализированными стоматологическими процедурами, например, такими, как установка имплантатов. Эти устройства работают при более высоких напряжениях на рентгеновской трубке и обуславливают значительно более высокие уровни излучения, чем другое стоматологическое рентгеновское оборудование.

Аналогично обычной компьютерной томографии можно считать, что узел детектора изображений стоматологического конического луча полностью перехватывает и ослабляет прямое излучение. Следовательно, уровень воздушной кермы вокруг установки должен быть полностью обусловлен рассеянным излучением. Уровни рассеянного излучения варьируются от 2,3 до 40 мкГр за сканирование на расстоянии 1 м, а напряжение на трубке варьируется от 80 до 120 кВ [14]. Если для устанавливаемого устройства имеются данные о рассеянном излучении, их следует использовать для оценки толщины защиты. Если такие данные отсутствуют, можно рассмотреть наихудший случай и спроектировать защиту на этой основе.

Типичная средняя рабочая нагрузка для установки конусно-лучевой компьютерной томографии, установленной в частной практике, составляет примерно 20 сканирований в неделю и может достигать до 50 сканирований в неделю в больших медицинских учреждениях [14]. Их можно рассматривать как типичные верхние уровни, хотя, учитывая, что клиническая практика использования конусно-лучевой КТ все еще развивается, рабочие нагрузки следует постоянно контролировать и учитывать возможность их увеличения.

Примеры расчетов необходимой толщины защиты из свинца для поддержания дозы в смежных помещениях на уровне 1 и 20 мЗв/год для устройств с различными напряжениями на трубке, уровнями рассеянного излучения и рабочими нагрузками приведены в таблицах 4 и 5.

Из данных, представленных в таблице 4, следует, что если помещение, соседнее с кабинетом, где располо-

Таблица 3

Значения толщин барьеров из гипсокартона (мм), обеспечивающих ослабление излучения для напряжения 90 кВ на основе ограничения годовой дозы 1 мЗв

[Table 3]

Thickness of the plasterboard barriers (mm) provide radiation attenuation for the tube voltage of 90 kV based on the annual dose limit of 1 mSv]

Количество снимков в неделю [Number of weekly radiographs]	Расстояние до барьера, м [Distance to barrier, m]			
	0,5	1	1,5	2
10	8	0	0	0
20	25	0	0	0
50	57	13	0	0
100	87	32	10	0
200	122	57	28	13

Таблица 4

Требования к защите стоматологического кабинета с оборудованием для конусно-лучевой компьютерной томографии в зависимости от уровня рассеянного излучения, напряжения на трубке и рабочей нагрузки на основе ограничения годовой дозы 1 мЗв

[Table 4]

Shielding requirements for a dental X-ray room with cone beam computed tomography depending on the level of scattered radiation, tube voltage and workload based on the annual dose limit of 1 mSv

Уровень рассеянного излучения на 1 м, мкГр [Scattered radiation level at 1m, µGy]	кВ [kV]	Число процедур в неделю [Number of weekly radiographs]	Толщина защиты из свинца, мм [Thickness of lead shield, mm]		
			Расстояние от пациента, м [Distance to barrier, m]		
			0,5	1	2
40	90	20	0,87	0,50	0,22
20	90	50	0,94	0,56	0,26
20	120	20	0,93	0,51	0,21
40	120	20	1,18	0,71	0,34
40	120	50	1,53	1,01	0,57

Таблица 5

Требования к защите стоматологического кабинета с оборудованием для конусно-лучевой компьютерной томографии в зависимости от уровня рассеянного излучения, напряжения на трубке и рабочей нагрузки на основе ограничения годовой дозы 20 мЗв

[Table 5]

Shielding requirements for a dental X-ray room with cone beam computed tomography depending on the level of scattered radiation, tube voltage and workload based on an annual dose limit of 20 mSv

Уровень рассеянного излучения на 1 м, мкГр [Scattered radiation level at 1m, µGy]	кВ [kV]	Число процедур в неделю [Number of weekly radiographs]	Толщина защиты из свинца, мм [Thickness of lead shield, mm]		
			Расстояние от пациента, м [Distance to barrier, m]		
			0,5	1	2
40	90	20	0,19	0,04	0
20	90	50	0,22	0,06	0
20	120	20	0,17	0	0
40	120	20	0,30	0,07	0
40	120	50	0,51	0,21	0

жен компьютерный томограф, предназначено для лиц из населения, то для соблюдения правил радиационной безопасности может потребоваться свинцовая защита толщиной до 1,5 мм. Если же соседнее помещение предназначено для персонала группы А, то в самом худшем случае необходимая толщина защиты из свинца составит около 0,5 мм при расстоянии между стеной и пациентом 0,5 м, а при расстоянии 2 м и более дополнительной защиты из свинца не требуется вовсе (см. табл. 5).

Заключение

На основе анализа научной информации в отношении параметров проведения и характеристик полей излучения для 3 дентальных рентгенологических процедур (внутриротовые снимки, обзорные снимки на ортопантомографах и компьютерная томография) была рассчитана необходимая толщина стационарной защиты кабинетов с разным рентгеновским оборудованием. Показано, что в большинстве случаев в кабинетах, где проводятся внутриротовые снимки и обзорные снимки на ортопантомографах, обычные внутрикомнатные перегородки из гипсокартона толщиной 20 мм обеспечивают необходимую защиту для

соблюдения в соседнем помещении предела дозы для населения. Для кабинетов, где проводятся дентальные исследования с применением компьютерных томографов, необходима дополнительная защита из свинца толщиной до 1,5 мм в зависимости от условий проведения и категории защищаемых лиц в соседнем помещении.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об источнике финансирования

Работа была выполнена в рамках инициативной НИР «Научное обоснование изменений в расчетах стационарной защиты в рентгеновских кабинетах»

Литература

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II. (New York, UN: Scientific Annexes C, D and E), 2011.
2. Голиков В.Ю. Критический анализ существующего подхода к расчету стационарной защиты в рентгеновских

- кабинетах // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 13–21. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-13-21.
3. Archer B.R., Thornby J.I., Bushong S.C. Diagnostic X-Ray Shielding Design Based on an Empirical Model of Photon Attenuation // Health Physics. 1983. Vol. 44. P. 507–517.
4. NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). Radiation Protection in Dentistry. NCRP Report No. 145. NCRP, 2004.
5. Colin J. Martin. Radiation shielding for diagnostic radiology // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 165(1–4). P. 376–381. doi:10.1093/rpd/ncv040.
6. European Commission. European guidelines on Radiation Protection in dental radiology. The safe use of radiographs in dental practice. Radiation Protection 136. European Communities, 2004.
7. Use and regulatory control of dental x-ray installations ST3.1. Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland, 1999.
8. National Radiological Protection Board. Guidance notes for dental practitioners on the safe use of x-ray equipment. NRPB dental x-ray protection services, 2001.
9. Helmrot E., Carlsson G. Alm. Measurement of radiation dose in dental radiology // Radiation Protection Dosimetry. 2005. Vol. 114, No. 1–3. P. 168–171.
10. Worrall M., McVey S., Suon D.G. Proposals for revised factors in intra-oral radiography shielding calculations // Journal of Radiological Protection. 2012. Vol. 32, No 3. P. 243–249. doi: 10.1088/0952-4746/32/3/243.
11. Reid J.A., MacDonald J.C., Dekker T.A., Kupperts B.U. Radiation exposures around a panoramic dental X-ray unit // Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology. 1993. Vol. 75. P. 780–782.
12. Williams J.R., Fipem MSc, Montgomery A. Measurement of dose in panoramic dental radiology // British Journal of Radiology. 2000. Vol. 73, P. 1002–1006.
13. Isoardi P., Ropolo R. Measurement of dose–width product in panoramic dental radiology // British Journal of Radiology. 2003. Vol. 76, P. 129–131.
14. Holroyd J.R., Walker A. Recommendations on the design of X-ray facilities and the quality assurance of dental cone beam CT systems. HPARPD-065. Chilton: HPA, 2010.

Поступила: 12.02.2024 г.

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

Для цитирования: Голиков В.Ю. О необходимой толщине стационарной защиты в рентгеновских стоматологических кабинетах // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 46–52. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-46-52

About the necessary thickness of stationary shield in X-ray dental rooms

Vladislav Yu. Golikov

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

In the paper, based on the analysis of scientific information regarding the parameters and characteristics of radiation fields for three dental X-ray procedures (intraoral radiographs, panoramic radiographs on orthopantomographs and computed tomography), the required thickness of stationary shields for rooms with different X-ray equipment is calculated. It has been shown that in most cases, in rooms where intraoral and panoramic radiographs are taken, conventional 20 mm thick plasterboard interior room partitions provide the necessary protection to comply with the dose limit for the population in the adjacent room. For the rooms where dental examinations are carried out using computed tomographs additional lead shield up to 1.5 mm thick is required depending on the conditions and the category of protected persons in the adjacent room.

Key words: medical investigations, X-ray dental room, stationary shield, scatter coefficient, direct radiation, scatter radiation.

Vladislav Yu. Golikov

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

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

Conflict of interests

Author declares the absence of conflict of interest.

Information about the source of funding

The work was performed within the framework of the initiative research project "Scientific justification for changes in the calculations of stationary shielding in X-ray rooms".

References

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, (New York, UN: Scientific Annexes C, D and E); 2011.
2. Golikov VYu. Critical analysis of the existing approach to the calculation of radiation shielding in X-ray rooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 13-21. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-13-21.
3. Archer BR, Thornby JI, Bushong SC. Diagnostic X-Ray Shielding Design Based on an Empirical Model of Photon Attenuation. *Health Physics*. 1983;44: 507-517.
4. NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements). Radiation Protection in Dentistry. NCRP Report No. 145. NCRP; 2004.
5. Colin J Martin. Radiation shielding for diagnostic radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;165(1-4): 376-381. doi:10.1093/rpd/ncv040.
6. European Commission. European guidelines on Radiation Protection in dental radiology. The safe use of radiographs in dental practice. Radiation Protection 136. European Communities; 2004.
7. Use and regulatory control of dental x-ray installations ST3.1. Radiation and Nuclear Safety Authority, Finland; 1999.
8. National Radiological Protection Board. Guidance notes for dental practitioners on the safe use of x-ray equipment. NRPB dental x-ray protection services; 2001.
9. Helmrot E, Carlsson GAlm. Measurement of radiation dose in dental radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;114(1-3): 168-171.
10. Worrall M, McVey S, Suon DG. Proposals for revised factors in intra-oral radiography shielding calculations. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32(3): 243-249. doi: 10.1088/0952-4746/32/3/243.
11. Reid JA, MacDonald JC, Dekker TA, Kuppers BU. Radiation exposures around a panoramic dental X-ray unit. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*. 1993;75: 780-782.
12. Williams JR, Fipem MSc, Montgomery A. Measurement of dose in panoramic dental radiology. *British Journal of Radiology*. 2000;73: 1002-1006.
13. Isoardi P, Ropolo R. Measurement of dose-width product in panoramic dental radiology. *British Journal of Radiology*. 2003;76: 129-131.
14. Holroyd JR, Walker A. Recommendations on the design of X-ray facilities and the quality assurance of dental cone beam CT systems. HPARPD-065. Chilton: HPA; 2010.

Received: February 12, 2024

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

For citation: Golikov V.Yu. About the necessary thickness of stationary shield in X-ray dental rooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 46–52. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-46-52

Переход от частоты хромосомных транслокаций в Т-лимфоцитах к дозе на костный мозг в отдаленные сроки после внутреннего облучения $^{89,90}\text{Sr}$

Е.И. Толстых

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

Цитогенетические исследования *Fluorescence In Situ Hybridization*, позволяющие оценивать частоту стабильных хромосомных aberrаций в циркулирующих Т-лимфоцитах, обычно используются в ретроспективной дозиметрии в случае равномерного облучения всего тела. В случае неравномерного облучения $^{89,90}\text{Sr}$ интерпретация цитогенетических данных является сложной задачей. Средневзвешенная доза на Т-лимфоциты на момент забора крови донора в отдаленные сроки после воздействия $^{89,90}\text{Sr}$ не совпадает с дозой на красный костный мозг. Ранее нами была разработана модель, позволяющая оценивать средневзвешенные дозы на Т-лимфоциты при поступлении $^{89,90}\text{Sr}$ лицам различного возраста. В настоящей работе результаты моделирования использованы для оценки коэффициентов, позволяющих перейти от частоты транслокаций к дозе на красный костный мозг, которая важна для оценок радиобиологических эффектов, связанных с гематологическими заболеваниями. Целью нашей работы является численная оценка коэффициента перехода B_{rbm} от дозы на лимфоциты к дозе на красный костный мозг при различных режимах перорального поступления $^{89,90}\text{Sr}$ в зависимости от возраста, пола и времени после начала облучения. Рассмотрены следующие режимы: однократное, равномерное хроническое в течение полугодия, равномерное хроническое в течение 1–5 лет, неравномерное поступление в течение 5 лет (имитирует динамику поступления в населенных пунктах на реке Теча в 1950–1954 гг.). В результате было обнаружено, что значения коэффициентов B_{rbm} существенно зависят от возраста на момент поступления $^{89,90}\text{Sr}$. Чем старше человек на момент начала облучения, тем в большей мере доза, оцененная по цитогенетическим данным, отличается (существенно ниже) от дозы на красный костный мозг. Только для новорожденных и детей первых лет жизни можно сказать, что цитогенетическая доза соответствует дозе на красный костный мозг. Это связано с возрастной динамикой Т-клеточных популяций. Пол не оказывает существенного влияния на B_{rbm} . Влияние длительности поступления $^{89,90}\text{Sr}$ на B_{rbm} наиболее выражено для подростков 15 лет. Для них отличия значений B_{rbm} при однократном и хроническом 5-летнем поступлении достигают 13%. Неравномерность поступления ^{90}Sr в течение нескольких лет не оказывает существенного влияния на B_{rbm} и может моделироваться равномерным поступлением той же длительности.

Ключевые слова: Т-лимфоциты, дозовые коэффициенты, $^{89,90}\text{Sr}$, внутреннее облучение, биодозиметрия.

Введение

Радионуклиды $^{89,90}\text{Sr}$ относятся к остеотропным β -излучателям, которые, попадая в организм человека, накапливаются в минерализованной кости и локально облучают красный костный мозг (ККМ), расположенный между костными трабекулами. Стронций-90 является долгоживущим (период полураспада 28,9 лет), период полураспада ^{89}Sr составляет 50,6 сут. Таким образом, облучение от $^{89,90}\text{Sr}$ является внутренним, неравномерным, со снижающейся мощностью дозы, которое в случае ^{90}Sr продолжается многие годы даже при однократном поступлении радионуклида.

Цитогенетические исследования FISH (*Fluorescence In Situ Hybridization*), позволяющие оценивать частоту стабильных хромосомных aberrаций в циркулирующих Т-лимфоцитах [1], обычно используются для ретроспективной оценки доз. Этот метод биодозиметрии показал хорошие результаты по оценкам доз в случаях равномерного облучения всего тела [2, 3], когда дозы на красный костный мозг (ККМ) и другие ткани, в том числе Т-лимфоциты, очень близки. В случае воздействия $^{89,90}\text{Sr}$ интерпретация цитогенетических данных является сложной задачей, особенно если отбор крови происходит в отдаленные сроки после начала облучения (попадания в организм ^{90}Sr). В момент отбора пробы в крови донора содержатся разнород-

Толстых Евгения Игоревна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

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

ные популяции Т-лимфоцитов, накопившие различную дозу облучения в ряду поколений. Часть популяций – это потомки Т-прогениторов, облучившихся в ККМ (они получили наиболее значительную дозу), другая часть – это потомки Т-лимфоцитов, сформированных до начала облучения $^{89,90}\text{Sr}$, поэтому они облучались только при циркуляции в организме, где основное время проводили в мягких тканях (эти популяции получили значительно меньшую дозу) [4]. Таким образом, средневзвешенная доза на Т-лимфоциты на момент забора крови донора в отдаленные сроки после воздействия ^{90}Sr не совпадает с дозой на ККМ, что было показано в исследованиях по реке Тече (Челябинская область, Россия) [5, 6], где ^{90}Sr , наряду с ^{89}Sr , был основным дозообразующим радионуклидом для населения после радиоактивного загрязнения реки в 1950-е гг.

Ранее нами была разработана модель, позволяющая оценивать средневзвешенные дозы на Т-лимфоциты при поступлении $^{89,90}\text{Sr}$ лицам различного возраста [4]. Результаты расчетов по данной модели могут быть использованы для оценки коэффициентов, позволяющих перейти от частоты транслокаций к дозе на ККМ, которая имеет важное практическое значение для оценок радиобиологических эффектов, связанных с гематологическими заболеваниями.

В основе оценки доз облучения ККМ на основе цитогенетических данных лежат следующие основные параметры:

Число транслокаций y , в n_{cell} просчитанных Т-лимфоцитах испытуемого или группы испытуемых, оценивается с использованием метода FISH. Особенности применения и требования к унификации метода описаны в ряде документов, таких как [2, 7]. Для оценки доз используется частота транслокаций (μ), которая должна быть представлена в расчете на 1 геном-эквивалент (Genomic Equivalent GE, по другой терминологии на один клеточный эквивалент – Cell Equivalent CE). Коэффициент перехода от числа просчитанных клеток (метафаз) n_{cell} к числу геномных эквивалентов n_{ge} зависит от набора окрашенных хромосом и типа окраски (одноцветный или многоцветный). Если используется 24-цветная окраска, то пересчета на GE не требуется.

Фоновая (нерадикационная), зависящая от возраста τ , частота транслокаций $\mu_0(\tau)$. Поправка на фоновые значения (вычитание фоновых значений) необходима, поскольку транслокации могут возникать под воздействием иных (нерадикационных) неблагоприятных эндогенных и экзогенных факторов, и число транслокаций в Т-лимфоцитах накапливается с возрастом в течение жизни. По данным литературы [8], пол не оказывает существенного влияния на формирование транслокаций, влияние курения и алкоголя также не является значительным. Для получения фоновых значений используется зависимость частоты транслокаций, полученная в объединенном международном исследовании необлученных доноров [8] в терминах число транслокаций на GE.

Коэффициенты перехода от скорректированной на возраст частоты транслокаций μ , к дозе на Т-лимфоциты (D_L). Коэффициенты определяются на основании калибровочной кривой (линейно-квадратичной или линейной). Для построения калибровочной кривой принципиальное значение имеет надежность оценки доз облучения и единообразие критериев подсчета транслокаций. Форма и параметры калибровочной кривой зависят от типа излучений (линейной передачи энергии

ЛПЭ), а также для редко ионизирующего гамма- и бета-излучения, от мощности дозы облучения. Калибровочные кривые подробно обсуждаются в ряде работ [2, 7, 9, 10]. При редко ионизирующем излучении с высокой мощностью дозы зависимость частоты транслокаций от дозы является линейно-квадратичной, и калибровочная кривая имеет вид: $D_L = C + \alpha\mu + \beta\mu^2$, где C – свободный член, α – линейный коэффициент, β – квадратичный коэффициент. Предполагается, что квадратичный член β учитывает двунитевые разрывы (источник формирования транслокаций), возникающие при повторных попаданиях ионизирующих частиц в ядро клетки с небольшим промежутком времени (< 2 ч). То есть коэффициент β учитывает абберации двутрекового происхождения, которые могут быть изменены механизмами репарации в случае, если они успевают сработать в ходе длительного воздействия или в периоды между прерывистыми (фракционированными) острыми воздействиями. Когда имеет место длительное пролонгированное облучение (сутки, месяцы, годы, как в случае воздействия ^{90}Sr), то даже при высоких накопленных дозах (до 2–3 Гр) ожидается линейная зависимость $D = C + \alpha\mu$. То есть коэффициент α отражает увеличение частоты радиационно индуцируемых транслокаций (нерепарированных повреждений) на единицу дозы облучения. Эксперты МАГАТЭ оценивают линейный коэффициент α в диапазоне 0,015–0,020 транслокаций на GE на Гр [2]. Коэффициент C в основном зависит от возраста донора и при вычитании фоновых значений $\mu_0(\tau)$ стремится к 0.

Коэффициент перехода (B_{rbm}) от дозы на лимфоциты (D_L) к дозе на красный костный мозг (D_{rbm}). Для остеотропного ^{90}Sr этот коэффициент зависит от пола, возраста на момент начала облучения (τ_1) и времени после начала облучения ($\tau_s - \tau_1$), где τ_s – возраст донора на момент забора крови.

Таким образом, для расчета дозы на ККМ в случае поступления ^{90}Sr используется следующая формула:

$$D_{rbm} = \frac{[\mu_i - \mu_0(\tau)]}{\alpha} \cdot B_{rbm}(\text{sex}, \tau_1, \tau_s) \quad (1)$$

Цель исследования – численная оценка коэффициента перехода от дозы на лимфоциты к дозе на красный костный мозг (B_{rbm}) при различных режимах перорального поступления $^{89,90}\text{Sr}$ в зависимости от пола, возраста и времени после начала облучения. Оценка базируется на ранее разработанных модельных подходах к оценке доз на Т-лимфоциты и рассчитанных дозовых коэффициентах (DK_L) для $^{89,90}\text{Sr}$ [4]. Рассмотрены следующие режимы перорального поступления: однократное, равномерное хроническое в течение полугода, равномерное хроническое в течение 1–5 лет, неравномерное поступление в течение 5 лет (имитирует динамику поступления в населенных пунктах на реке Тече в 1950–1954 гг.)

Материалы и методы

Оценка B_{rbm} при однократном поступлении $^{89,90}\text{Sr}$

В случае однократного поступления 1 Бк $^{89,90}\text{Sr}$ коэффициент перехода от дозы на лимфоциты к дозе на красный костный мозг (B_{rbm}) в относительных единицах находится по формуле:

$$B_{rbm}(sex, \tau_1, \tau_s) = \frac{DK_{rbm}(sex, \tau_1, \tau_s)}{DK_L(sex, \tau_1, \tau_s)} \quad (2)$$

где:

τ_1 – возраст донора на момент поступления $^{89,90}\text{Sr}$ (годы);

τ_s – возраст донора на момент забора крови для цитогенетического исследования FISH;

$DK_{rbm}(sex, \tau_1, \tau_s)$ – доза, накопленная в ККМ за период времени $(\tau_s - \tau_1)$ после однократного поступления с пищей $^{89,90}\text{Sr}$; рассчитывается с использованием дозиметрической [11, 12] и биокинетической моделей [13], учитывающих пол (sex) и возраст индивида; для расчетов использовались программы, разработанные в УНПЦ РМ: «Трабекула» [12] и программы реализации камерной биокинетической модели;

$DK_L(sex, \tau_1, \tau_s)$ – средневзвешенная доза, накопленная за период времени $(\tau_s - \tau_1)$ в ряду поколений Т-клеток после однократного поступления с пищей $^{89,90}\text{Sr}$; рассчитывается с использованием модели возрастной динамики и кинетики Т-клеток, а также известных значений D_{org} для органов и тканей, где Т-клетки проводят какое-то время [4]; Гр/Бк. Для расчетов использовалась компьютерная программа «Лимфоциты». Численные значения $DK_L(sex, \tau_1, \tau_s)$ для $^{89,90}\text{Sr}$ представлены в работе [4].

В общем виде DK_L представляет собой средневзвешенную суммарную дозу, которая включает в себя дозы на разные популяции лимфоцитов с соответствующими взвешивающими коэффициентами. Имеется в виду (i) доза на лимфоциты (и их потомков), сформированные до начала облучения; (ii) доза на лимфоциты (и их потомков), сформированные после начала облучения, которая, в свою очередь, включает дозу на стволовые Т-предшественники (прогениторы), накопленную с момента начала облучения до выхода в кровь из костного мозга, и дозу на их потомков – Т-лимфоцитов, полученную при циркуляции в теле. Расчеты выполнены для различных возрастов на момент поступления $^{89,90}\text{Sr}$.

Оценка B_{rbm} при хроническом поступлении $^{89,90}\text{Sr}$

Хроническое равномерное (одинаковое ежедневное) поступление ^{90}Sr в течение полугода. Расчеты сделаны для детей 0–5 лет как наиболее чувствительной группы

с высокой скоростью перестройки кости; принцип расчета аналогичен таковому для однократного поступления (формула 2), различия касаются только численных значений ДК.

При расчетах доз, когда поступление $^{89,90}\text{Sr}$ длится больше полугода, мы использовали общепринятый подход, а именно: рассчитывали сумму значений доз от поступления активности $A_i(t)$ в каждый выделенный период времени. Поэтому для B_{rbm} имеем:

$$B_{rbm}(\tau_1, \tau_s) = \frac{\sum_{t_1}^{\tau_s} [DK_{rbm}(sex, \tau_1, \tau_s) * A_i(t)]}{\sum_{t_1}^{\tau_s} [DK_L(sex, \tau_1, \tau_s) * A_i(t)]} \quad (3)$$

Очевидно, что в случае равномерного поступления, значения $A_i(t)$ в числителе и знаменателе формулы (3) сокращаются, поэтому:

$$B_{rbm}(\tau_1, \tau_s) = \frac{\sum_{t_1}^{\tau_s} [DK_{rbm}(sex, \tau_1, \tau_s)]}{\sum_{t_1}^{\tau_s} [DK_L(sex, \tau_1, \tau_s)]} \quad (4)$$

Однако если хроническое поступление было неравномерным (функция $A_i(t)$ не является константой), то коэффициент B_{rbm} должен рассчитываться с ее учетом. В этой связи необходимо выяснить чувствительность B_{rbm} к различным режимам хронического поступления радионуклидов.

Расчёты были сделаны для следующих режимов поступления: хроническое равномерное (одинаковое ежегодное) поступление $^{89,90}\text{Sr}$ в течение длительного времени (от 1 года до 5 лет); хроническое неравномерное поступление ^{90}Sr в течение 5 лет (имитирует динамику поступления в населенных пунктах на реке Тече в 1950–1954 гг.). В таблице 1 представлена динамика диетного поступления ^{90}Sr в период максимальных сбросов радиоактивных отходов в р. Течу (1950–1954 гг.), которая использовалась для расчетов.

Результаты и обсуждение

Однократное поступление $^{89,90}\text{Sr}$

В таблицах 2 и 3 представлены рассчитанные нами значения коэффициентов B_{rbm} для ^{90}Sr и ^{89}Sr для мужчин в случае однократного поступления радионуклидов.

Как следует из анализа таблицы 2, все значения B_{rbm} для ^{90}Sr больше 1, это означает, что доза ККМ выше, чем доза на Т-лимфоциты. Только для новорожденных

Таблица 1

Динамика поступления ^{90}Sr с рационом жителям села Муслюмово различного возраста в 1950–1954 гг. на основе [14]

[Table 1]

Dynamics of ^{90}Sr dietary intake for Muslyumovo residents of various ages in 1950–1954 based on [14]

Календарный год [Calendar year]	Возраст в 1950 г., годы [Age in 1950, years]			
	τ_1-0	τ_1-1	τ_1-5	τ_1-25
1950	0,047	0,036	0,106	0,190
1951	0,327	0,371	0,461	0,441
1952	0,336	0,356	0,282	0,240
1953	0,235	0,196	0,125	0,106
1954	0,054	0,041	0,026	0,022
Сумма [Sum]	1	1	1	1

Для возрастов 10 и 15 лет динамика поступления такая же, как и для взрослых 25 лет [Note: for 10 and 15-year-old children, the dynamics of ingestion is the same as for adults aged 25 and older].

Таблица 2

Численные значения коэффициента B_{rbm} для мужчин различного возраста на момент однократного перорального поступления ^{90}Sr (τ_i , годы)

[Table 2]

Numerical values of the B_{rbm} for men of different ages at the time of a single ^{90}Sr ingestion (τ_i , years)

Возраст τ_s [Age τ_s]	τ_i-0	τ_i-1	τ_i-2	τ_i-3	τ_i-4	τ_i-5	τ_i-10	τ_i-15	τ_i-25	τ_i-35	τ_i-45	τ_i-55
5	1,208	1,476	1,896	2,426	3,142	–	–	–	–	–	–	–
10	1,189	1,376	1,636	1,914	2,230	2,609	–	–	–	–	–	–
15	1,157	1,298	1,484	1,668	1,865	2,085	3,451	–	–	–	–	–
20	1,134	1,251	1,399	1,539	1,683	1,840	2,739	4,267	–	–	–	–
25	1,122	1,224	1,353	1,472	1,592	1,721	2,437	3,597	–	–	–	–
30	1,114	1,210	1,328	1,436	1,544	1,660	2,292	3,296	5,980	–	–	–
35	1,110	1,201	1,313	1,415	1,517	1,624	2,213	3,138	5,381	–	–	–
40	1,107	1,195	1,304	1,402	1,500	1,603	2,168	3,050	5,022	7,045	–	–
45	1,105	1,192	1,299	1,395	1,490	1,591	2,141	3,000	4,800	6,665	–	–
50	1,104	1,190	1,295	1,390	1,483	1,582	2,125	2,973	4,661	6,404	7,600	–
55	1,103	1,188	1,293	1,386	1,479	1,577	2,116	2,958	4,574	6,232	7,413	–
60	1,103	1,187	1,292	1,384	1,477	1,574	2,110	2,951	4,520	6,118	7,267	7,861
65	1,103	1,187	1,291	1,383	1,475	1,572	2,107	2,948	4,485	6,044	7,162	7,780
70	1,102	1,186	1,290	1,382	1,474	1,571	2,106	2,947	4,464	5,997	7,090	7,705
75	1,102	1,186	1,289	1,381	1,473	1,570	2,104	2,947	4,450	5,966	7,043	7,649
80	1,102	1,186	1,289	1,381	1,472	1,569	2,102	2,947	4,442	5,947	7,012	7,611
85	1,102	1,186	1,289	1,380	1,472	1,568	2,101	2,943	4,437	5,934	6,993	7,587

τ_s – возраст донора на момент отбора пробы [τ_s – age of the donor at the time of sampling];

τ_i – возраст донора на момент поступления ^{90}Sr [τ_i – age of the donor at the time of ^{90}Sr intake].

Таблица 3

Численные значения коэффициента B_{rbm} для мужчин различного возраста на момент однократного перорального поступления ^{89}Sr (τ_i , годы)

[Table 3]

Numerical values of the B_{rbm} for men of different ages at the time of a single ^{89}Sr ingestion (τ_i , years)

Возраст τ_s [Age τ_s]	τ_i-0	τ_i-1	τ_i-2	τ_i-3	τ_i-4	τ_i-5	τ_i-10	τ_i-15	τ_i-25	τ_i-35	τ_i-45	τ_i-55
5	0,983	1,143	1,437	1,861	2,531	–	–	–	–	–	–	–
10	0,989	1,092	1,257	1,452	1,686	1,969	–	–	–	–	–	–
15	0,991	1,071	1,194	1,328	1,477	1,642	2,585	–	–	–	–	–
20	0,992	1,061	1,162	1,269	1,383	1,504	2,106	3,295	–	–	–	–
25	0,993	1,055	1,144	1,238	1,335	1,436	1,908	2,713	–	–	–	–
30	0,993	1,051	1,135	1,220	1,309	1,400	1,811	2,464	4,403	–	–	–
35	0,994	1,049	1,129	1,210	1,294	1,379	1,757	2,334	3,899	–	–	–
40	0,994	1,048	1,125	1,204	1,284	1,366	1,725	2,259	3,637	5,263	–	–
45	0,994	1,047	1,123	1,200	1,279	1,358	1,705	2,214	3,486	4,920	–	–
50	0,994	1,047	1,122	1,197	1,275	1,353	1,692	2,185	3,394	4,719	5,722	–
55	0,994	1,046	1,121	1,196	1,272	1,349	1,683	2,166	3,337	4,595	5,533	–
60	0,994	1,046	1,120	1,195	1,270	1,347	1,678	2,154	3,299	4,517	5,414	5,944
65	0,994	1,046	1,120	1,194	1,269	1,346	1,674	2,146	3,275	4,466	5,338	5,851
70	0,994	1,046	1,119	1,193	1,269	1,345	1,672	2,141	3,259	4,433	5,289	5,791
75	0,994	1,046	1,119	1,193	1,268	1,344	1,670	2,137	3,249	4,411	5,257	5,751
80	0,994	1,046	1,119	1,193	1,268	1,343	1,669	2,135	3,242	4,397	5,235	5,725

τ_s – возраст донора на момент отбора пробы [τ_s – age of the donor at the time of sampling];

τ_i – возраст донора на момент поступления ^{89}Sr [τ_i – age of the donor at the time of ^{89}Sr intake].

и детей первых лет жизни можно сказать, что цитогенетическая доза близка к дозе на ККМ. Возраст на момент поступления ^{90}Sr оказывает существенное влияние на значение коэффициента B_{rbm} . Чем старше человек на момент начала облучения ^{90}Sr , тем в большей мере доза, оцененная по цитогенетическим данным, отличается (существенно ниже) от дозы на ККМ. Это связано с возрастной динамикой Т-клеточных популяций. Основная масса продукции Т-лимфоцитов приходится на детский возраст. К возрасту 10 лет тимус производит примерно 50% всех лимфоцитов, произведенных за жизнь (за 75 лет). Именно в детстве происходит основное формирование адаптивной иммунной системы, формируются долгоживущие многоклеточные клоны, определяющие Т-клеточный репертуар человека на долгие годы [15, 16, 17], и даже последующая тимэктомия не оказывает существенного влияния на разнообразие Т-клеточных рецепторов. Таким образом, если облучение (поступление с рационом ^{90}Sr) началось в подростковом возрасте, значительная доля Т-лимфоцитов уже сформировалась, они сами и их потомки облучались только при циркуляции в организме, полученная ими доза существенно отличается от дозы на ККМ.

Как показали наши расчеты, различия между мужчинами и женщинами составляют менее 2% для всех возрастов, кроме 10–15 лет. Для этих возрастов различия вырастают до 4%, причем достигается эта величина в отдаленные сроки после начала облучения (через 35–40 лет). Причина таких различий в том, что дозовые коэффициенты для подросткового периода отражают различия в скорости роста скелета у девушек и юношей. В этот период происходит ростовой рывок (сопровождающийся максимальной задержкой в организме остеотропных металлов), который у девушек наблюдается на 2 года раньше, чем у юношей. Однако, поскольку B_{rbm} — это относительная величина, различия между мужчинами и женщинами оказываются небольшими.

Изотопы ^{89}Sr и ^{90}Sr имеют одинаковую биокинетику, оба являются β -излучателями, но с разной суммарной энергией излучений, оценки B_{rbm} для обоих радионуклидов базируются на одной модели динамики и биокинетики Т-клеток. Для этих радионуклидов наблюдаются одинаковые закономерности влияния пола и возраста на коэффициент перехода от дозы на Т-лимфоциты к дозе на ККМ. Это хорошо видно из таблицы 3, где представлены значения B_{rbm} для ^{89}Sr для мужчин (значения для женщин не приводятся, так как различия по полу, как и в случае со ^{90}Sr , несущественны).

Следует также отметить, что в каждой возрастной группе (см. табл. 2, 3) значение B_{rbm} снижается со временем. Максимальные различия между точками 10 и 40 лет после начала облучения наблюдаются у детей и подростков (5–15 лет) и составляют около 20%. Это определяется наложением нескольких факторов: возрастной динамикой Т-клеток (новые Т-лимфоциты продолжают формироваться в тимусе из прогениторов, облученных в ККМ), возрастными изменениями в метаболизме стронция (более длительная задержка стронция при поступлении подросткам по сравнению с другими возрастными группами), изменениями геометрии облучения ККМ в растущих костях и т.п.

Хроническое поступление $^{89,90}\text{Sr}$

Характер поступления радионуклида может отражаться на его задержке в тканях-источниках облучения (для $^{89,90}\text{Sr}$ это минерализованные костные ткани), а значит, и на величине дозовых коэффициентов $ДК_{rbm}$ и $ДК_L$, отношение которых определяет коэффициент B_{rbm} . На рисунке 1 представлено сопоставление B_{rbm} для случаев однократного и хронического поступления ^{90}Sr в течение полугода детям первых лет жизни.



Рис. 1. Сопоставление значений B_{rbm} для однократного и хронического в течение полугода поступления 1 Бк ^{90}Sr для лиц мужского пола

[Fig. 1. Comparison of B_{rbm} values for a single and chronic intake of 1 Bq ^{90}Sr over a period of six months for males]

Как следует из рисунка 1, различия, связанные с режимом поступления, составляют менее 5% для этих возрастных групп. Для остальных возрастов эти различия еще менее существенны. Таким образом, длительность поступления в течение полугода не оказывает существенного влияния на B_{rbm} .

Влияние более длительного хронического поступления $^{89,90}\text{Sr}$ на значения B_{rbm} мы рассматривали на примере поступления в течение 1, 2, 3, 5 лет, при этом поступление было равномерным. Для расчетов использовали формулу 4. В таблицах 4, 5 представлены рассчитанные нами коэффициенты перехода от дозы на Т-лимфоциты к дозе на ККМ для ^{90}Sr и ^{89}Sr соответственно. Поскольку пол не оказывает существенное влияние на B_{rbm} , расчеты сделаны только для мужчин и могут применяться для лиц обоего пола.

Рисунок 2 иллюстрирует влияние длительности поступления на коэффициент B_{rbm} через 40 лет после начала воздействия, показаны различия (в %) между коэффициентами B_{rbm} для хронического поступления ^{90}Sr длительностью 1 год и 5 лет. Как следует из анализа таблицы 4 и рисунка 2, влияние длительности поступления ^{90}Sr на B_{rbm} в наибольшей степени выражено для подростков 10–15 лет. Различия достигают 13% и должны учитываться при оценках доз на ККМ по цитогенетическим данным FISH. Для детей 1–5 лет и взрослых эти различия находятся в пределах от 6 до 8,5%, для новорожденных – 5%.

Влияние неравномерного хронического поступления $^{89,90}\text{Sr}$ на B_{rbm} мы рассмотрели на примере диетного



Рис. 2. Различия в % между коэффициентами B_{rbm} при длительности поступления ^{90}Sr 1 год и 5 лет. Рассчитаны для временной точки 40 лет после начала поступления для мужчин
[Fig. 2. Differences between the B_{rbm} values (%) for one-year and five-year ^{90}Sr intake. Calculated for a time point of 40 years after the start of intake for men]

поступления ^{90}Sr жителям прибрежных сел на реке Тече. Динамика поступления определялась многими факторами, среди которых наиболее важными были: возраст на начало поступления, который определял объем потребляемых продуктов питания и воды, а также особенности защитных мероприятий в конкретном населенном пункте [14]. Для примера нами была выбрана динамика поступления ^{90}Sr жителям Муслюмово, которая считается референтной для большинства населенных пунктов на Тече (см. табл. 1).

На рисунке 3 представлено сопоставление коэффициентов B_{rbm} , рассчитанных для 3 режимов единичного поступления ^{90}Sr : 1) однократное; 2) хроническое однородное в течение 5 лет; 3) поступление с динамикой, характерной для жителей Муслюмово соответствующего возраста.

Как следует из анализа рисунка 3, значения B_{rbm} , рассчитанные для реального режима хронического поступления, мало отличаются от такового для равномерного хронического той же длительности (5 лет), различия составляют 4–5% для новорожденных и годовалых детей,

Таблица 4

Численные значения B_{rbm} при различных режимах поступления ^{90}Sr

[Table 4]

Numerical values of the B_{rbm} for various scenarios of ^{90}Sr intake]

Время от начала поступления, годы [Time after the start of intake ($\tau_s - \tau_i$), years]	B_{rbm} для различной длительности (d) хронического поступления ^{90}Sr , годы [B_{rbm} for different duration (d) of chronic ^{90}Sr intake, years]			
	d=1	d=2	d=3	d=5
Возраст начала поступления $\tau_i = 0$ [Age at the start of intake $\tau_i = 0$]				
10	1,21	1,25	1,27	1,31
20	1,15	1,18	1,20	1,22
30	1,13	1,15	1,17	1,19
40	1,12	1,14	1,16	1,18
Возраст начала поступления $\tau_i = 1$ год [Age at the start of intake $\tau_i = 1$]				
10	1,37	1,43	1,47	1,54
20	1,26	1,29	1,32	1,37
30	1,22	1,25	1,27	1,32
40	1,21	1,23	1,25	1,30
Возраст начала поступления $\tau_i = 5$ лет [Age at the start of intake $\tau_i = 5$]				
10	2,10	2,16	2,24	2,42
20	1,74	1,77	1,81	1,92
30	1,65	1,67	1,70	1,79
40	1,61	1,63	1,66	1,75
Возраст начала поступления $\tau_i = 10$ лет [Age at the start of intake $\tau_i = 10$]				
10	2,81	2,93	3,05	3,27
20	2,35	2,44	2,52	2,67
30	2,23	2,30	2,37	2,51
40	2,18	2,25	2,32	2,46
Возраст начала поступления $\tau_i = 15$ лет [Age at the start of intake $\tau_i = 15$]				
10	3,71	3,90	4,04	4,27
20	3,27	3,41	3,53	3,74
30	3,13	3,26	3,37	3,56
40	3,09	3,22	3,32	3,51

Окончание таблицы 4

Время от начала поступления, годы [Time after the start of intake ($\tau_s - \tau_1$), years]	B_{rbm} для различной длительности (d) хронического поступления ^{90}Sr , годы [B_{rbm} for different duration (d) of chronic ^{90}Sr intake, years]			
	d=1	d=2	d=3	d=5
Возраст начала поступления $\tau_1 = 25$ лет [Age at the start of intake $\tau_1 = 25$]				
10	5,79	5,92	6,04	6,23
20	5,22	5,32	5,41	5,60
30	4,97	5,05	5,13	5,29
40	4,87	4,94	5,02	5,17

Таблица 5

Численные значения коэффициента B_{rbm} при различных режимах поступления ^{89}Sr

[Table 5]

Numerical values of the B_{rbm} factor for various scenarios of ^{89}Sr intake]

Время от начала поступления, годы [Time after the start of intake ($\tau_s - \tau_1$), years]	B_{rbm} для различной длительности (d) хронического поступления ^{89}Sr , годы [B_{rbm} for various duration (d) of chronic ^{89}Sr intake, years]			
	d=1	d=2	d=3	d=5
Возраст начала поступления $\tau_1 = 0$ [Age at the start of intake]				
10	0,990	1,011	1,024	1,048
20	0,993	1,007	1,016	1,032
30	0,994	1,006	1,014	1,027
40	0,994	1,006	1,013	1,026
Возраст начала поступления $\tau_1 = 1$ год [Age at the start of intake, year]				
10	1,089	1,122	1,154	1,210
20	1,060	1,082	1,102	1,141
30	1,051	1,070	1,087	1,120
40	1,048	1,066	1,082	1,113
Возраст начала поступления $\tau_1 = 5$ лет [Age at the start of intake, year]				
10	1,645	1,674	1,729	1,885
20	1,438	1,445	1,474	1,569
30	1,381	1,383	1,406	1,487
40	1,359	1,360	1,381	1,458
Возраст начала поступления $\tau_1 = 10$ лет [Age at the start of intake, year]				
10	2,106	2,238	2,342	2,540
20	1,811	1,890	1,949	2,062
30	1,725	1,790	1,839	1,932
40	1,683	1,748	1,795	1,882
Возраст начала поступления $\tau_1 = 15$ лет [Age at the start of intake, year]				
10	2,832	2,986	3,100	3,293
20	2,413	2,509	2,578	2,695
30	2,281	2,362	2,420	2,518
40	2,230	2,305	2,359	2,450
Возраст начала поступления $\tau_1 = 25$ лет [Age at the start of intake, year]				
10	4,200	4,279	4,375	4,580
20	3,715	3,739	3,792	3,916
30	3,542	3,551	3,591	3,692
40	3,471	3,474	3,509	3,603

при этом коэффициент B_{rbm} для случая поступления на реке Теча выше. Для остальных возрастных групп различия составляют менее 4%, при этом коэффициент B_{rbm} для

неравномерного поступления занимает промежуточное положение между однократным и равномерным в течение 5 лет.

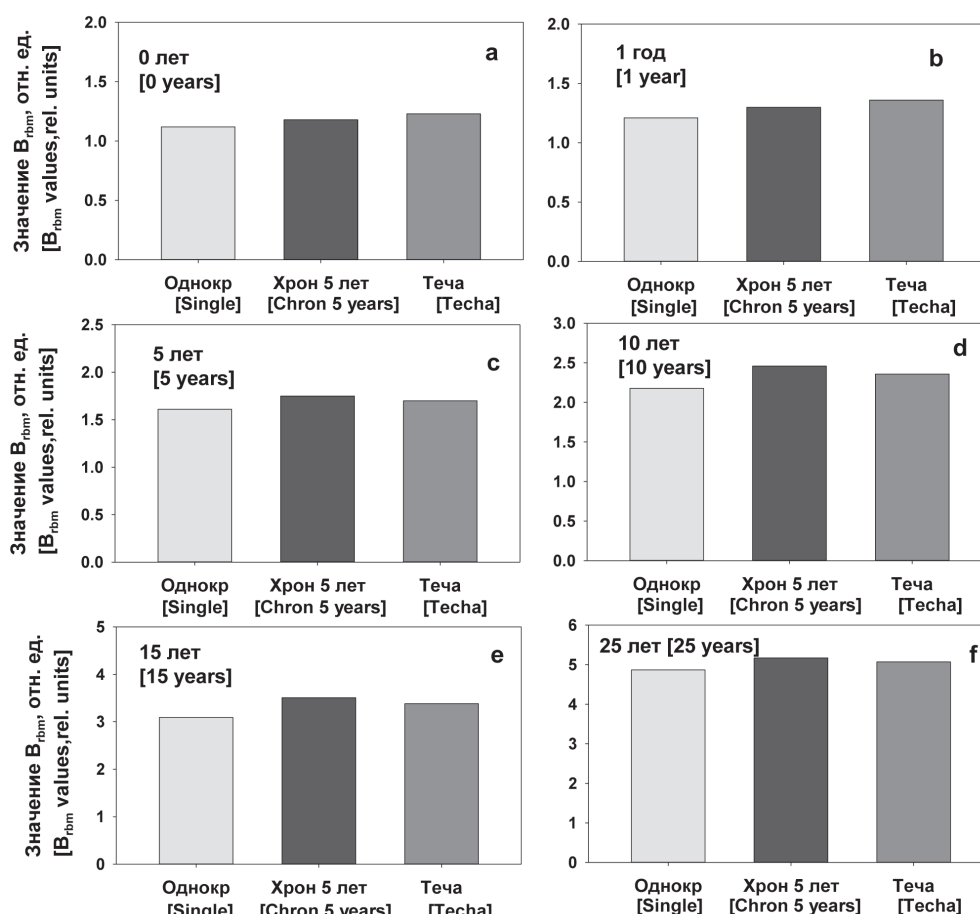


Рис. 3. Сопоставление коэффициентов B_{rbm} , рассчитанных для 3 режимов поступления ^{90}Sr : однократное (однокр), хроническое однородное в течение 5 лет (хрон 5 лет) и характерное для жителей Муслюмово (Теча) различных возрастов на момент поступления: а – новорожденный (0 лет); б – 1 год; с – 5 лет; д – 10 лет; е – 15 лет; ф – 25 лет. B_{rbm} рассчитаны для временной точки 40 лет после начала поступления для мужчин

[Fig. 3. Comparison of B_{rbm} factors calculated for 3 scenarios of ^{90}Sr intake: single, chronic uniform for 5 years (chron 5 years) and typical of residents of Muslyumovo (Techa) of various ages at the onset of intake: а – newborn (0 years); б – 1 year-old; с – 5 year-old; д – 10 year-old; е – 15 year-old; ф – 25 year-old. B_{rbm} were calculated for a time point of 40 years after the start of intake for men]

Как уже говорилось, ^{89}Sr и ^{90}Sr имеют одинаковую биокинетику. Однако, несмотря на то, что B_{rbm} – это относительная величина, численные значения B_{rbm} для этих радионуклидов различаются, что следует из сопоставления таблиц 2 и 3, а также таблиц 4 и 5. Очевидно, что причиной таких различий является разная длительность облучения ККМ при попадании радионуклидов в организм, что определяется их периодом полураспада. В результате при воздействии ^{90}Sr коэффициенты B_{rbm} выше, чем при воздействии ^{89}Sr .

Заключение

Значения коэффициентов B_{rbm} , связывающих дозу на Т-лимфоциты и дозу на ККМ, были получены на основании модельных подходов. На настоящем этапе работы они являются теоретической оценкой, которая дает представление о диапазоне поправочных коэффициентов и влияния на них таких факторов, как пол, возраст и режим поступления радионуклида.

Было показано, что коэффициенты существенно зависят от возраста на момент поступления $^{89,90}\text{Sr}$. Чем старше человек на момент начала облучения, тем в большей степени доза, оцененная цитогенетически-

ми методами, отличается от дозы на ККМ (существенно ниже). Это связано с возрастной динамикой Т-клеточных популяций. Только для новорожденных и детей первых лет жизни правомерно допущение, что цитогенетическая доза соответствует дозе на ККМ. Следует отметить, что в каждой возрастной группе значение B_{rbm} снижается со временем после начала воздействия $^{89,90}\text{Sr}$.

Пол не оказывает существенного влияния на B_{rbm} . При однократном единичном поступлении $^{89,90}\text{Sr}$ различия между мужчинами и женщинами составляют менее 2% для всех возрастов, кроме 10–15 лет. Для этих возрастов различия не превышают 4%. В этой связи расчеты B_{rbm} для хронического поступления были сделаны нами без учета пола (только для мужчин).

Если однородное поступление было растянуто во времени на полгода, то это не оказало существенного влияния на значение B_{rbm} . Влияние более длительности поступления $^{89,90}\text{Sr}$ на B_{rbm} мы рассмотрели на примере хронического поступления длительностью 1, 2, 3, 5 лет, при этом поступление было равномерным. Как показали наши расчеты, влияние длительности поступления $^{89,90}\text{Sr}$ на B_{rbm} наиболее выражено для подростков 15 лет. Максимальные

различия достигают 13% и должны учитываться при оценках доз на ККМ по цитогенетическим данным. Для остальных возрастных групп эти различия менее 10%.

Влияние неравномерности поступления мы изучили, используя динамику поступления ^{90}Sr , характерную для разных возрастных групп жителей Муслумово (населенный пункт на реке Тече). В результате было обнаружено, что неравномерность поступления ^{90}Sr не оказывает существенного влияния на B_{rhm} . Для упрощения расчетов сложная динамика поступления может быть заменена равномерным поступлением той же длительности.

Возможные ошибки применения полученных коэффициентов требуют дальнейшего исследования.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Автор выражает благодарность В.А. Кривошапову за техническую поддержку.

Сведения об источнике финансирования

Работа была выполнена при финансовой поддержке ФМБА России, номер государственного учёта НИР в ЕГИСУ 122040400135-0.

Литература

1. Nakayama R., Abe Y., Ting V.G.S. et al. Cytogenetic Biodosimetry in Radiation Emergency Medicine: 4. Overview of Cytogenetic Biodosimetry // *Radiation Environment and Medicine*. 2022. Vol. 11, № 2. P. 91-103. https://doi.org/10.51083/radiatenviroinmed.11.2_91
2. МАГАТЭ Использование цитогенетической дозиметрии для обеспечения готовности и реагирования при радиационных аварийных ситуациях. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/EPR_Biodosimetry2011R_web.pdf (Дата обращения: 17.5.2022).
3. Giussani A., Lopez M.A., Romm H. et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2020. Vol. 59, № 3. P. 357-387. doi: 10.1007/s00411-020-00845-y.
4. Толстых Е.И., Дегтева М.О. Оценка доз облучения лимфоцитов и их предшественников при пероральном поступлении стронция-89,90 // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 3. С. 82-91. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-82-91>.
5. Vozilova A.V., Shagina N.B., Degteva M.O. et al. FISH analysis of translocations induced by chronic exposure to Sr radioisotopes: second set of analysis of the Techa River Cohort // *Radiation Protection Dosimetry*. 2014. Vol. 159, № 1-4. P. 34-37. doi: 10.1093/rpd/ncu131. Epub 2014 Apr 17. PMID: 24743760.
6. Degteva M.O., Shishkina E.A., Tolstykh E.I. et al. Application of the EPR and FISH Methods to Dose Reconstruction for People Exposed in the Techa River Area // *Radiation biology. Radioecology*. 2017. Vol. 57, № 1. P. 30-41. (English, Russian). PMID: 30698929.
7. ISO 20046. 2019. Radiological protection – Performance criteria for laboratories using Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) translocation assay for assessment of exposure to ionizing radiation. URL: <https://www.iso.org/standard/66892.html> (Дата обращения: 27.12.2022)
8. Sigurdson A.J., Ha M., Hauptmann M., et al. International study of factors affecting human chromosome translocations // *Mutation Research*. 2008. Vol. 652, № 2. P.112–121. doi: 10.1016/j.mrgentox.2008.01.005
9. Goh V.S.T, Fujishima Y., Abe Y. et al. Construction of fluorescence in situ hybridization (FISH) translocation dose-response calibration curve with multiple donor data sets using R, based on ISO 20046:2019 recommendations // *International Journal of Radiation Biology*. 2019. Vol. 95, № 12. P.1668-1684. doi: 10.1080/09553002.2019.1664788.
10. Нугис В.Ю., Снигирёва Г.П., Ломоносова Е.Е. и др. Трёхцветный FISH-метод: кривые доза–эффект для транслокаций в культурах лимфоцитов периферической крови после гамма-облучения in vitro // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2021. № 5. С. 12-20. DOI: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2020-65-5-12-20>.
11. Degteva M.O, Tolstykh E.I., Shishkina E. et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: General approach and application to active marrow exposure from bone-seeking beta-particle emitters // *PLoS One*. 2021. Vol. 16, № 10 e0257605. doi: 10.1371/journal.pone.0257605.
12. Shishkina E.A., Timofeev Y.S., Volchkova A.Y. et al. Trabecula: A Random Generator of Computational Phantoms for Bone Marrow Dosimetry // *Health Physics*. 2020. Vol. 118, № 1. P. 53-59. doi: 10.1097/HP.0000000000001127.
13. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, № 1. P. 87-127. doi: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
14. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Peremyslova L.M. et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: strontium-90 // *Health Physics*. 2011. Vol. 101, № 1. P. 28-47. doi: 10.1097/HP.0b013e318206d0ff.
15. Britanova O.V., Shugay M., Merzlyak E.M. et al. Dynamics of individual T cell repertoires: from cord blood to centenarians // *Journal of Immunology*. 2016. Vol. 196, № 12. P. 5005–5013. doi 10.4049/jimmunol.1600005.
16. Naumova E.N., Gorski J., Naumo Y.N. Simulation studies for a multistage dynamic process of immune memory response to influenza: experiment in silico // *Annales Zoologici Fennici*. 2008. Vol. 45. P. 369–384. DOI: 10.5735/086.045.0502.
17. Yoshida K., Cologne J.B., Cordova K. et al., Aging-related changes in human T-cell repertoire over 20 years delineated by deep sequencing of peripheral T-cell receptors // *Experimental Gerontology*. 2017. Vol. 1, № 96. P. 29–37. doi 10.1016/j.exger.2017.05.015.

Поступила: 15.01.2024 г.

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины ФМБА России, Челябинск, Россия. **Адрес для переписки:** 454076, Россия, Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: evgenia@urcrm.ru
ORCID 0000-0002-4958-3214

Для цитирования: Толстых Е.И. Переход от частоты хромосомных транслокаций в Т-лимфоцитах к дозе на костный мозг в отдаленные сроки после внутреннего облучения $^{89,90}\text{Sr}$ // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 2. С. 53–63. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-53-63

Conversion from the frequency of chromosome translocations in T-lymphocytes to the bone marrow dose in the long-term period after internal $^{89,90}\text{Sr}$ exposure

Evgenia I. Tolstykh

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

Cytogenetic Fluorescence In Situ Hybridization studies, that allow assessing the frequency of stable chromosome aberrations in circulating T lymphocytes, are commonly used in retrospective dosimetry in cases of uniform whole-body exposure. In the event of $^{89,90}\text{Sr}$ exposure, interpretation of cytogenetic data is challenging, especially if blood sampling occurs long after the start of exposure. The weighted average dose to T-lymphocytes at the time of donor blood sampling in the long-term period after exposure to $^{89,90}\text{Sr}$ does not coincide with the red bone marrow dose. Previously, we developed a model that allows us to estimate the weighted average doses to T-lymphocytes upon $^{89,90}\text{Sr}$ ingress into the body of people belonging to various age groups. In this study, the modeling results were used to estimate the conversion factors from the frequency of translocations to the red bone marrow dose, which is important for assessing radiobiological effects associated with hematological diseases. The objective of our study is to estimate numerically the conversion factors (B_{rbm}) from the dose to lymphocytes to the dose to red bone marrow for various scenarios of $^{89,90}\text{Sr}$ ingestion depending on age, sex, and time after the start of exposure. The following scenarios are considered: single, uniform chronic for six months, uniform chronic for 1–5 years, non-uniform intake for 5 years (simulates the dynamics of intake in the Techa riverside settlements in 1950–1954). As a result, it has been found that the B_{rbm} values significantly depend on the age at the time of $^{89,90}\text{Sr}$ intake. The older the person is at the start of exposure, the more the cytogenetic dose differs (it is significantly lower) from the dose to the red bone marrow. We can say that the cytogenetic dose corresponds to the red bone marrow dose only in newborns and infants. This is due to the age-related dynamics of T-cell populations. Sex does not have a significant effect on B_{rbm} . The effect of the $^{89,90}\text{Sr}$ intake duration on B_{rbm} is the most pronounced for 15-year-old adolescents. For them, the difference in B_{rbm} values for a single and chronic 5-year ingress reaches 13%. Non-uniform intake of ^{90}Sr over several years does not have a significant effect on B_{rbm} and can be modelled by a uniform intake of the same duration.

Key words: T-lymphocytes, dose coefficients; $^{89,90}\text{Sr}$, internal exposure; biodosimetry.

Information on conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

The author is grateful to V.A. Krivoshchapov for technical assistance.

Information about the source of funding

The work was supported by the Federal Medical Biological Agency of Russia, state registration number of research work in EGISU 122040400135-0.

References

1. Nakayama R, Abe Y, Ting VGS, Takebayashi K, Thanh MT, Fujishima Y, et al. Cytogenetic Biodosimetry in Radiation Emergency Medicine: 4. Overview of Cytogenetic Biodosimetry. *Radiation Environment and Medicine*. 2022;11(2): 91–103 https://doi.org/10.51083/radiatenviroinmed.11.2_91
2. IAEA Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies (EPR-Biodosimetry-2011). International Atomic Energy Agency, Department of Nuclear Safety and Security, Incident and Emergency Centre, Vienna (Austria), 2011. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/025/43025992.pdf?r=1 (Accessed 19 May 2022).
3. Giussani A, Lopez MA, Romm H, Testa A, Ainsbury EA, Degteva M, et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2020; 59(3): 357–387. doi: 10.1007/s00411-020-00845-y.
4. Tolstykh EI, Degteva MO. Estimation of radiation doses on lymphocytes and their progenitors after ingestion of strontium-89,90. *Radiatsionnaya gygiyena=Radiation Hygiene*. 2022;15(3): 82–91. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-82-91>.
5. Vozilova AV, Shagina NB, Degteva MO, Moquet J, Ainsbury EA, Darroudi F. FISH analysis of translocations induced by chronic exposure to Sr radioisotopes: second set of analysis of the Techa River Cohort. *Radiation Protection Dosimetry*. 2014;159(1-4): 34–7. doi: 10.1093/rpd/ncu131. Epub 2014 Apr 17. PMID: 24743760.
6. Degteva MO, Shishkina EA, Tolstykh EI, Vozilova AV, Shagina NB, Volchkova AY, et al. Application of the EPR and FISH Methods to Dose Reconstruction for People Exposed in the Techa River Area. *Radiation biology. Radioecology*. 2017;57(1): 30–41. (English, Russian). PMID: 30698929.
7. ISO 20046. 2019. Radiological protection – Performance criteria for laboratories using Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) translocation assay for assessment of exposure to

Evgenia I. Tolstykh

Urals Research Center for Radiation Medicine

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

- ionizing radiation. Available from: <https://www.iso.org/standard/66892.html> (Accessed 27.12.2022).
8. Sigurdson AJ, Ha M, Hauptmann M, Bhatti P, Sram RJ, Beskid O, et al. International study of factors affecting human chromosome translocations. *Mutation Research*. 2008; 652(2): 112–121. doi: 10.1016/j.mrgentox.2008.01.005
 9. Goh VST, Fujishima Y, Abe Y, Sakai A, Yoshida MA, Ariyoshi K, et al. Construction of fluorescence in situ hybridization (FISH) translocation dose-response calibration curve with multiple donor data sets using R, based on ISO 20046:2019 recommendations. *International Journal of Radiation Biology*. 2019;95(12): 1668–1684. doi: 10.1080/09553002.2019.1664788.
 10. Nugis VYu, Snigiryova GP, Lomonosova EE, Kozlova M, Nikitina V. Three-color FISH method: dose-effect curves for translocations in peripheral blood lymphocyte cultures after gamma-irradiation in vitro. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020;65(5): 12–20 (In Russian). DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-5-12-20
 11. Degteva MO, Tolstykh EI, Shishkina EA, Sharagin PA, Zalyapin VI, Volchkova AY, et al. Stochastic parametric skeletal dosimetry model for humans: General approach and application to active marrow exposure from bone-seeking beta-particle emitters. *PLoS One*. 2021;16(10): e0257605. doi: 10.1371/journal.pone.0257605.
 12. Shishkina EA, Timofeev YS, Volchkova AY, Sharagin PA, Zalyapin VI, Degteva MO, et al. Trabecula: a random generator of computational phantoms for bone marrow dosimetry. *Health Physics*. 2020;118(1): 53–59. doi: 10.1097/HP.0000000000001127. PMID: 31764420.
 13. Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87–127. doi: 10.1088/0952-4746/35/1/87.
 14. Tolstykh EI, Degteva MO, Peremyslova LM, Shagina NB, Shishkina EA, Krivoshechov VA, et al. Reconstruction of long-lived radionuclide intakes for Techa riverside residents: strontium-90. *Health Physics*. 2011;101(1): 28–47. doi: 10.1097/HP.0b013e318206d0ff. PMID: 21617390.
 15. Britanova OV, Shugay M, Merzlyak EM, Staroverov DB, Putintseva EV, Turchaninova MA, et al. Dynamics of individual T-cell repertoires: from cord blood to centenarians. *Journal of Immunology*. 2016;196(12): 5005–5013. doi: 10.4049/jimmunol.1600005
 16. Naumova EN, Gorski J, and Naumov YN. Simulation studies for a multistage dynamic process of immune memory response to influenza: experiment in silico. *Annales Zoologici Fennici*. 2008;45: 369–384. DOI: 10.5735/086.045.0502
 17. Yoshida K, Cologne JB, Cordova K, Misumi M, Yamaoka M, Kyoizumi S, et al. Aging-related changes in human T-cell repertoire over 20 years delineated by deep sequencing of peripheral T-cell receptors. *Experimental Gerontology*. 2017; 1(96): 29–37. doi: 10.1016/j.exger.2017.05.015.

Received: January 15, 2024

For correspondence: Evgenia I. Tolstykh – Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Biophysics laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky str., 68a, Chelyabinsk, 454076, Russia; E-mail: evgenia@urcrm.ru)
ORCID 0000-0002-4958-3214

For citation: Tolstykh E.I. Conversion from the frequency of chromosome translocations in T-lymphocytes to the bone marrow dose in the long-term period after internal ^{89,90}Sr exposure. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 53–63. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-53-63

Совершенствование подхода к расчету стационарной радиационной защиты в кабинетах компьютерной томографии

П.С. Дружинина¹, Л.А. Чипига^{1,2,3}, В.Ю. Голиков¹, А.В. Водоватов^{1,4}, С.Ю. Бажин¹,
Е.Н. Шлеенкова¹, Г.В. Беркович³, 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

В работе проведена оценка приемлемости существующего в настоящее время подхода к расчету радиационной защиты в кабинетах компьютерной томографии и сформулированы предложения по его совершенствованию. В качестве основного параметра предлагается использовать значение произведения дозы на длину сканирования. Были оценены типичные значения рабочей нагрузки томографов в терминах произведения дозы на длину сканирования, характерные для проведения исследований в Российской Федерации. С помощью термолюминесцентных детекторов была проведена экспериментальная оценка относительного распределения поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе в кабинете компьютерной томографии. Результаты эксперимента показали, что распределение рассеянного рентгеновского излучения в центральной плоскости не изотропно. За счет ослабления излучения конструкцией гентри наблюдаются «теневые» зоны, где снижение поглощенной дозы в воздухе достигает 10–13 раз по сравнению с ее уровнем в направлении движения стола. По результатам измерений распределения поглощенной дозы в воздухе были рассчитаны относительные значения коэффициентов направленности рассеянного излучения. Рабочая нагрузка была определена для 7 томографов (1 в Санкт-Петербурге и 6 в Москве). Для каждого аппарата было оценено среднее за неделю число исследований головы и туловища и значения произведения дозы на длину сканирования при сканировании этих зон с учетом числа многофазных исследований. Полученные значения рабочей нагрузки оказались на 1–2 порядка величины выше используемых в настоящее время при расчете радиационной защиты. На основании результатов исследования и литературных данных в работе предложен новый подход к расчету радиационной защиты в КТ-кабинетах, основанный на измеряемом в ходе исследования значении произведения дозы на длину сканирования и позволяющий учесть специфику работы аппарата.

Ключевые слова: компьютерная томография, расчет радиационной защиты, коэффициент направленности рассеянного излучения, рабочая нагрузка.

Введение

Развитие лучевой диагностики в Российской Федерации в первую очередь определяется значительным увеличением числа медицинских исследований

с применением компьютерных томографов (КТ) [1]. Размещение КТ требует разработки проекта кабинета с учетом действующих полей рентгеновского излучения и обоснованием выбора необходимых средств

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

защиты для соблюдения требований радиационной безопасности¹.

При КТ-исследовании рентгеновская трубка вращается на 360° вокруг тела пациента. При этом прямой пучок рентгеновского излучения существенно ослабляется конструктивными элементами сканера [2], детекторами и гентри. Поле излучения в процедурной практически полностью обусловлено рассеянным от пациента излучением. Поэтому при разработке проекта помещения необходимо рассчитывать защиту от рассеянного излучения. Напряжение на аноде трубки 120–140 кВ обуславливает высокий уровень комптоновского рассеянного излучения. Пространственное распределение дозы рассеянного излучения четко определено и воспроизводимо, поскольку положение гентри фиксировано и рентгеновская трубка движется по одной и той же траектории для каждого сканирования. Интенсивность рассеянного излучения определяется формой и размером пучка рентгеновского излучения, а также объемом облучаемой ткани. При исследовании туловища наблюдается большая интенсивность рассеянного излучения, чем при сканировании головы, поскольку облучается больший объем ткани и применяется большой фильтр-бабочка, формирующий широкий пучок.

Расчет стационарной защиты помещений осуществляется исходя из пределов доз для разных категорий облучаемых лиц² и их потенциального времени пребывания в контакте с источником (коэффициента занятости помещения).

Действующая в Российской Федерации в настоящее время методология расчета стационарной защиты рентгеновских кабинетов, изложенная в СанПиН 2.6.1.1192-03³, устарела и не отражает реальных условий и значений физико-технических параметров проведения медицинских исследований [3]. Так, например, в отношении КТ до сих пор при расчете защиты используется значение рабочей нагрузки 400 (мА·мин)/нед., что на 1–2 порядка меньше реальных значений в настоящее время. Как было указано выше, поле излучения в КТ-кабинете определяется рассеянным компонентом излучения, однако в СанПиН 2.6.1.1192-03 (п.4.1.3) для рентгеновских аппаратов с подвижным источником излучения рекомендуется использовать коэффициент направленности $N=0,1$, определенный в том же пункте правил только для прямого излучения источника, а для рассеянного излучения ре-

комендуется использовать значение $N=0,05$. В отношении же последнего значения в работе [3] было показано, что оно на порядок величины превосходит современные оценки фракции рассеянного рентгеновского излучения.

В международной практике для расчета защиты в кабинетах КТ в качестве параметра рекомендуется использовать значение произведения дозы на длину сканирования (dose length product – DLP) [4]. Тогда значение поглощенной дозы в воздухе рассеянного компонента поля излучения в кабинете до защиты будет определяться произведением DLP и коэффициента рассеяния, определяемого экспериментально для КТ различных типов. Под коэффициентом рассеяния понимается значение поглощенной дозы в воздухе на расстоянии 1 м от изотцентра гентри, нормированное на единичное значение DLP. В работе Wallace et al. [5] были определены коэффициенты рассеяния вдоль оси движения стола при анодном напряжении рентгеновской трубки 120 кВ: 0,36 и 0,14 (мкГр·м²)/(мГр·см) при сканировании туловища и головы соответственно.

Цель исследования – оценка приемлемости используемого в настоящее время подхода к расчету радиационной защиты в кабинетах КТ и формулировка предложений по его совершенствованию с учетом параметров проведения КТ-исследований в отечественной практике.

Задачи исследования

1. Подтвердить опубликованные результаты в отношении распределения поглощенной дозы в воздухе в кабинете КТ [5] собственными результатами измерений.
2. Определить значения рабочей нагрузки томографов в терминах DLP (произведение DLP на число исследований, проводимых за неделю на томографе), характерные для проведения КТ-исследований в Российской Федерации.

Материалы и методы

Распределение поглощенной дозы в воздухе в кабинете КТ

Экспериментальная оценка относительного распределения поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе в кабинете КТ была выполнена на базе ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России на томографе Ingenuity CT, Philips, 128 срезов (Ingenuity 128).

¹ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 № 40 (ред. от 16.09.2013) «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» (вместе с «СП 2.6.1.2612-10. ОСПОРБ-99/2010. Санитарные правила и нормативы...») (Зарегистрировано в Минюсте России 11.08.2010 № 18115) [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated April 26, 2010 N 40 (as amended on September 16, 2013) "On approval of SP 2.6.1.2612-10 "Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010)" (together with "SP 2.6.1.2612-10. OSPORB-99/2010. Sanitary rules and standards..." (Approved with the Ministry of Justice of Russia on August 11, 2010 N 18115) (In Russ.)]

² Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47) [Sanitary rules and standards SanPiN 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standards NRB-99/2009" (Approved by the Chief State sanitary doctor of the Russian Federation 7.07.2009 N47 (In Russ.)];

³ СанПиН 2.6.1.1192-03. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Санитарные правила и нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 14.02.2003) [SanPiN 2.6.1193-03 "Hygienic requirements on the contents and use of the X-ray rooms, X-ray units and conduction of the X-ray examinations. Sanitary rules and norms". Approved by the Chief State sanitary doctor of the Russian Federation 14.02.2003. (In Russ.)].

Измерения распределения поглощенной дозы в воздухе в КТ-кабинете выполнялись в период с 25 февраля по 18 марта 2023 г. с помощью термолюминесцентных детекторов (ТЛД) типа ДТГ-4 (LiF: Mg, Ti) [6]. В кабинете были размещены 23 ТЛД в горизонтальной центральной плоскости на высоте 100 см от пола (рис. 1а). Центральная плоскость делила пространство кабинета на верхнюю и нижнюю полусферы. В свою очередь, центральная плоскость разделена гентри на две полуплоскости: переднюю и заднюю. В сферической системе координат центральная плоскость соответствует полярному углу $\theta = 90^\circ$ (рис. 1б). Для передней полуплоскости азимутальный угол φ соответствует значениям в диапазонах $0-90^\circ$ и $270-360^\circ$, а для задней полуплоскости – $90-270^\circ$.

Дополнительно также с помощью ТЛД проводились измерения фонового значения дозы в воздухе. Детекторы для измерения фонового значения дозы в воздухе находились в пультовой исследуемого КТ-кабинета весь период проведения эксперимента (25 февраля – 18 марта 2023 г.). Считывание показаний детекторов осуществлялось на установке «Доза-ТЛД» (Россия) [7]. Все детекторы были калиброваны в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» с использованием эталонного источника ^{137}Cs . Погрешность измерения поглощенной дозы в воздухе в поле действующего рентгеновского излучения оценивалась не более чем 30%.

При обработке результатов измерений из полученных показаний был вычтен фон, и значения были пересчитаны к расстоянию 1 м от изогентри гентри по закону обратных квадратов. На основании полученных значений поглощенных доз в воздухе были рассчитаны значения относительных коэффициентов направленности рассеянного излучения, определяемых согласно формуле (1):

$$k_{\text{рас}}(\theta = 90^\circ, \varphi) = \frac{D(\theta = 90^\circ, \varphi)}{D(\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ)} \quad (1)$$

где: $D(\theta = 90^\circ, \varphi)$ – значение поглощенной дозы в воздухе в центральной плоскости ($\theta = 90^\circ$), определяемое под углом φ ; $D(\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ)$ – значение поглощенной дозы в воздухе в передней части центральной плоскости на оси X.

Рабочая нагрузка

Для томографа Ingenuity 128 рабочая нагрузка определялась за период проведения измерений с 25 февраля по 18 марта 2023 г. Томограф работал 6 дней в неделю по 2 смены. Для каждого КТ-исследования из DICOM файлов была собрана информация в отношении следующих параметров:

- DLP за фазу КТ-исследования;
- CTDI_{vol} за фазу КТ-исследования;
- среднее значение экспозиции (мАс) за исследование.

Дополнительно были собраны данные о нагрузке на КТ-аппараты, установленные в г. Москве и работающие в разном графике:

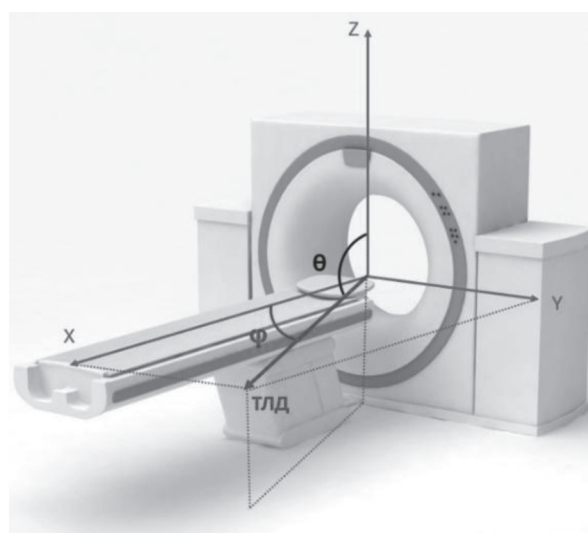
- 2 аппарата, которые работают 5 дней в неделю по 2 смены (амбулаторные поликлиники);
- 4 аппарата, которые работают 7 дней в неделю по 4 смены (стационары).

Данные о дозовых параметрах всех проводимых исследований собирали в период с 1 по 30 ноября 2023 г.

Суммарное значение рабочей нагрузки за исследованный период времени определяли как сумму параметра (DLP или мАс) за все сканирования, проведенные на аппарате за это время. Значение недельной рабочей



а



б

Рис. 1. Схема расположения ТЛД в КТ-кабинете в центральной плоскости (а) и сферическая система координат относительно томографа (б)

[Fig. 1. a) The location of the TLD in the CT room in the central plane; b) Spherical coordinate system relative to the tomograph]

нагрузки определяли делением рабочей нагрузки за исследуемый период на число исследованных дней за этот период и умножением на число рабочих дней в неделю в зависимости от сменности работы аппарата.

Обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение

Коэффициенты направленности рассеянного излучения

Значения коэффициентов направленности рассеянного излучения рассчитывались по формуле (1). Нормировочное недельное значение определено как значение поглощенной дозы за исследуемый период (3 недели), деленное на число недель $D(\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ) = 7,2$ мГр. Полученное распределение коэффициентов направленности рассеянного излучения представлено на рисунке 2. В диапазонах углов $0-180^\circ$ и $180-360^\circ$ наблюдалась осевая симметрия распределения доз относительно оси X.

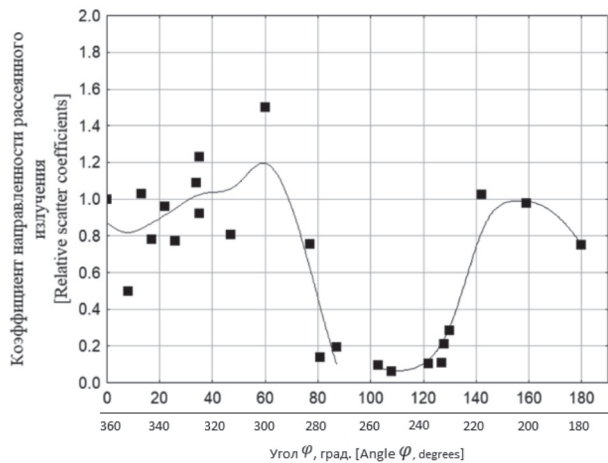


Рис. 2. Значения коэффициентов направленности рассеянного излучения $k_{\text{нап}}$ в центральной плоскости
[Fig. 2. Values of the relative scatter coefficients k_{direct} in the central plane]

Результаты показывают, что распределение излучения от томографа относительно центральной оси X не изотропно. За счет ослабления излучения конструкцией гентри наблюдается снижение доз до 10–13 раз:

- при углах $80-90^\circ$ и $270-280^\circ$ в передней центральной полуплоскости;
- при углах $90-120^\circ$ и $240-270^\circ$ в задней центральной полуплоскости.

Особенности в распределении доз в передней и задней полуплоскостях объясняются смещением оси вращения трубки в переднюю часть гентри.

Ранее в работах Martin et al., Wallace et al. [2, 5] было показано, что уровень поглощенной дозы в воздухе в направлении гентри в 10 раз ниже, чем в направлении движения стола. Таким образом, наши выводы в отношении распределения дозы рассеянного излучения в кабинете КТ совпадают с опубликованными ранее литературными данными. Учет эффекта наличия «теневых» зон имеет практическое значение при проектировании защиты, например, позволяет оптимально спланировать расположение дверей и смотровых окон в кабинет, слабыми местами которых являются границы проемов и стыки защитных элементов.

Рабочая нагрузка

Результаты оценки нагрузки КТ-аппарата Ingenuity 128, работающего 6 дней в неделю по 2 смены, представлены в таблице 1. Аналогичные результаты для КТ-аппаратов в г. Москве представлены в таблицах 2 и 3.

Полученные данные показывают, что при потоке 70 пациентов в неделю рабочая нагрузка томографа больше 15 000 (мА·мин)/нед. (см. табл. 1). При увеличении загруженности томографа до 180–380 пациентов в неделю рабочая нагрузка будет еще выше, как видно из недельных значений DLP, приведенных в таблицах 2 и 3. Значения рабочих нагрузок зависят также от структуры проводимых исследований. Проведение многофазных КТ-исследований существенно повышает рабочую нагрузку томографа. Таким образом, рекомендуемое для расчета защиты в СанПиН 2.6.1.1192-03 значение рабочей нагрузки (400 (мА·мин)/нед) занижено в 40–100 раз.

Таблица 1

Недельная рабочая нагрузка томографа Ingenuity 128

[Table 1

Weekly workload for the Ingenuity 128 scanner]

Дозиметрический фантом [Dosimetric phantom]	Количество фаз [Number of phases]	Среднее число фаз (для многофазных исследований) [Average number of phases (for multiphase studies)]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Рабочая нагрузка, (мА·мин)/нед [Workload, (mA·min)/week]
Голова (16 см) [Head (16 cm)]	Однофазные [Single-phase]	–	7	2 787	375
	Многофазные [Multiphase]	2	2	3 788	530
	Сумма [Total]		9	6 575	905
Туловище (32 см) [Body (32 cm)]	Однофазные [Single-phase]	–	34	14 740	4 350
	Многофазные [Multiphase]	3	26	37 585	10 350
	Сумма [Total]		60	52 325	14 700

Таблица 2
[Table 2]

Недельная рабочая нагрузка КТ-аппаратов в г. Москве, работающих 5 дней в неделю по 2 смены (амбулаторные поликлиники)

Weekly workload of CT scanners in Moscow, operating 5 days a week, 2 shifts (outpatient clinics)]

Дозиметрический фантом [Dosimetric phantom]	Количество фаз [Number of phases]	КТ №1 [CT №1]		КТ №2 [CT №2]		Среднее [Average]	
		Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
Голова (16 см) [Head (16 cm)]	Однофазные [Single-phase]	73	47 347	80	131 988	77	89 667
	Многофазные [Multiphase]	19	52 419	–	–	19	52 419
	Сумма [Total]	92	99 766	80	131 988	96	142 086
Туловище (32 см) [Body (32 cm)]	Однофазные [Single-phase]	48	16 773	42	15 300	45	16 036
	Многофазные [Multiphase]	95	162 178	–	–	95	162 178
	Сумма [Total]	143	178 951	42	15 300	140	178 214

Таблица 3
[Table 3]

Недельная рабочая нагрузка КТ-аппаратов в г. Москве, работающих 7 дней в неделю по 4 смены (стационары)

Weekly workload of CT scanners in Moscow, operating 7 days a week for 4 shifts (hospitals)]

Дозиметрический фантом [Dosimetric phantom]	Количество фаз [Number of phases]	КТ №1 [CT №1]		КТ №2 [CT №2]		КТ №3 [CT №3]		КТ №4 [CT №4]		Среднее [Average]	
		Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	Число исследований, шт [Number of examinations]	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
Голова (16 см) [Head (16 cm)]	Однофазные [Single-phase]	51	37 040	214	376 755	128	252 539	32	462	106	166 699
	Многофазные [Multiphase]	1	1 126	27	108 682	7	21 991	6	23 885	10	38 921
	Сумма [Total]	52	38 166	241	485 437	135	274 530	38	24 347	116	205 620
Туловище (32 см) [Body (32 cm)]	Однофазные [Single-phase]	148	66 168	373	123 675	173	66 486	144	52 863	209	77 298
	Многофазные [Multiphase]	46	89 072	55	48 599	64	55 939	71	64 300	59	64 477
	Сумма [Total]	194	155 240	428	172 274	237	122 425	215	117 163	268	141 775

Совершенствование методики

Современные зарубежные методики расчета защиты в кабинетах с КТ основаны на определении рассеянного компонента поля рентгеновского излучения внутри кабинета с использованием репрезентативных значений коэффициентов рассеяния, нормированных на измеряемое в ходе КТ-исследования значение DLP и оценку значений рабочей нагрузки томографа в терминах параметра DLP [2, 5]. Для проектирования стационарной защиты необходимо знать проектные значения DLP отдельно для сканирования головы и туловища из-за различия в коэффициентах рассеяния при сканировании этих частей тела пациента.

На основании собранных данных о рабочих нагрузках томографов (см. табл. 1–3) были оценены значения количества исследований в неделю головы и туловища (одно-сменная работа в течение 6 дней) и значения недельных рабочих нагрузок в терминах DLP при сканировании этих частей тела. Также на основании выборки, представленной в настоящей работе, было оценено соотношение однофазных и многофазных исследований – 16% и 33% при сканировании головы и туловища соответственно. При этом среднее число фаз в многофазных исследованиях составляло 2,5 и 3,4 при сканировании головы и туловища соответственно. В таблице 4 представлены значения DLP для смеси однофазных и многофазных исследований, характерной для исследованной в работе выборки, и аналогичные данные из литературы [4]. Последние представлены в 2 видах: для однофазных исследований и для смеси однофазных и многофазных исследований, доля последних в которой считается равной 40%. Видно, что значения DLP из NCRP-147 хорошо согласуются с данными, полученными в настоящей работе.

В качестве альтернативы можно использовать значения DLP для разных видов исследований, соответствующие российским национальным референтным диагностическим уровням (РДУ)⁴ [9]. Значения РДУ (все тело – 1000 мГр·см, ОГК – 500 мГр·см, ОБП – 800 мГр·см, Таз – 900 мГр·см, Голова – 1200 мГр·см) определены как 75-й перцентиль значений DLP от разных видов исследований за одну фазу, проводимых на разных КТ-аппаратах в стране. Для многофазных КТ-исследований необходимо соответствующее значение РДУ умножить на среднее число фаз в исследовании.

Для определения поглощенной дозы в воздухе на основании значений DLP могут использоваться коэффициенты рассеяния, которые определены в технической документации томографа отдельно для 16 см дозиметрического фантома и 32 см дозиметрического фантома для зон с наибольшей долей рассеянного излучения (вдоль оси движения стола), что будет обеспечивать необходимую консервативность. При отсутствии таких данных могут использоваться усредненные значения, независимо от типа томографа [2, 5]:

⁴ МУК 2.6.7.3652-20. Методы контроля в КТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты. Методические указания. 2020. 40 с. [МУК 2.6.7.3652-20. Control methods in CT diagnostics to optimize radiation protection. Methodical instructions. 2020. 40 p. (In Russ.)]

⁵ В области средних энергий спектра 70–100 кэВ, характерных для рентгеновского излучения с напряжением на трубке томографа 120–140 кВ, прошедшего через защитный барьер, отношение кермы в воздухе к эффективной дозе для передне-задней (AP) и ротационной (ROT) геометрий облучения составляет ~0,7 Зв/Гр и ~1 Зв/Гр соответственно. Учитывая, что для фотонного излучения $w_R=1$, можно говорить о том, что использование численных значений ПД в терминах эффективной дозы будет обеспечивать консервативную оценку коэффициента ослабления.

$S_{КТ, голова} = 0,14$ (мкГр·м²)/(мГр·см) при сканировании зоны головы;

$S_{КТ, тул} = 0,36$ (мкГр·м²)/(мГр·см) при сканировании зоны туловища.

Таблица 4

Значения DLP и количества исследований в неделю (односменная работа в течение 6 дней)

[Table 4]

Values DLP and number of examinations per week (single shift work for 6 days)]

Область исследования [Scan area]	Настоящая работа [Current study]		NCRP-147 [4] [NCRP-147 [4]]
	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]	N, шт/нед.	DLP, мГр·см [DLP, mGy·cm]
Голова [Head]			
Однофазное [Single-phase]	1190	36	1200
Многофазное [Multiphase]	2890	7	
Смешанное [Mixed]	1470 (84%+16%)	43	1680 (60%+40%)
Туловище [Body]			
Однофазное [Single-phase]	380	50	550
Многофазное [Multiphase]	1290	25	
Смешанное [Mixed]	680 (67%+33%)	75	770 (60%+40%)

Таким образом, при расчете необходимой кратности ослабления поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе ($K_{осл}$) защитным барьером можно использовать следующее выражение:

$$K_{осл} = \frac{[(S_{КТ, тул} \cdot DLP_{тул} \cdot N_{тул}^{нед} \cdot 50) + (S_{КТ, гол} \cdot DLP_{гол} \cdot N_{гол}^{нед} \cdot 50)]}{r^2} \cdot \frac{T \cdot n}{ПД} \quad (2)$$

$S_{КТ, тул}$, $S_{КТ, голова}$ (мкГр·м²)/(мГр·см) – значения коэффициентов рассеяния при сканировании туловища и головы соответственно;

$DLP_{тул}$, $DLP_{гол}$, мГр·см – значения DLP за исследование при сканировании зон туловища и головы соответственно;

$N_{тул}$ и $N_{гол}$ – недельное число исследований туловища и головы соответственно (для одной смены работы кабинета КТ);

50 – количество недель в году;

ПД⁵, мкЗв – значение предела эффективной дозы для рассматриваемой группы облучаемых лиц;

T – коэффициент занятости помещения при одно-сменной работе томографа;

n – коэффициент сменности, увеличивающий коэффициент занятости помещения для некоторых групп облучаемых лиц из-за многосменной работы томографа;

r, m – расстояние от изоцентра томографа до точки расчета.

Дополнительно при проектировании относительно-го расположения в кабинете томографа с гентри и элементов конструкций с ослабленными защитными свойствами можно использовать информацию о наличии «теневых» зон за счет ослабления излучения гентри. Предпочтительно планировать расположение воздуховодов/дверей в зонах с наименьшим коэффициентом направленности.

Рассчитаем в качестве примера в соответствии с этим новым подходом необходимые коэффициенты ослабления для защиты помещения смежного по горизонтали с КТ-кабинетом, где постоянно в течение рабочего дня находятся следующие категории облучаемых лиц:

– лица из населения ($ПД = 1$ мЗв/год, $T=1$, $n=1$), например, медицинские работники, не отнесенные к какой-либо группе персонала;

– персонал группы А ($ПД = 20$ мЗв/год, $T=1$, $n=1$).

КТ-исследования проводятся на томографе с напряжением на трубке 120 кВ, недельными значениями $DLP_{\text{тул}} = 680$ мГр·см и $DLP_{\text{гол}} = 1470$ мГр·см и количеством исследований $N_{\text{тул}} = 50$ и $N_{\text{гол}} = 35$. Расстояние от изоцентра томографа до точки расчета примем равным 3 м. Тогда необходимые значения коэффициентов ослабления для двух вышеуказанных категорий облучаемых лиц, рассчитанные по формуле (2), будут следующими: 5,0 для персонала категории А и 100 для лиц из населения. Аналогичные значения коэффициентов ослабления для этих категорий облучаемых лиц, рассчитанные согласно СанПиН 2.6.1.1192-03 с параметрами: $R(120\text{кВ})=13$ мГр·м²/(мА·мин); $W=400$ (мА·мин)/нед; $N=0,05$, будут следующими – 74 для персонала категории А и 3200 для лиц из населения. А если учесть реальные рабочие нагрузки КТ, приведенные в настоящей работе, то используя, например, $W=20000$ (мА·мин)/нед., получим значения коэффициентов ослабления 3700 и 160 000 для персонала категории А и для лиц из населения соответственно. В таблице 5 приведены значения

толщин барьеров из бетона, соответствующих этим ситуациям облучения.

Заключение

Действующий подход к расчету радиационной защиты не учитывает современные условия работы КТ-кабинетов (число, структуру и параметры сканирований). До сих пор используемое при расчете стационарной защиты значение рабочей нагрузки томографа 400 (мА·мин)/нед. на 1–2 порядка меньше реальных значений в настоящее время. Помимо этого, существующий в настоящее время подход по расчету стационарной защиты не в полной мере учитывает поле рассеянного излучения в кабинете КТ.

На основании результатов исследования и анализа литературы в работе предложен новый подход к расчету радиационной защиты в кабинетах с КТ, основанный на характеристиках поля рассеянного излучения и рабочей нагрузки томографа, выражаемой в терминах DLP. Такой подход позволит гармонизировать отечественную методологию расчета стационарной радиационной защиты в КТ-кабинетах с общепризнанной в мировой практике. Показано, что использование нового подхода позволяет оптимизировать расходы, существенно сократив толщину необходимой стационарной защиты при сохранении необходимых условий радиационной безопасности.

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 журнале.

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 журнале.

Голиков В.Ю. – разработка дизайна исследования, определение целей и задач исследования, обработка данных, написание статьи, оформление окончательного варианта статьи для публикации в журнале.

Водоватов А.В. – обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы, редакция промежуточного варианта статьи.

Таблица 5

[Table 5]

Толщина защиты из бетона, мм						
Thickness of concrete shielding, mm]						
Группа облучаемых лиц [Group of exposed persons]	Предлагаемый подход [Suggested approach]		СанПиН 2.6.1.1192-03 [SanPiN 2.6.1.1192-03]			
	Кратность ослабления [Attenuation ratio]	Толщина бетона, мм [Concrete thickness, mm]	W=400 (мА·мин)/нед [W=400 (mA·min)/week]		W=2·10 ⁴ (мА·мин)/нед [W=2·10 ⁴ (mA·min)/week]	
			Кратность ослабления [Attenuation ratio]	Толщина бетона, мм [Concrete thickness, mm]	Кратность ослабления [Attenuation ratio]	Толщина бетона, мм [Concrete thickness, mm]
Персонал группы А [Group A]	5	34	74	100	3700	200
Население [Population]	100	108	3200	200	160000	300

Бажин С.Ю. – обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы, редактирование текста статьи.

Шлеенкова Е.Н. – обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы, редактирование текста статьи.

Беркович Г.В. – организация проведения эксперимента, обработка данных, обсуждение и анализ результатов работы.

Солдатов И.В. – предоставление необходимой информации для исследования по рабочей нагрузке КТ-аппаратов, редакция промежуточного варианта статьи.

Лантух З.А. – предоставление необходимой информации для исследования по рабочей нагрузке КТ-аппаратов, редакция промежуточного варианта статьи.

Толкачев К.В. – предоставление необходимой информации для исследования по рабочей нагрузке КТ-аппаратов, редакция промежуточного варианта статьи.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Дружинина П.С., Романович И.К., Водоватов А.В. и др. Тенденции развития компьютерной томографии в Российской Федерации в 2011–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 101–117. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-3-101-117>.
2. Martin C.J. Radiation shielding for diagnostic radiology // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 165, No 1-4. P. 376–81. doi: 10.1093/rpd/ncv040. Epub 2015 Mar 25. PMID: 25813477.
3. Голиков В.Ю. Критический анализ существующего подхода к расчету стационарной защиты в рентгеновских кабинетах // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 13–21. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-13-21
4. NCRP. Report No. 147. Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. 2004. 194 p.
5. Wallace H., Martin C.J., Sutton D.G. et al. Establishment of scatter factors for use in shielding calculations and risk assessment for computed tomography facilities // Journal of Radiological Protection. 2012. Vol. 32, No 1. P. 39–50. doi: 10.1088/0952-4746/32/1/39. Epub 2012 Feb 10. PMID: 22327169.
6. Шлеенкова Е.Н. Экспериментальное исследование характеристик индивидуальных термолюминесцентных дозиметров для измерения эквивалентных доз в коже и хрусталике глаза // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, №4. С. 143–156.
7. Research and production enterprise “DOZA”. Dosimetric thermo-luminescent complex “DOZA-TLD”. Operating manual FVKM.412118.010RE. – 49 p. URL: https://atom-snab.kz/wp-content/uploads/2020/07/tld_new.pdf (Дата обращения: 20.03.2024).
8. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J. et al. Array programming with NumPy // Nature. 2020. Vol. 585. P. 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
9. Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжов С.А. и др. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 1. С. 17–33. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33>.
10. Sutton D.G., Martin C.J., Williams J.R., Peet D.J. Radiation Shielding for Diagnostic Radiology. British Institute of Radiology, 2012. 139 p.
11. Sutton D.G., Martin C.J., Peet D., Williams J.R. The characterization and transmission of scattered radiation resulting from x-ray beams filtered with zero to 0.99 mm copper // Journal of Radiological Protection. 2012. Vol. 32, No 2. P. 117–29. doi: 10.1088/0952-4746/32/2/117. Epub 2012 May 3. PMID: 22555158.
12. Martin C.J., Sutton D.G., Magee J. et al. Derivation of factors for estimating the scatter of diagnostic x-rays from walls and ceiling slabs // Journal of Radiological Protection. 2012. Vol. 32, No 4. P. 373–96 p. doi: 10.1088/0952-4746/32/4/373. Epub 2012 Sep 24. PMID: 23006642.
13. Martin C.J., Sutton D.G. Practical Radiation Protection in Healthcare. Second edition, 2015. 536 p.
14. Cole J.A., Platten D.J. A comparison of shielding calculation methods for multi-slice computed tomography (CT) systems // Journal of Radiological Protection. 2008. Vol. 28, No 4. P. 511–23. doi: 10.1088/0952-4746/28/4/005. Epub 2008 Nov 24. PMID: 19029585.
15. Ciraj-Bjelac O., Arandjic D., Kosutic D. Comparison of different methods for shielding design in computed tomography // Radiation Protection Dosimetry. 2011. Vol. 147, No 1-2. P. 133–6. doi: 10.1093/rpd/ncr287. Epub 2011 Jul 9. PMID: 21743070.
16. Hiroshi W., Takuma U., Yoshinori Sh., Takurou H. Verification study to improve the Japanese-DLP calculation method for shielding in the X-ray CT room // Japanese Journal of Health Physics. 2022. Vol. 57, No 2. P. 87–92.
17. Verdun F.R., Aroua A., Trueb P.R., Bochud F.O. Use of DLP for establishing the shielding of multidetector computed tomography rooms. 2010. 8 p. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/006/41006643.pdf.

Поступила: 12.03.2024 г.

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 <https://orcid.org/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 <https://orcid.org/0000-0001-9153-3061>

Голиков Владислав Юрьевич – старший 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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-5494-2300>

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 <https://orcid.org/0000-0002-5191-7535>

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1778-4334>

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, Санкт-Петербург, Россия

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

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7077-7320>

Солдатов Илья Владимирович – начальник испытательной лаборатории, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

ORCID <https://orcid.org/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 <https://orcid.org/0000-0001-8871-8700>

Для цитирования: Дружинина П.С., Чипига Л.А., Голиков В.Ю., Водоватов А.В., Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Беркович Г.В., Солдатов И.В., Лантух З.А., Толкачев К.В. Совершенствование подхода к расчету стационарной радиационной защиты в кабинетах компьютерной томографии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 64–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-64-75

Improving the approach to calculating shielding in computed tomography rooms

Polina S. Druzhinina¹, Larisa A. Chipiga^{1,2,3}, Vladislav Yu. Golikov¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,4}, Stepan Yu. Bazhin¹, Ekaterina N. Shleenkova¹, Gleb V. Berkovich³, Ilya V. Soldatov⁵, Zoya A. Lantukh⁵, Kirill V. Tolkachev⁵

¹Saint-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

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

³V. Almazov National Medical Research Center, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

⁴Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

⁵Research and Practical Clinical Centre of Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

The study assessed the acceptability of the currently existing approach to calculating shielding in computed tomography rooms and formulated proposals for its improvement, taking into account the parameters of research in domestic medical practice. It is proposed to use the dose-length product as the main measured parameter in the new approach to calculating shielding. Typical tomograph workload values of dose-length product, typical for examinations in the Russian Federation, were assessed. Using thermoluminescent detectors, the experimental assessment of the distribution of absorbed dose in the air in a computed tomography room was carried out. The experimental results showed that the distribution of X-ray exposure in the central plane is not isotropic. Due to the attenuation of exposure by the gantry design, "shadow" zones are observed, where the absorbed dose reduction in the air reaches 10-13 times compared to its level in the direction of couch movement. Based on the results of measurements of the distribution of absorbed dose in air, the relative scatter coefficients were calculated. The workload was determined for 7 tomographs (1 in St. Petersburg and 6 in Moscow). For each tomograph, the average weekly number of head and body examinations and the values of dose-length product for these areas were assessed, taking into account the number of multiphase examinations. The obtained workload values turned out to be one or two orders of magnitude higher than those currently used in calculating shielding. Based on the results of the study and literature data, the work proposes a new approach to calculating shielding in computed tomography rooms, based on the value of measured dose-length product during the examination and allowing to take into account the specifics of the operation of the device.

Key words: *computed tomography, shielding calculation, relative scatter coefficients, workload.*

Personal contribution of authors

Druzhinina P.S. – data processing, wrote the manuscript, arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Chipiga L.A. – developed the design of the survey, provided general scientific management of the project, data processing, wrote the manuscript.

Golikov V.Yu. – defined the goals and objectives, data processing, wrote the manuscript.

Vodovатов A.V. – data processing, discussion and analysis of the results, editing of the article.

Bazhin S.Yu. – data processing, discussion and analysis of the results, editing of the article.

Shleenkova E.N. – data processing, discussion and analysis of the results, editing of the article.

Berkovich G.V. – organization of the experiment, discussion and analysis of the results.

Soldatov IV. – providing the necessary information for research on the workload of CT-devices, editing an interim version of the article.

Lantukh Z.A. – providing the necessary information for research on the workload of CT-devices, editing an interim version of the article.

Tolkachev K.V. – providing the necessary information for research on the workload of CT-devices, editing an interim version of the article.

Conflict of interest

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

References

1. Druzhinina PS, Romanovich IK, Vodovатов AV, Chipiga LA, Akhmatdinov RR, Bratilova AA, et al. Trends in the develop-

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

- ment of computed tomography in the Russian Federation in 2011–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 101–117. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-3-101-117>.
2. Martin CJ. Radiation shielding for diagnostic radiology. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;165(1-4): 376–81. doi: 10.1093/rpd/ncv040. Epub 2015 Mar 25. PMID: 25813477.
 3. Golikov VYu. Critical analysis of the existing approach to the calculation of radiation shielding in X-ray rooms. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 13–21. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-3-13-21>.
 4. NCRP. Report No. 147 – Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities. 2004. 194 p.
 5. Wallace H, Martin CJ, Sutton DG, Peet D, Williams JR. Establishment of scatter factors for use in shielding calculations and risk assessment for computed tomography facilities. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32(1): 39–50. doi: 10.1088/0952-4746/32/1/39. Epub 2012 Feb 10. PMID: 22327169.
 6. Sheleenkova EN. Experimental study of individual thermoluminescent dosimeters performances for measuring the dose equivalents in skin and eye lens. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 143–156. (In Russian).
 7. Research and production enterprise “DOZA”. Dosimetric thermo-luminescent complex “DOZA-TLD”. Operating manual FVKM.412118.010RE. 2018. 49 p. Available from: https://atomsnab.kz/wp-content/uploads/2020/07/tld_new.pdf (Accessed: 20.03.2024).
 8. Harris CR, Millman KJ, van der Walt SJ, Gommers R, Virtanen P, Cournapeau D, et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020;585: 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
 9. Druzhinina PS, Chipiga LA, Ryzhov SA, Vodovatov AV, Berkovich GV, Smirnov AV, et al. Proposals for the Russian quality assurance program in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 17–33. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33>
 10. Sutton DG, Martin CJ, Williams JR, Peet DJ. Radiation Shielding for Diagnostic Radiology. British Institute of Radiology, 2012. 139 p.
 11. Sutton DG, Martin CJ, Peet D, Williams JR. The characterization and transmission of scattered radiation resulting from x-ray beams filtered with zero to 0.99 mm copper. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32(2): 117–29. doi: 10.1088/0952-4746/32/2/117. Epub 2012 May 3. PMID: 22555158.
 12. Martin CJ, Sutton DG, Magee J, McVey S, Williams JR, Peet D. Derivation of factors for estimating the scatter of diagnostic x-rays from walls and ceiling slabs. *Journal of Radiological Protection*. 2012;32(4): 373–96. doi: 10.1088/0952-4746/32/4/373. Epub 2012 Sep 24. PMID: 23006642.
 13. Martin CJ, Sutton DG. Practical Radiation Protection in Healthcare. Second edition; 2015. 536 p.
 14. Cole JA, Platten DJ. A comparison of shielding calculation methods for multi-slice computed tomography (CT) systems. *Journal of Radiological Protection*. 2008;28(4): 511–23. doi: 10.1088/0952-4746/28/4/005. Epub 2008 Nov 24. PMID: 19029585.
 15. Ciraj-Bjelac O, Arandjic D, Kosutic D. Comparison of different methods for shielding design in computed tomography. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011;147(1-2): 133–6. doi: 10.1093/rpd/ncr287. Epub 2011 Jul 9. PMID: 21743070.
 16. Hiroshi W, Takuma U, Yoshinori Sh, Takuro H. Verification study to improve the Japanese-DLP calculation method for shielding in the X-ray CT room. *Japanese Journal of Health Physics*. 2022;57(2): 87–92.
 17. Verdun FR, Aroua A, Trueb PR, Bochud FO. Use of DLP for establishing the shielding of multidetector computed tomography rooms. 2010. 8 p. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/006/41006643.pdf.

Received: March 12, 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 <https://orcid.org/0000-0003-2921-067X>

Larisa A. Chipiga – Ph.D., 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 <https://orcid.org/0000-0001-9153-3061>

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

ORCID <https://orcid.org/0009-0003-5494-2300>

Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5191-7535>

Stepan Yu. Bazhin – Head of radiation control laboratory – 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 <https://orcid.org/0000-0003-1778-4334>

Ekaterina N. Shleenkova – Junior Researcher, 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

Gleb V. Berkovich – Head of the Computed Tomography department, V. Almazov National Medical Research Center, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7077-7320>

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 <https://orcid.org/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 <https://orcid.org/0000-0001-8871-8700>

For citation: Druzhinina P.S., Chipiga L.A., Golikov V.Yu., Vodovатов A.V., Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Berkovich G.V., Soldatov I.V., Lantukh Z.A., Tolkachev K.V. Improving the approach to calculating shielding in computed tomography rooms. *Radiatsionnaya Gygiena* = *Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 64–75. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-64-75

Консервативная оценка доз внешнего облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии

С.Ю. Бажин, Е.Н. Шлеенкова, 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

В статье предложен новый подход к оценке эффективных доз дефектоскопистов, выполняющих дефектоскопию с использованием переносных радионуклидных дефектоскопов (гамма-дефектоскопов). Существующий подход по оценке эффективных доз, опирающийся на использование одного индивидуального дозиметра, размещаемого на рабочей одежде в области груди, является неадекватным для реальных рабочих условий облучения дефектоскопистов. Гамма-дефектоскопы содержат в своей головке закрытый техногенный источник ионизирующего излучения, поэтому даже в нерабочем положении такие дефектоскопы представляют радиационную опасность. При транспортировке и подготовке гамма-дефектоскопов к работе дефектоскопист находится в непосредственной близости к источнику излучения. Изменяющаяся в течение технологического цикла геометрия облучения при работе с использованием переносных гамма-дефектоскопов на определенных этапах создает резко неравномерное облучение тела дефектоскописта. Поэтому после оценки этапов технологического цикла был предложен вариант более консервативной оценки эффективных доз – изменить место расположения индивидуального дозиметра на рабочей одежде дефектоскописта, переместив индивидуальный дозиметр в область живота. Было выполнено анонимное исследование с участием 15 дефектоскопистов, на их рабочей одежде экспонировались по три индивидуальных дозиметра: два из них экспериментальные и размещались в области груди и живота; третий – контрольный дозиметр, экспонировался в течение квартала на груди в рамках постоянного индивидуального дозиметрического контроля. При контролируемых анонимных измерениях среднее значение эффективной дозы, оценённое по показаниям дозиметров, экспонируемых в области груди, было равно 0,95 мЗв (медиана – 0,92 мЗв, максимальное значение – 1,27 мЗв). Эти значения сравнивались со значениями, полученными с помощью дозиметров, которые экспонировались в области живота, и различия оказались существенны (среднее значение эффективной дозы было равно 1,24 мЗв (медиана – 1,22 мЗв, максимальное значение – 1,78 мЗв).

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, эффективная доза, индивидуальный эквивалент дозы, гамма-дефектоскоп.

Введение

При организации и проведении индивидуального дозиметрического контроля персонала (далее – ИДК) основной задачей является получение достоверной информации для оценки уровня внешнего облучения специалистов в величинах, которыми выражены основные дозовые пределы. Эти оцениваемые нормируемые величины, необходимые при принятии мер по обеспечению радиационной без-

опасности и защиты¹, невозможно измерить на практике [1, 2], поэтому для их определения используют операционные величины [3–7]. В условиях хронического облучения в малых дозах основной нормируемой величиной является эффективная доза (далее – ЭД), которой соответствует операционная величина – индивидуальный эквивалент дозы $H_p(10)$. Измерение индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ осуществляется при помощи индивидуальных

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 14.08.2009, 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 on 07.07.2009 №. 47. Registered with the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration №. 14534. (In Russ.)]

Бажин Степан Юрьевич

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

дозиметров, экспонируемых на рабочей одежде персонала. В настоящее время при проведении ИДК дефектоскопистов (персонал группы А) для измерения $H_p(10)$ и оценки ЭД используется один индивидуальный термолюминесцентный дозиметр, расположенный в области груди. При условиях, когда облучение тела происходит преимущественно спереди или облучение всего тела равномерно, такое расположение индивидуального дозиметра оправдано. Однако в условиях неравномерного облучения, свойственного большому перечню работ с источниками ионизирующего излучения (далее – ИИИ), такое расположение индивидуального дозиметра может быть неадекватным для дальнейшей оценки ЭД, причём измеренные значения могут быть как выше, так и ниже реальной величины ЭД. Поэтому интерпретация результатов измерения $H_p(10)$ при оценке ЭД должна учитывать дополнительные факторы: поле излучения, энергетический спектр, геометрию облучения. Так как в Российской Федерации предпочтительным методом ИДК является термолюминесцентная дозиметрия, обеспечивающая достоверность и стабильность показаний в широком диапазоне энергий, то решающую роль в адекватности оценки ЭД занимает место расположения индивидуального дозиметра на рабочей одежде работника.

Работы с использованием переносных гамма-дефектоскопов характеризуются изменчивыми условиями облучения персонала – расстояние и расположение ИИИ относительно тела во время всего цикла работы резко меняются. Таким образом, во время выполнения разных этапов дефектоскопических работ облучаются разные области тела. В технологическом цикле гамма-дефектоскопических работ можно выделить следующие дозобразующие этапы:

1. Транспортировка гамма-дефектоскопа к месту проведения работ. ИИИ расположен в радиационной головке дефектоскопа и при доставке переносного радионуклидного дефектоскопа вручную находится на уровне бёдер работника сбоку.

2. Подготовка гамма-дефектоскопа к работе. ИИИ расположен в радиационной головке дефектоскопа и находится на уровне живота работника спереди.

3. Просвечивание изделия. Перемещение работника к пульту управления, выведение ИИИ в рабочее положение и возврат в положение хранения.

В последние годы в Российской Федерации наблюдается увеличение специалистов, занимающихся дефектоскопией. В 2022 г. в отчётных формах представлено 9887 специалистов с профессией/должностью «дефектоскопист рентгено-гаммаграфирования» (для сравнения в 2015 г. таких специалистов было 8105 человек) [8–15].

Дефектоскописты вносят в структуру средних годовых эффективных доз существенный вклад. Наибольшие максимальные годовые эффективные дозы чаще всего характерны именно для данной специальности. Так,

в 2021 и в 2022 гг. в Российской Федерации было выявлено 2 случая превышения предела годовой эффективной дозы (50 мЗв) именно дефектоскопистами [14, 15]. В Российской Федерации нет нормативно-методического документа, устанавливающего требования или дающего рекомендации по организации и проведению ИДК для дефектоскопистов. Лицам, ответственным за радиационную безопасность при проведении дефектоскопических работ, приходится использовать действующие МУ 2.6.1.3015–12 «Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций»². Таким образом, проведение ИДК дефектоскопистов осуществляется без учёта специфики их работы.

Радионуклидные дефектоскопы (гамма-дефектоскопы) представляют радиационную опасность не только при непосредственном проведении просвечивания объекта неразрушающего контроля, но и при транспортировке и хранении дефектоскопов. Мощность амбиентного эквивалента дозы на расстоянии 1 м от гамма-дефектоскопа при нахождении источника в защитном блоке может быть до 20 мкЗв/ч³, поэтому при транспортировке и подготовке дефектоскопа к работе экранированный источник располагается близко к телу работника, обеспечивая резко неравномерное облучение тела. На этапах транспортировки и подготовки гамма-дефектоскопа велика вероятность недооценки ЭД по результатам ИДК, при размещении индивидуального дозиметра на груди дефектоскописта.

Цель исследования – предложение и обоснование иного места расположения индивидуального дозиметра на рабочей одежде дефектоскопистов для обеспечения достаточной консервативности при оценке эффективных доз.

Материалы и методы

При проведении настоящего исследования для оценки ЭД были использованы результаты собственных измерений индивидуальных эквивалентов доз $H_p(10)$ облучения персонала, занимающегося радионуклидной дефектоскопией с использованием переносных гамма-дефектоскопов. Измерения проводились по утверждённой методике выполнения измерений индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения $H_p(10)$ методом термолюминесцентной дозиметрии. В реальных рабочих условиях были экспонированы индивидуальные дозиметры типа DTU-1, содержащие по 2 детектора ДТГ-4 (LiF, Mg, Ti). Считывание показаний производилось на термолюминесцентной дозиметрической установке Harshaw-2000D (США). Основная погрешность результатов измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ фотонного излучения в диапазоне от 0,05 до 100 мЗв не превышает пределов $\pm 20\%$ (при $p=0,95$). Коэффициент перехода от значений $H_p(10)$ к ЭД, в соответствии с действующими МУ 2.6.1.3015–12, был равен 1.

² МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Радиационная гигиена. 2012;5(3):77-86. [Methodical guidelines 2.6.1.3015-12. "Organization and management of individual dosimetry of medical staff". Radiation Hygiene. 2012;5(3):77-86. (In Russ.)]

³ СП 2.6.1.3241-14 "Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при радионуклидной дефектоскопии" [SP 2.6.1.3241-14 "Hygienic requirements for ensuring radiation safety during radionuclide flaw detection" (In Russ.)]

Результаты измерений были обработаны с использованием программного обеспечения Statistica 10.

В работу были включены 15 дефектоскопистов, выполняющих дефектоскопию с использованием переносных гамма-дефектоскопов. Их технологический цикл работы включает различные дозобразующие операции при различной геометрии облучения: транспортировка, сборка, подготовка к работе, просвечивание объекта с безопасного расстояния. Среди описанных этапов только на последнем этапе дефектоскописты находились на достаточном расстоянии от дефектоскопа, а облучение работников можно считать практически равномерным, в остальных случаях облучение резко неравномерное при нахождении источника на уровне бёдер и живота. Поэтому при существующем подходе к организации контроля велика вероятность недооценки ЭД с помощью одного индивидуального дозиметра, расположенного на уровне груди. В качестве демонстрации такой модели облучения было выполнено исследование для группы дефектоскопистов, работающих исключительно с переносными радионуклидными дефектоскопами в период с 14 августа по 8 сентября 2023 г. Работа была организована вахтовым методом без выходных. Были использованы гамма-дефектоскопы «Гаммарид-192/120» с закрытыми радионуклидными источниками типа ГИ192М58 (на основе иридия-192). Все источники были из одной партии: изготовлены в один день, активность на дату начала эксперимента 1,82–1,76 ТБк, на дату окончания эксперимента 1,45–1,40 ТБк. Внешний вид и схема строения радиационной головки дефектоскопа представлены на рисунках 1–3 (схема адаптирована из технического описания и инструкции по эксплуатации дефектоскопа⁴). Масса радиационной головки равна 16 кг, максимальное расстояние от радиационной головки до пульта управления (ручного привода) – 20 м. Условный сценарий работы дефектоскопистов был следующим: в составе бригады два дефектоскописта (реже встречаются бригады численностью 5–6 человек). За одну рабочую смену производится проверка около 20 сварных стыков, на каждый стык



Рис. 1. Внешний вид радиационной головки гамма-дефектоскопа «Гаммарид-192/120» с подключенными коллиматором и гибким шлангом пульта управления

[Fig. 1. External view of the radiation head of the Gammarid-192/120 gamma flaw detector with a connected collimator and a flexible hose of the Remote Control]

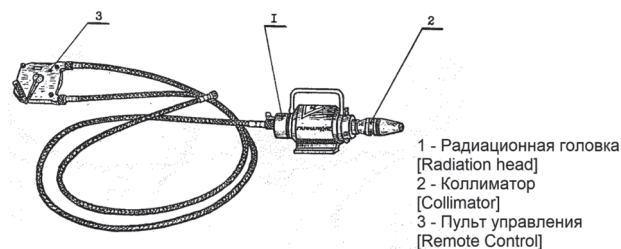


Рис. 2. Схема рабочего комплекта гамма-дефектоскопа «Гаммарид-192/120» (схема адаптирована из технического описания и инструкции по эксплуатации дефектоскопа)

[Fig. 2. Diagram of the working kit of a gamma flaw detector "Gammarid-192/120" (The diagram is adapted from the technical description and operating instructions for the flaw detector)]

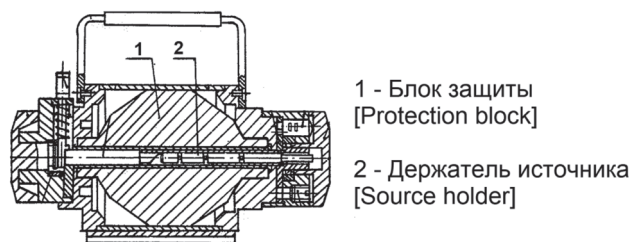


Рис. 3. Схема строения радиационной головки гамма-дефектоскопа «Гаммарид-192/120» (схема адаптирована из технического описания и инструкции по эксплуатации дефектоскопа)

[Fig. 3. Structure diagram of the radiation head of the gamma flaw detector "Gammarid-192/120" (The diagram is adapted from the technical description and operating instructions for the flaw detector)]

делается от 2 до 5 снимков в разных проекциях. Время каждой экспозиции в зависимости от толщины труб составляет от 10 до 50 с.

Каждый дефектоскопист размещал на своей рабочей одежде одновременно по 3 индивидуальных дозиметра. Первый индивидуальный дозиметр был использован в рамках проведения постоянного ИДК и экспонировался в области груди в течение всего 3 квартала 2023 г. Два других были экспериментальными и экспонировались в течение 26 дней: один дозиметр был размещён в области груди, другой – в области живота (далее – экспериментальные дозиметры). На каждого принимающего участие в исследовании дефектоскописта была заведена анкета, где фиксировалось количество экспозиций и время просвечивания объекта дефектоскопом в секундах.

Результаты и обсуждение

На подготовительном этапе работы были выявлены случаи неиспользования (неношения) дефектоскопистами индивидуальных дозиметров при проведении дефектоскопических работ с использованием переносных дефектоскопов, когда из 5 контролируемых организаций только в одной показания индивидуальных дозиметров дефектоскопистов отличались от измеренных фоновых

⁴ Техническое описание и инструкция по эксплуатации «Гамма-дефектоскоп типа «ГАММАРИД-192» 1.570.000 ТО, СССР, 1988 г. [Technical description and operating instructions "Gamma flaw detector type "GAMMARID-192" 1,570,000 TO, USSR, 1988. (In Russ.)]

значений [16]. Поэтому следующий этап работы проводился в анонимных условиях для минимизации подобных случаев пренебрежения использованием индивидуальных дозиметров. Целесообразность данного решения подтверждают полученные значения, достоверно отличающиеся от фоновых.

На первом этапе были проанализированы анкеты дефектоскопистов и оценены результаты производственного радиационного контроля, выполненного аккредитованной лабораторией. Мощность амбиентного эквивалента дозы на расстоянии 20 м составила 15 мкЗв/ч. Расчётным способом было получено максимальное значение эффективной дозы для каждого работника. Эти значения были сравнены со значениями ЭД, оценёнными по результатам измерения экспериментальных индивидуальных дозиметров, размещённых в области груди. Все значения сведены в таблице 1.

Во всех наблюдаемых случаях значения ЭД, полученные посредством измерений $H_p(10)$ с помощью экспериментальных индивидуальных дозиметров, превышают значения ЭД, оценённые по результатам производственного радиационного контроля на рабочих местах (в 20 м от гамма-дефектоскопа), в 2–3 раза. Данное различие свидетельствует в пользу того, что дефектоскописты подвергаются воздействию внешнего облучения не только на этапе просвечивания объекта, но и в процессе транспортировки и подготовки гамма-дефектоскопа к работе.

Как было указано выше, на этапе транспортировки и подготовки гамма-дефектоскопа к работе дефектоскопист находится в непосредственной близости к ИИИ, причём облучение тела на этих этапах резко неравномерно. Поэтому сравнение показаний индивидуальных дозиметров, размещённых в области груди и в области живота, представляет практический интерес. На рисунках 4–7 представлены распределения значений, полученных с использованием 3 комплектов дозиметров дефектоскопистов.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты измерений экспериментальных дозиметров. В качестве дополнения на рисунке 6 приведены результаты квартальных измерений (3-й квартал 2023 г.), выполненные в рамках постоянного ИДК этих дефектоскопистов. При контролируемых анонимных измерениях среднее значение ЭД было равно 0,95 мЗв (медиана – 0,92 мЗв, максимальное значение – 1,27 мЗв), при квартальных измерениях среднее значение ЭД равно 1,60 мЗв (медиана – 1,56 мЗв, максимальное значение – 2,01 мЗв). Учитывая вахтовый метод работы дефектоскопистов, квартальные показания хорошо согласуются с показаниями дозиметров, размещённых в области груди. Однако при сравнении со значениями, полученными с помощью дозиметров, которые экспонировались в области живота, различия существенны (среднее значение ЭД было равно 1,24 мЗв (медиана – 1,22 мЗв, максимальное значение – 1,78 мЗв).

Таблица 1

Оценка эффективных доз дефектоскопистов по результатам производственного радиационного контроля и индивидуального дозиметрического контроля

[Table 1

Estimation of effective doses of flaw detectorists based on the results of industrial radiation monitoring and individual dosimetric monitoring]

Дефектоскопист [Flaw detectorist]	Время работы источника за период исследования, t (ч) [Operating time of the source during the study period, t (h)]	Максимальные значения дозы облучения сотрудников при мощности амбиентного эквивалента дозы 15 мкЗв/ч на расстоянии 20 м, (мЗв) [Maximum radiation dose values for workers at an ambient dose equivalent rate of 15 μ Sv/h at a distance of 20 meters, (mSv)]	Показание индивидуального дозиметра, размещённого на груди [Indication of an individual dosimeter placed on the chest]
1	36,26	0,54	0,98
2	23,84	0,36	0,92
3	29,26	0,44	1,01
4	38,81	0,58	0,75
5	25,82	0,39	0,89
6	21,03	0,32	0,85
7	23,17	0,35	1,27
8	21,6	0,32	0,86
9	25,92	0,40	1,09
10	20,4	0,30	1,16
11	26,25	0,40	0,84
12	34,87	0,52	1,04
13	30,73	0,46	0,82
14	18,01	0,27	0,84
15	26,99	0,40	0,93

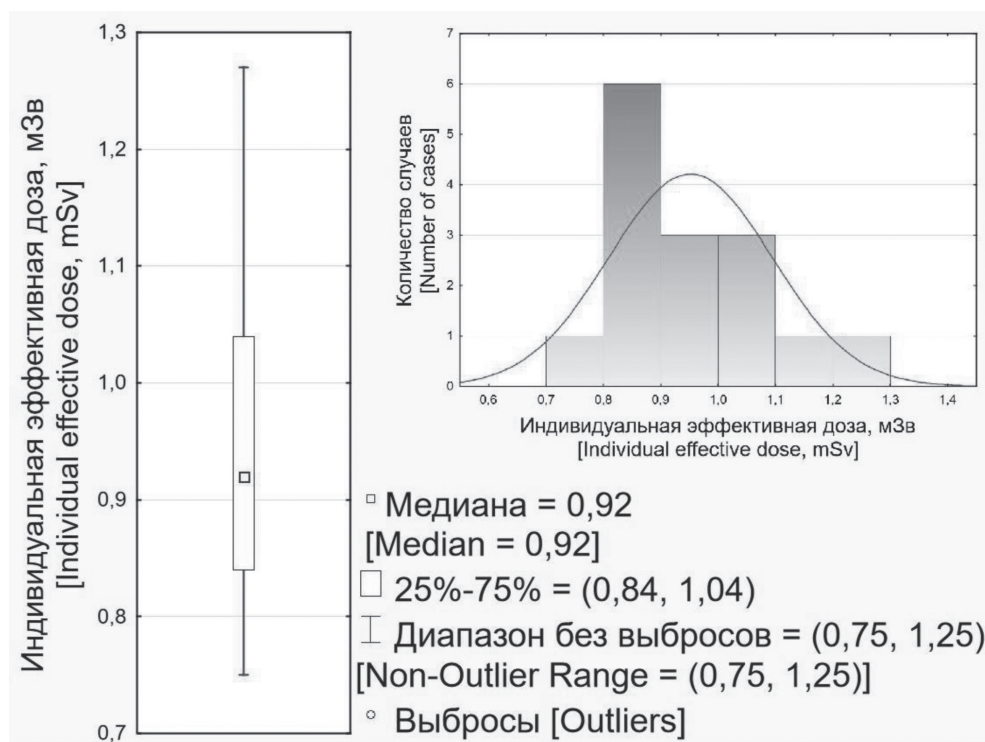


Рис. 4. Распределение индивидуальных эффективных доз дефектоскопистов, оценённых по показаниям экспериментального дозиметра, экспонируемого в области груди
[Fig. 4. Distribution of individual effective doses of flaw detectorists, estimated from the readings of an experimental dosimeter exposed in the chest area]

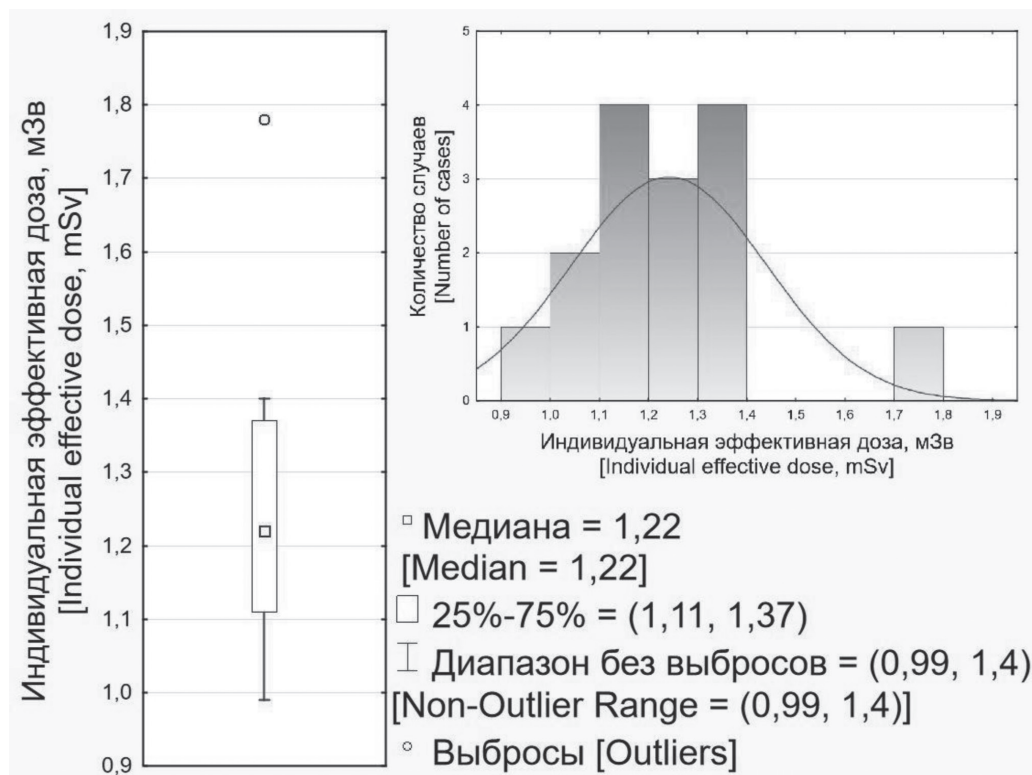


Рис. 5. Распределение индивидуальных эффективных доз дефектоскопистов, оценённых по показаниям экспериментального дозиметра, экспонируемого в области живота
[Fig. 5. Distribution of individual effective doses of flaw detectorists, estimated from the readings of an experimental dosimeter exposed in the abdomen area]

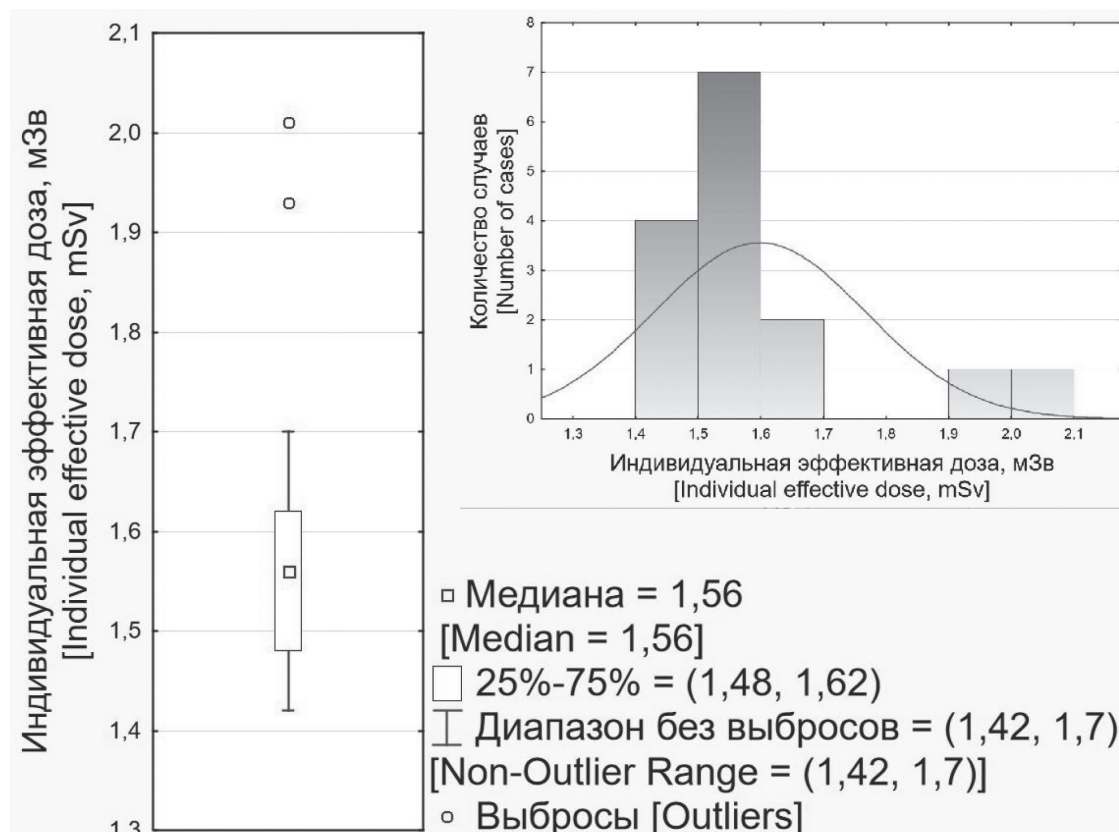


Рис. 6. Распределение индивидуальных квартальных эффективных доз дефектоскопистов, оценённых по показаниям дозиметра, экспонируемого в области груди
[Fig. 6. Distribution of individual quarterly effective doses of flaw detectorists, estimated from the readings of a dosimeter exposed in the chest area]

Позже между собой были сравнены показания экспериментальных дозиметров, размещенных в области груди и в области живота. Значения измеренных величин и соотношение между ними наглядно представлены в таблице 2.

Практически для всех приведённых в таблице 2 случаев, за исключением одного, соотношение Живот/Грудь оказалось больше 1. Такое соотношение свидетельствует о том, что расположение индивидуального дозиметра на уровне груди не является оптимальным для оценки эф-

Результаты измерений $H_p(10)$ при различном расположении индивидуальных дозиметров у специалистов, занимающихся дефектоскопией в нестационарных условиях с использованием гамма-дефектоскопа «Гаммарид-192/120»
[Table 2]

Дефектоскопист [Flaw detectorist]	Живот, $H_p(10)$, мЗв [Abdomen, $H_p(10)$, mSv]	Грудь, $H_p(10)$, мЗв [Chest, $H_p(10)$, mSv]	Соотношение Живот/Грудь [Ratio Abdomen/ Chest]
1	1,37	0,98	1,40
2	1,11	0,92	1,21
3	1,19	1,01	1,18
4	1,40	0,75	1,87
5	1,16	0,89	1,30
6	1,40	0,85	1,65
7	1,14	1,27	0,90
8	1,31	0,86	1,52
9	1,22	1,09	1,12
10	1,22	1,16	1,05

Дефектоскопист [Flaw detectorist]	Живот, $H_p(10)$, мЗв [Abdomen, $H_p(10)$, mSv]	Грудь, $H_p(10)$, мЗв [Chest, $H_p(10)$, mSv]	Соотношение Живот/Грудь [Ratio Abdomen/ Chest]
11	1,24	0,82	1,51
12	1,05	0,84	1,25
13	0,99	0,93	1,07
14	1,02	0,84	1,21
15	1,78	1,04	1,71

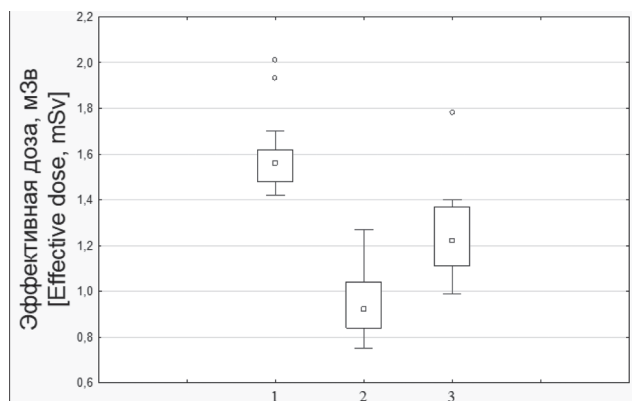


Рис. 7. Сравнение индивидуальных эффективных доз специалистов, занимающихся дефектоскопией в нестационарных условиях с использованием гамма-дефектоскопа «Гаммарид-192/120» при различном расположении индивидуального дозиметра (1 – 3 квартал, 2 – грудь, 3 – живот)

[Fig. 7. Comparison of individual effective doses of the workers involved in flaw detection in non-stationary conditions using the gamma flaw detector («Gammarid-192/120») with different locations of the individual dosimeter (1 – 3 quarter, 2 – chest, 3 – abdomen)]

эффективных доз. Расположение индивидуального дозиметра в области живота для данной категории персонала будет более показательным и позволит с разумной долей консерватизма оценивать ЭД.

Заключение

Средние годовые дозы дефектоскопистов с 2015 по 2022 г. являются одними из наиболее существенных в структуре профессионально облучения [8–15]. При действующих подходах к проведению ИДК и организации системы учёта индивидуальных доз происходит недооценка ЭД, особенно дефектоскопистов, работающих с переносными гамма-дефектоскопами. Изменяющиеся условия облучения в течение технологического цикла делают оценку ЭД с помощью индивидуального дозиметра, размещённого в области груди, неадекватной. Это заключение подтверждает полученное в ходе исследования соотношение показаний индивидуальных дозиметров,

размещённых на груди и в области живота. Практически во всех случаях дозиметр, размещённый в области живота, показывал большие значения $H_p(10)$ для каждого дефектоскописта.

Расчёт максимальной ЭД по результатам производственного радиационного контроля также занижает реальные значения ЭД, т.к. воздействие внешнего облучения от гамма-дефектоскопа осуществляется не только при просвечивании объекта, но и в процессе транспортировки и подготовки гамма-дефектоскопа к работе.

Кроме того, в проведении ИДК дефектоскопистов необходимо отразить ещё один критерий. В 2022 г. были утверждены МУ 2.6.1.3747–22 «Контроль индивидуальных эквивалентных доз внешнего облучения хрусталиков глаз»⁵, в которых дефектоскопистов относят ко второй категории персонала в зависимости от уровня облучения хрусталиков глаз (умеренный уровень облучения хрусталиков глаз). Для такого персонала оценку эквивалентной дозы в хрусталике глаза проводят косвенным образом по результатам измерений $H_p(10)$ с помощью незранированного дозиметра на уровне шеи или головы.

Таким образом, предлагается следующий подход в проведении ИДК дефектоскопистов:

1. Дефектоскописты, работающие с переносными гамма-дефектоскопами, обеспечиваются двумя индивидуальными дозиметрами, откалиброванными в терминах $H_p(10)$.
2. Экспонирование дозиметров производится постоянно в течение работы с ИИИ. Периодичность считываний показаний – ежеквартально.
3. Один индивидуальный дозиметр размещается в области живота. Он предназначен для оценки ЭД.
4. Второй дозиметр размещается в области шеи или головы. По этому дозиметру оценивается эквивалентная доза в хрусталике глаза.
5. Если показания второго дозиметра за год не превышают 10 мЗв, эквивалентная доза в хрусталике глаза принимается равной измеренному таким дозиметром значению.
6. Если показания второго дозиметра за год превышают 10 мЗв, дефектоскописту, получившему такое значение $H_p(10)$, в дальнейшем выдаётся специализированный дозиметр для оценки эквивалентной дозы в хрусталике глаза.

⁵ МУ 2.6.1.3747–22 «Контроль индивидуальных эквивалентных доз внешнего облучения хрусталиков глаз персонала» (утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 17.05.2022). [Methodical guidelines 2.6.1.3747–22 «Control of individual equivalent doses of external irradiation of the lenses of the eyes of personnel» (In Russ.)]

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Бажин С.Ю. осуществлял общее научное руководство исследованием, разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, выполнил анализ данных, отредактировал и предоставил окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

Шлеенкова Е.Н. провела литературный поиск, осуществила подготовку средств измерения и выполнила градуировку детекторов, выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Богатырёва В.Ю. провела литературный поиск и выполнила группировку и структурирование полученных данных.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Литература

1. International Commission on Radiological Protection. (1990). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Annals of the ICRP. 1990. Vol. 21, No 1-3. P. 1-201.
2. International Commission on Radiological Protection 2007 The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37. P. 1-332.
3. ICRU Report 43: Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2 // ICRU. 1988. Vol. os22, Issue 2. P. 51.
4. ICRU Report 51: Quantities and units in radiation protection dosimetry // ICRU. 1993. Vol. os-26, Issue 2. P. 19.
5. ICRU Report 57: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation // ICRU. 1998. Vol. os-29, Issue 2. P. 137.
6. ICRU Report 60: Fundamental quantities and units for ionizing radiation // ICRU. 1998. Vol. os-31, Issue 1. P. 24.
7. ICRU Report 66: Determination of Operational Dose Equivalent Quantities For Neutrons // Journal of the ICRU. 2001. Vol. 1, Issue 3. P. 94.1 (3).
8. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.Н. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2015 году: информационный сборник. СПб., 2016. 72 с.
9. Барковский А.Н., Барышков Н.К., Братилова А.А. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб., 2017. 78 с.
10. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2017 году: информационный сборник. СПб., 2018. 72 с.
11. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. СПб., 2019. 72 с.
12. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2019 году: информационный сборник. СПб., 2020. 70 с.
13. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2020 году: информационный сборник. СПб., 2021. 83 с.
14. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2021 году: Справочник. СПб., 2022. 72 с.
15. Барковский А.Н., Ахматдинов Руслан Р., Ахматдинов Рустам Р. и др. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2022 году: Справочник. СПб., 2023. 66 с.
16. Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю., Ильин В.А. Сравнение эффективных доз персонала, выполняющего дефектоскопию в стационарных и в нестационарных условиях. Радиационная гигиена. 2023;16(4):64-69. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69>.

Поступила: 22.03.2024 г.

Бажин Степан Юрьевич – заведующий лабораторией радиационного контроля, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: s.bazhin@niirg.ru

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, 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: Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю. Консервативная оценка доз внешнего облучения персонала при проведении радионуклидной дефектоскопии // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 76–85. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-76-85

Conservative assessment of external radiation dose for staff in the event of radionuclide flaw detection

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

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

The article proposes a new approach to assessing the effective doses of flaw detectorists performing flaw detection using portable radionuclide flaw detectors (gamma flaw detectors). The existing approach to assessing effective doses, based on the use of one individual dosimeter placed on work clothes in the chest area, is inadequate for the actual working conditions of exposure of flaw detectorists. Gamma flaw detectors contain a closed man-made source of ionizing radiation in their head, therefore, even in the non-working position, such flaw detectors pose a radiation hazard. When transporting and preparing gamma flaw detectors for work, the flaw detector operator is in close proximity to the radiation source. The irradiation geometry changing during the technological cycle when working with portable gamma flaw detectors at certain stages creates a sharply uneven irradiation of the flaw detectorist's body. Therefore, after assessing the stages of the technological cycle, an option was proposed for a more conservative assessment of effective doses – to change the location of the individual dosimeter on the working clothes of the flaw detectorist, moving the individual dosimeter to the abdominal area. An anonymous study was carried out with the participation of 15 flaw detectorists; three individual dosimeters were displayed on their working clothes: two of them were experimental and were placed in the chest and abdomen; the third (a control dosimeter) was exposed for the quarter on the chest as part of constant individual dosimetric monitoring. In controlled anonymous measurements, the average effective dose, estimated from the readings of dosimeters exposed in the chest area, was equal to 0,95 mSv (median – 0,92 mSv, maximum value – 1,27 mSv). These values were compared with values obtained using dosimeters that were exposed to the abdomen, and the differences were significant (the average effective dose was 1,24 mSv (median – 1,22 mSv, maximum value – 1,78 mSv).

Key words: individual dosimetric control, effective dose, individual dose equivalent, gamma flaw detector.

Personal contribution of the authors

Bazhin S.Yu. provided general scientific supervision of the study, developed the study design, defined goals and objectives, performed data analysis, edited and submitted the final version of the manuscript for publication in the journal.

Shleenkova E.N. Conducted a literature search, carried out the preparation of measuring instruments and calibrated the detectors, performed measurements of individual dose equivalents, and edited an intermediate version of the manuscript.

Bogatyreva V.Yu. conducted a literature search and grouped and structured the obtained data.

Conflicts of interest

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

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. International Commission on Radiological Protection. (1990) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Annals of the ICRP*. 1990;21(1-3): 1-201.
2. International Commission on Radiological Protection 2007 The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37: 1–332.
3. ICRU Report 43: Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. *ICRU*. 1988;os-22(2): 51.
4. ICRU Report 51: Quantities and units in radiation protection dosimetry. *ICRU*. 1993;os-26(2): 19.
5. ICRU Report 57: Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRU*. 1998;os-29(2): 137.
6. ICRU Report 60: Fundamental quantities and units for ionizing radiation. *ICRU*. 1998;os-31(1): 24.
7. ICRU Report 66: Determination of Operational Dose Equivalent Quantities For Neutrons. *Journal of the ICRU*. 2001;1(3): 94.
8. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Repin LV, Romanovich IK, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2015: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2016: 72 p. (In Russian).
9. Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, Bruk GYa, Vorobiev BF, Kormanovskaya TA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2016: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2017: 78 p. (In Russian).
10. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2017:

Stepan Yu. Bazhin

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

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

- information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2018: 72 p. (In Russian).
11. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2018: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2019: 72 p. (In Russian).
 12. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2019: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2020: 70 p. (In Russian).
 13. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Doses for the population of the Russian Federation in 2020: information collection. Saint-Petersburg: NIIRG; 2021: 83 p. (In Russian).
 14. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2021: A Handbook. Saint-Petersburg: NIIRG; 2022: 72 p. (In Russian).
 15. Barkovsky AN, Ruslan R. Akhmatdinov, Rustam R. Akhmatdinov, Baryshkov NK, Biblin AM, Bratilova AA, et al. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2022: A Handbook. Saint-Petersburg: NIIRG; 2023: 66 p. (In Russian).
 16. Bazhin SYu, Shleenkova EN, Bogatyreva VYu, Ilyin VA. Comparison of effective doses for personnel performing flaw detection in stationary conditions and in situ. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 64-69. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-64-69>.
- Received: March 22, 2024

For correspondence: Stepan Yu. Bazhin – Head of the Laboratory of Radiation Control, Senior Researcher, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: s.bazhin@niirg.ru)

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, Saint-Petersburg, Russia

Victoria Yu. Bogatyreva – 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: Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu. Conservative assessment of external radiation dose for staff in the event of radionuclide flaw detection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 76–85. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-76-85

Анализ данных об уровнях облучения населения Ивановской области природными источниками излучения

Т.А. Кормановская¹, О.А. Даричева², П.А. Колесник³, Д.В. Кононенко¹

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 Центр гигиены и эпидемиологии в Ивановской области, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Иваново, Россия

³ Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ивановской области, Иваново, Россия

В статье выполнен анализ данных Регионального банка данных доз облучения населения Ивановской области за счет природного и техногенно измененного радиационного фона за период 2008–2022 гг. Несмотря на то, что интегральная средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения Ивановской области за счет природных источников ионизирующего излучения, равная 4,63 мЗв/год, не квалифицируется как повышенная (не превышает 5 мЗв/год), в отдельные годы рассматриваемого 15-летнего периода средние дозы природного облучения населения региона неоднократно превышали этот уровень, достигая 7,50 мЗв/год. Анализ структуры годовых доз облучения населения Ивановской области за счет природных источников ионизирующего излучения показал, что вклад дозы внутреннего облучения за счет ингаляции радона, торона и их дочерних продуктов распада по данным измерений 2008–2022 гг. составил от 65,98 до 81,47%. В статье приведены примеры зданий разных типов в отдельных населенных пунктах Ивановской области, в которых эквивалентная равновесная объемная активность изотопов радона в воздухе помещений более чем в 1,5 раза превышает установленный гигиенический норматив для эксплуатируемых зданий жилого и общественного назначения. Отмечено, что, несмотря на значительный объем измерительной информации в Региональном банке данных, необходимо получить дополнительные объективные сведения об уровнях содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых деревянных и малоэтажных каменных жилых и общественных зданий в наиболее потенциально радоноопасных районах региона. Для решения поставленных задач специалисты Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. П.В. Рамзаева, Управления Роспотребнадзора по Ивановской области и Центра гигиены и эпидемиологии в Ивановской области проводят научно-исследовательскую работу, в рамках выполнения которой на 2024–2026 гг. запланировано проведение радонометрического обследования в городах Иваново и Кохма, Приволжском, Гаврилово-Посадском, Тейковском и Заволжском районах Ивановской области.

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

Введение

В Ивановской области, на территории которой проживает около 1 млн человек [1], обеспечению радиационной безопасности уделяется пристальное внимание, что обусловлено не только наличием в регионе организаций, осуществляющих деятельность в области использования техногенных источников ионизирующего излучения (ИИИ) (по данным за 2022 г. – 168 организаций, 577 уста-

новок с ИИИ [2]) и наследием проведения мирных ядерных взрывов [3], но и значительными (а в некоторых случаях – высокими) уровнями облучения населения региона за счет воздействия природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ).

Интегральная (рассчитанная по всему массиву многолетних измерений) средняя индивидуальная годовая эффективная доза природного облучения жителей региона

Кормановская Татьяна Анатольевна

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева
Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

составляет 4,63 мЗв [4], что соответствует по классификации ОСПОРБ 99/2010¹ (п. 5.1.2) и СанПин 2.6.1.2800-10² (п. 4.1.3) приемлемому уровню облучения населения. Однако по результатам обследований, проведенных в период 2008–2022 гг., даже средняя за отдельные годы доза облучения населения Ивановской области за счет ПИИИ неоднократно превышала значение 5 мЗв/год (повышенный уровень облучения), а для жителей некоторых районов и населенных пунктов региона дозы соответствовали высоким уровням природного облучения (свыше 10 мЗв/год).

Цель исследования – на основании результатов анализа данных выполнить гигиеническую оценку доз облучения населения Ивановской области за счет ПИИИ и предложить мероприятия, которые будут способствовать постепенному снижению дозовой нагрузки на население при воздействии ПИИИ.

Задачи исследования

1. Выполнить анализ накопленных данных об уровнях природного облучения населения.
2. Выделить факторы природного облучения, приводящие к повышенным и высоким дозам облучения населения.
3. Идентифицировать объекты, по которым имеется недостаток измерительной информации по основным факторам природного облучения, и определить направления дальнейших исследований.

Материалы, объем и методы исследований

В основу анализа информации об уровнях природного облучения населения Ивановской области легли данные Регионального банка данных доз облучения населения

за счет природного и техногенно измененного радиационного фона (РБДОПИ)³, функционирующего в рамках Единой государственной системы контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан⁴. Ежегодно данные о параметрах радиационной обстановки в части облучения ПИИИ на территории региона поступают в РБДОПИ от организаций, проводящих исследования показателей радиационной безопасности зданий жилого и общественного назначения, территории населенных пунктов, а также источников питьевого водоснабжения. На основе полученных данных специалистами регионального Управления Роспотребнадзора ежегодно формируется форма статистической отчетности № 4-ДОЗ «Сведения о дозах облучения населения за счет естественного и техногенно измененного радиационного фона»⁵ субъекта Российской Федерации. В данной работе использованы данные РБДОПИ Ивановской области за 15 лет (2008–2022 гг.): всего в указанный период на территории региона было выполнено 22 781 измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения в жилых и общественных зданиях (448 измерений в деревянных зданиях (Д), 2345 – в одноэтажных каменных зданиях (1К), 19 988 – в многоэтажных зданиях (МК)) и 9040 измерений МАЭД гамма-излучения на открытой местности в населенных пунктах, 21 488 измерений эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона в воздухе помещений (2428 измерений в Д, 20 505 – в 1К, 19 196 – в МК), а также 695 исследований содержания радона в питьевой воде.

Все исследования, результаты которых представлены в РБДОПИ, выполнены специалистами аккредитованных испытательных лабораторий с использованием поверенных в установленном порядке средств измерений. Оценка доз облучения населения выполнялась с использованием

¹ 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 Минюстом России 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.)]

² 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.)]

³ 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.)]

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации 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.)]

⁵ 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.)]

ем программного обеспечения РБДОПИ в соответствии с рекомендациями МР 2.6.1.0088-14⁶.

Результаты и обсуждение

Как уже говорилось, интегральная (за период 2008–2022 гг.) оценка средней индивидуальной годовой эффективной дозы природного облучения жителей региона за счет всех ПИИИ не превышает 5 мЗв/год. При ранжировании субъектов РФ по величине этой дозы (по убыванию) Ивановская область занимает 7-е место и располагается непосредственно за 6 регионами, в которых дозы являются повышенными (от 5 до 10 мЗв/год): Республики Алтай и Тыва, Ставропольский и Забайкальский края, Иркутская область и Еврейская автономная область. Таким образом, интегральная оценка средней дозы природного облучения жителей Ивановской области (4,63 мЗв/год) является максимальной среди субъектов РФ с дозами менее 5 мЗв/год. Кроме Ивановской области, только в 2 субъектах РФ эта доза находится в интервале 4,5–5,0 мЗв/год: в Республике Бурятия (4,53 мЗв/год) и Карачаево-Черкесской Республике (4,56 мЗв/год) [4].

Значения средних годовых доз облучения населения за счет ПИИИ в одном и том же регионе, рассчитанных на основе результатов измерений, проведенных в отдельном отчетном году, могут иметь значительный разброс

вследствие того, что территория региона редко бывает однородной по уровням воздействия ПИИИ, а в разные годы исследования зачастую проводятся в разных населенных пунктах; кроме того, может различаться не только объем проведенных измерений, но и перечень исследованных показателей.

Эта ситуация наглядно продемонстрирована на рисунке 1, где показана динамика средней индивидуальной годовой эффективной дозы облучения жителей Ивановской области за счет всех ПИИИ по итогам измерений за отдельный год в период 2008–2022 г. На графике видны колебания значений дозы около уровня в 5 мЗв/год, но при этом наблюдается почти двукратная разница между минимальным (3,94 мЗв/год) и максимальным (7,50 мЗв/год) значениями. Также необходимо отметить, что за анализируемый 15-летний период доза пять раз превышала установленный уровень повышенного природного облучения в 5 мЗв/год (по результатам измерений 2009, 2015 и 2018–2020 гг.), а два раза (в 2021 и 2022 гг.) была ниже порогового значения всего лишь менее чем на 1%.

Полная доза облучения за счет ПИИИ формируется из следующих компонентов: дозы внешнего терригенного облучения, дозы внутреннего облучения за счет ингаляции радона, торона и их короткоживущих дочерних продуктов распада (ДПР), дозы внутреннего облучения

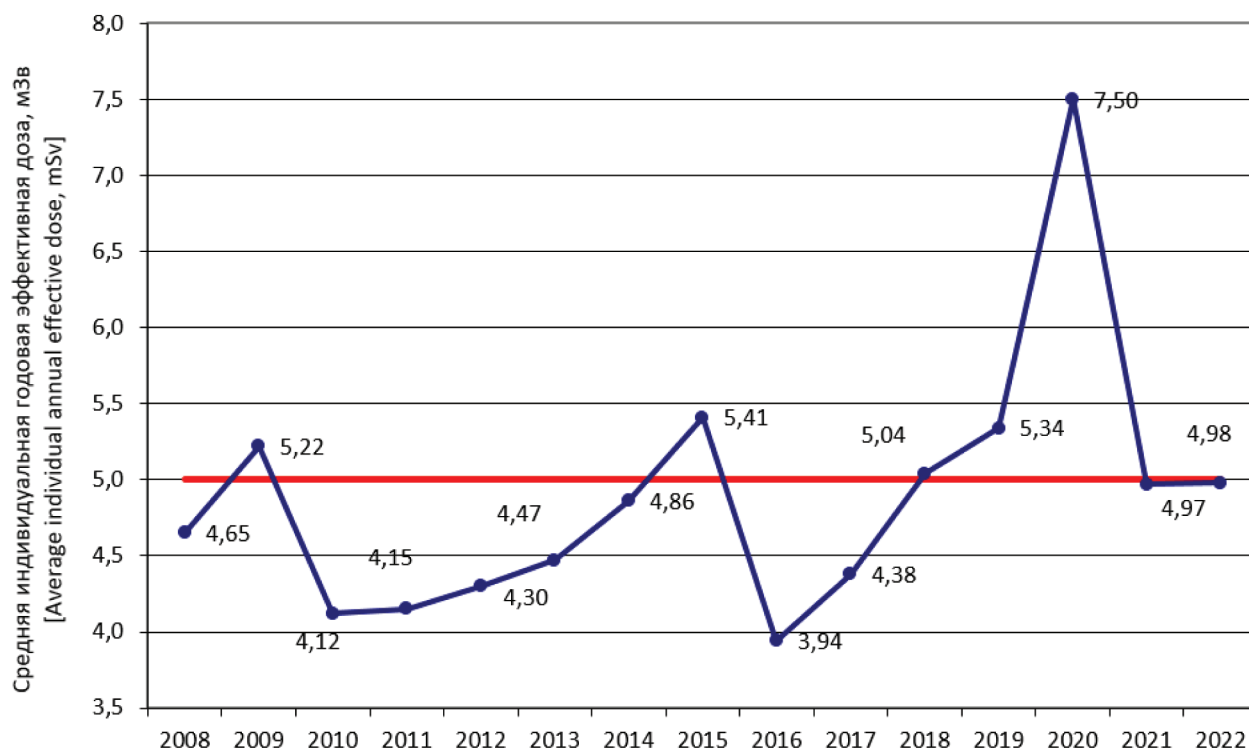


Рис. 1. Средние индивидуальные годовые эффективные дозы облучения населения Ивановской области за счет ПИИИ за период 2008–2022 гг.

[Fig. 1. Average individual annual effective doses of public exposure due to natural sources of radiation in the Ivanovo region for 2008–2022. Red line shows the established level of increased natural exposure of 5 mSv/year]

⁶ 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.)]

за счет поступления природных радионуклидов (ПРН) с пищей и питьевой водой, дозы за счет ингаляционного поступления долгоживущих ПРН с пылью из приземного слоя атмосферного воздуха, дозы за счет космического излучения и дозы за счет ^{40}K [5]. Последняя составляющая является одинаковой для всех жителей планеты; доза за счет космического излучения практически постоянна на территории одного региона, если для него не характерны значительные (несколько сотен метров) перепады высот местности над уровнем моря. Измерения удельных активностей ПРН в продуктах питания и атмосферном воздухе на территории Ивановской области (как и практически по всей стране) не проводятся, поэтому при оценке суммарной дозы в качестве значений этих составляющих используются среднемировые величины.

Таким образом, различия в оценках годовых доз природного облучения населения Ивановской области могут определяться вариабельностью 3 составляющих: дозы внешнего терригенного облучения, дозы облучения за счет ингаляции радона, торона и их ДПР и дозы облучения за счет потребления питьевой воды. В таблице 1 представлены значения доз за счет перечисленных факторов, а также их вклад в полную дозу природного облучения жителей области за соответствующий год.

В период 2008–2022 гг. годовая доза внешнего терригенного облучения населения Ивановской области находилась в диапазоне от 0,52 до 0,79 мЗв, и ее вариабельность, как и вариабельность дозы облучения за счет потребления питьевой воды (0,01–0,03 мЗв), не может быть причиной значительной (более 3,5 мЗв) разницы в оценках полной дозы природного облучения, полученной по результатам измерений разных лет. Среднерегиональная доза внутреннего облучения жи-

телей за счет ингаляции радона, торона и их ДПР в отдельные годы рассматриваемого периода составляла от 2,77 до 6,11 мЗв; вклад этого компонента в полную дозу природного облучения является наибольшим (от 66,98 до 81,47%). Таким образом, именно содержание радона в воздухе помещений является причиной повышенных средних и высоких для отдельных населенных пунктов доз природного облучения жителей Ивановской области.

В таблице 2 представлены количество измерений и средние по региону значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий Ивановской области в разные годы рассматриваемого 15-летнего периода с разделением по типам зданий (Д, 1К, МК).

Средневзвешенные по количеству измерений за год значения ЭРОА изотопов радона в обследованных зданиях жилого и общественного назначения в Ивановской области за период 2008–2022 гг. составили 47 Бк/м³ в Д зданиях, 61 Бк/м³ в 1К зданиях и 44 Бк/м³ в МК зданиях.

Объем выполненных измерений содержания радона в Д (242) и 1К (2050) зданиях значительно уступает объему измерений в МК зданиях (19 196), поскольку радиационный контроль при приемке вновь построенных зданий в эксплуатацию проводится, в основном, в МК зданиях, которых строится больше всего. Вместе с тем, именно в нетиповых зданиях, являющихся, как правило, длительно эксплуатируемыми, за 15 лет были выявлены наиболее высокие уровни содержания радона: даже средние по региону значения ЭРОА изотопов радона в 1К зданиях по результатам измерений 2019 и 2020 гг. превысили 100 Бк/м³. Достаточно высокие средние значения ЭРОА изотопов радона фиксировались в указанный период также в Д (2015 г.) и МК (2020 г.) зданиях.

Таблица 1

Вклад основных компонентов в полную дозу природного облучения населения Ивановской области в 2008–2022 гг.

[Table 1

Contribution of the main components to the total dose of public exposure due to natural sources of radiation in the Ivanovo region in 2008–2022]

Год [Year]	Внешнее терригенное облучение [Terrestrial radiation]		Ингаляция радона, торона и их ДПР [Radon, thoron and progenies]		Питьевая вода [Drinking water]	
	мЗв/год [mSv/year]	%	мЗв/год [mSv/year]	%	мЗв/год [mSv/year]	%
2008	0,61	13,12	3,32	71,40	0,02	0,43
2009	0,59	11,30	3,90	74,71	0,03	0,57
2010	0,63	15,29	2,77	67,23	0,02	0,49
2011	0,61	14,70	2,81	67,71	0,02	0,48
2012	0,61	14,19	2,96	68,84	0,02	0,47
2013	0,56	12,53	3,20	71,59	0,01	0,22
2014	0,55	11,32	3,61	74,28	0,01	0,21
2015	0,52	9,61	4,18	77,26	0,01	0,18
2016	0,59	14,97	2,65	67,26	0,01	0,25
2017	0,79	18,04	2,89	65,98	0,01	0,23
2018	0,60	11,90	3,74	74,21	0,01	0,20
2019	0,60	11,24	4,03	75,47	0,01	0,19
2020	0,69	9,20	6,11	81,47	0,01	0,13
2021	0,67	13,48	3,59	72,23	0,01	0,20
2022	0,59	11,85	3,68	73,90	0,01	0,20

Таблица 2

Объем измерений и средние по Ивановской области значения ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в период 2008–2022 гг.

[Table 2]

Number of measurements and average annual indoor radon isotopes equilibrium equivalent concentrations (EEC) in the Ivanovo region in 2008–2022]

Год [Year]	Количество измерений (N) и ЭРОА изотопов радона, Бк/м³ [Number of measurements (N) and radon isotopes EEC, Bq/m³]					
	Д [Wooden buildings*]		1К [One-storey buildings*]		МК [Multi-storey buildings*]	
	N	ЭРОА [EEC]	N	ЭРОА [EEC]	N	ЭРОА [EEC]
2008	40	39,1	245	45,2	1858	39,5
2009	44	48,2	114	66,1	1552	44,6
2010	25	64,5	53	30,5	1380	31,8
2011	41	43,3	76	59,0	1974	32,7
2012	6	17,7	42	38,5	1192	49,4
2013	22	44,4	173	38,1	1337	36,6
2014	3	35,3	174	74,9	990	44,0
2015	19	86,4	210	68,7	721	44,0
2016	10	26,0	150	78,6	1623	34,6
2017	16	45,5	291	47,9	1698	39,3
2018	5	49,6	192	97,9	1065	49,0
2019	8	35,8	55	110,3	1761	59,7
2020	–	–	26	111,1	122	86,8
2021	–	–	198	41,3	1030	54,0
2022	3	17,7	51	77,0	893	63,6

* 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”. “One-storey buildings” and “Multi-storey buildings” types include corresponding buildings constructed from any material (all types of brick, concrete, blocks, etc.) except wood.]

Поскольку сбор данных об уровнях природного облучения населения Российской Федерации в рамках федеральной статистической отчетности служит основой для заполнения соответствующих информационных блоков радиационно-гигиенических паспортов территорий⁷ (РГПТ), в РБДОПИ ежегодно по каждому типу зданий отражаются сведения о количестве результатов измерений, превышающих гигиенический норматив среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе вновь построенных (реконструированных, капитально отремонтированных) зданий жилого и общественного назначения 100 Бк/м³ (далее эта информация вносится в РГПТ). В таблице 3 приведены количество таких результатов на территории Ивановской области в период 2008–2022 гг. и доля таких результатов от общего количества выполненных измерений.

Наибольший процент превышений гигиенического норматива 100 Бк/м³ характерен для 1К зданий: в среднем за 15-летний период – 16% от общего количества ре-

зультатов, а в отдельные годы (2019, 2020 гг.) – от трети до более чем половины результатов.

Результаты же измерений в отдельных зданиях всех типов неоднократно превышали гигиенический норматив как для вновь построенных (100 Бк/м³), так и для эксплуатируемых жилых и общественных зданий (200 Бк/м³ согласно НРБ-99/2009⁸). В таблице 4 приведены примеры высоких уровней содержания радона в воздухе помещений, более чем в 1,5 раза превышающих нормативное значение для эксплуатируемых зданий, по данным РБДОПИ Ивановской области (представлены максимальные значения ЭРОА изотопов радона по зданию). В таблице 4 указаны только наименования районов, населенных пунктов и улиц, хотя в РБДОПИ содержится полная адресная информация о каждом обследованном объекте. Районы и городские округа, в которых были зарегистрированы превышения, показаны на административной карте Ивановской области на рисунке 2 (цвет заливки соответ-

⁷ Постановление Правительства Российской Федерации от 28.01.1997 № 93 «О порядке разработки радиационно-гигиенических паспортов организаций и территории» [Decree of the Government of the Russian Federation of 28.01.1997 No. 93 “On the procedure for the development of radiation and hygiene passports of organizations and territories”. (In Russ.)]

⁸ 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.)]

Таблица 3

Количество и доля результатов измерений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий в Ивановской области, превысивших гигиенический норматив 100 Бк/м³ в период 2008–2022 гг.

[Table 3]

Number and percentage of indoor radon isotopes EEC measurement results in the Ivanovo region exceeding action level of 100 Bq/m³ for new dwellings and public buildings in 2008–2022]

Год [Year]	Количество (N) и доля результатов, превышающих 100 Бк/м³ [Number (N) and percentage of results exceeding 100 Bq/m³]							
	Д [Wooden buildings]		1К [One-storey buildings]		МК [Multi-storey buildings]		Все типы [All types]	
	N	%	N	%	N	%	N	%
2008	0	0	19	7,8	117	6,3	136	6,3
2009	5	11,4	22	19,3	127	8,2	154	9,0
2010	6	24,0	0	0	59	4,3	65	4,5
2011	3	7,3	14	18,4	84	4,3	101	4,8
2012	0	0	4	9,5	65	5,5	69	5,6
2013	2	9,1	9	5,2	88	6,6	99	6,5
2014	0	0	36	20,7	106	10,7	142	12,2
2015	4	21,1	40	19,0	42	5,8	86	9,1
2016	0	0	33	22,0	102	6,3	135	7,6
2017	1	6,3	22	7,6	136	8,0	159	7,9
2018	0	0	54	28,1	127	11,9	181	14,3
2019	0	0	32	58,2	272	15,4	304	16,7
2020	–*	–	9	34,6	35	28,7	44	29,7
2021	–	–	21	10,6	153	14,9	174	14,2
2022	0	0	12	23,5	133	14,9	145	15,3
2008-2022	21	8,7	327	16,0	1646	8,6	1994	9,3

* В отчетный год измерений в данном типе зданий проведено не было. [* No measurements were taken in this type of buildings in the reporting year.]

Таблица 4

Примеры зданий в Ивановской области с превышением гигиенического норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений 200 Бк/м³

[Table 4]

Examples of buildings in the Ivanovo region with indoor radon isotopes EEC exceeding action level of 200 Bq/m³ for existing dwellings and public buildings]

Населенный пункт [Settlement]	Улица [Street]	Тип здания [Building type*]	Год [Year]	ЭРОА изотопов радона, Бк/м³ [Radon isotopes EEC, Bq/m³]
г. Иваново [Ivanovo]	Колотилова [Kolotilova]	Д [W]	2010	303
	Куликова [Kulikova]	МК [MS]	2017	457
	Куконковых [Kukonkovykh]	МК [MS]	2018	832
	пер. Березниковский [Bereznikovskiy]	МК [MS]	2018	363
	4-й Котельницкий пер. [4th Kotel'nitskiy]	МК [MS]	2019	322
г. Вичуга [Vichuga]	Дзержинского [Dzerzhinskogo]	МК [MS]	2019	473
	Дачная [Dachnaya]	МК [MS]	2020	430
г. Кохма [Kokhma]	Дзержинского [Dzerzhinskogo]	МК [MS]	2017	457
	Авиационная [Aviatsionnaya]	Д [W]	2017	549
Заволжский район [Zavolzhsky district]				
с. Новлянское [Novlyanskoe]	ФАП [Rural health post]	1К [1S]	2011	315
	Центральная [Tsentral'naya]	1К [1S]	2016	516
	Центральная [Tsentral'naya]	1К [1S]	2017	359
	Центральная [Tsentral'naya]	1К [1S]	2018	833
	Центральная [Tsentral'naya]	1К [1S]	2019	637

Населенный пункт [Settlement]	Улица [Street]	Тип здания [Building type*]	Год [Year]	ЭРОА изотопов радона, Бк/м ³ [Radon isotopes EEC, Bq/m ³]
Гаврилово-Посадский район [Gavrilovo-Posadsky district]				
г. Гаврилов-Посад [Gavrilov Posad]	3-я Интернациональная [3rd Internatsional'naya]	1К [1S]	2014	398
	Октябрьская [Oktyabr'skaya]	1К [1S]	2014	588
	9 Января [9 Yanvarya]	МК [MS]	2021	709
	9 Января [9 Yanvarya]	МК [MS]	2022	795
с. Непотягово [Nepotyagovo]	Садовая [Sadovaya]	1К [1S]	2015	432
с. Осановец [Osanovets]	Осановец [Osanovets]	МК [MS]	2020	373
	Осановец [Osanovets]	МК [MS]	2021	380
	Конец [Konets]	1К [1S]	2021	414
с. Шекшово [Shekshovo]	Конец [Konets]	МК [MS]	2021	828
	Конец [Konets]	МК [MS]	2021	506
	Конец [Konets]	МК [MS]	2022	537
Приволжский район [Privolzhsky district]				
г. Приволжск [Privolzhsk]	Революционная [Revolutsionnaya]	МК [MS]	2017	550
	Революционная [Revolutsionnaya]	МК [MS]	2022	609
	1 Мая [1 Maya]	МК [MS]	2017	779
	Малая Московская [Malaya Moskovskaya]	МК [MS]	2022	456
	Румянцева [Rumyantseva]	1К [1S]	2022	385
Пучежский район [Puchezhsky district]				
г. Пучеж [Puchezh]	Ленина [Lenina]	МК [MS]	2017	454
Шуйский район [Shuysky district]				
г. Шуя [Shuya]	Кооперативная [Kooperativnaya]	МК [MS]	2022	464
с. Сергеево [Sergeevo]		Д [W]	2015	460
Тейковский район [Teykovsky district]				
г. Тейково [Teykovo]	Шестагинская [Shestaginskaya]	МК [MS]	2019	474
	Шестагинская [Shestaginskaya]	1К [1S]	2019	344

* Д – деревянные здания любой этажности; 1К – одноэтажные каменные здания; МК – многоэтажные каменные здания.
[Building types: W – wooden; 1S – one-storey; MS – multi-storey.]

ствуется максимальному результату, полученному в населенных пунктах района).

Поскольку задачей РБДОПИ не является оценка соответствия показателей радиационной безопасности гигиеническим нормативам, формат представления данных при его заполнении предполагает внесение только результатов измерений, без указания неопределенности измерений, с учетом которых оценка ЭРОА изотопов радона была бы еще более высокой.

Суммируя вышесказанное, можно прийти к однозначному выводу, что единственным фактором, обуславливающим высокие дозы облучения населения отдельных населенных пунктов и районов Ивановской области за счет ПИИИ (2022 г.: Гаврилово-Посадский район – 11,40 мЗв/год, Приволжский район – 14,91 мЗв/год; 2020 г.: г. Тейково – 10,65 мЗв/год; 2018 г.: Заволжский район – 11,61 мЗв/год и т.д.) и повышенные значения среднерегистрационных доз, является содержание радона, торона

и их ДПР в воздухе помещений жилых и общественных зданий.

В регионе выполнен (и постоянно растет) значительный объем исследований параметров радиационной обстановки в части природного облучения населения, в том числе измерений содержания радона в воздухе помещений. Вместе с тем, как уже говорилось, необходимо увеличить число измерений в эксплуатируемых жилых и общественных зданиях, в первую очередь, Д и 1К зданиях. Особенно актуальным представляется проведение радиометрических обследований в зданиях старой постройки, на момент возведения которых радиационный контроль при приемке в эксплуатацию еще не проводился.

Заключение

Используя накопленный опыт проведения исследований уровней содержания радона в воздухе эксплуатируемых зданий жилого и общественного назначения

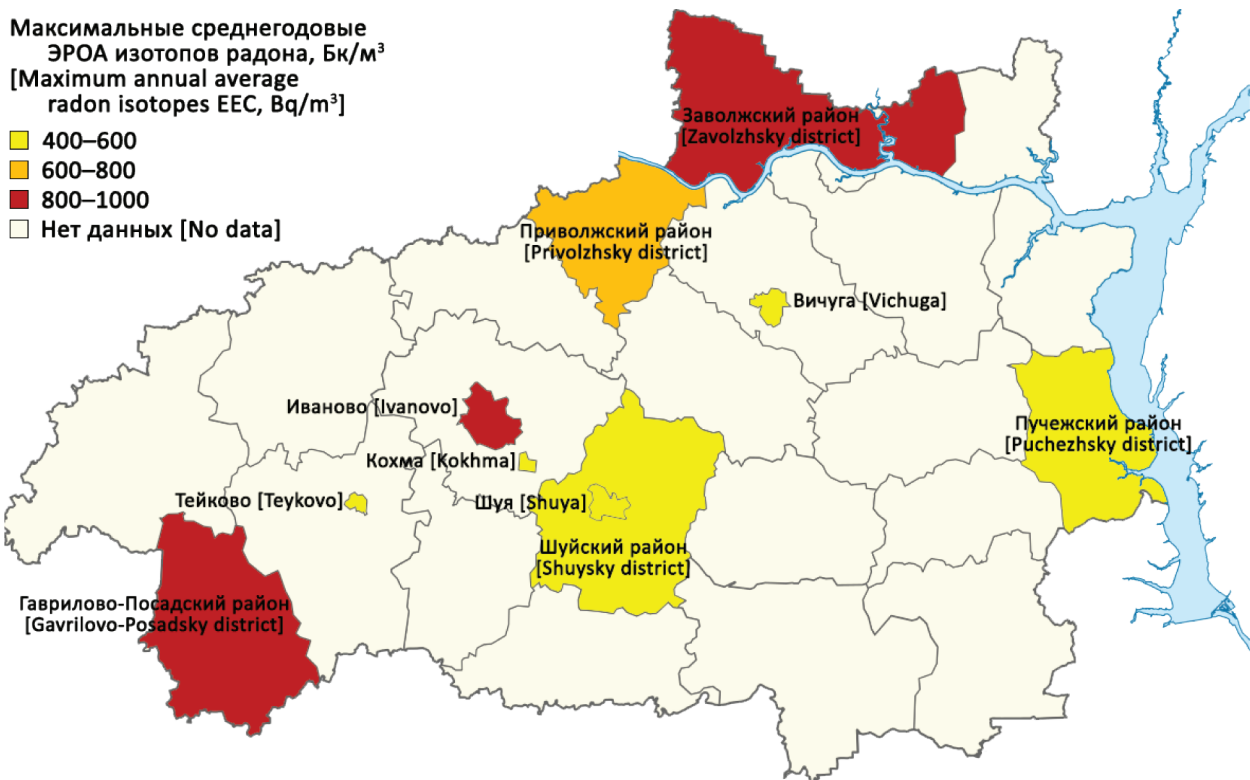


Рис. 2. Районы и городские округа Ивановской области с превышениями гигиенического норматива среднегодовой ЭРОА изотопов радона в воздухе эксплуатируемых жилых и общественных зданий
[Fig. 2. Districts of the Ivanono region with indoor radon isotopes EEC exceeding action level of 200 Bq/m³ for existing dwellings and public buildings]

в разных регионах России [6–9], специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В.Рамзаева совместно с Управлением Роспотребнадзора по Ивановской области и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Ивановской области» инициировали проведение радонометрического обследования на территории области в рамках совместной научно-исследовательской работы в 2024–2026 гг. Сформированный специалистами Роспотребнадзора региона в РБДОПИ массив данных об уровнях содержания радона в воздухе помещений жилых и общественных зданий служит основой планирования исследований, позволяя определить наиболее потенциально радоноопасные территории области. Принято решение об обследовании в ближайшие 3 года зданий в городах Иваново и Кохма, Приволжском, Гаврилово-Посадском, Тейковском и Заволжском районах. Результаты научно-исследовательской работы будут доложены Правительству Ивановской области для принятия управленческих решений о проведении мероприятий по обеспечению радиационной безопасности населения Ивановской области при воздействии ПИИИ.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кормановская Т.А. является ответственным исполнителем НИР, разработала дизайн и определила цели исследования, выполнила анализ данных и гигиеническую оценку его результатов, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант рукописи для публикации в журнал.

Даричева О.А. является ответственным лицом при заполнении РБДОПИ Ивановской области, определила задачи исследования, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Колесник П.А. выполнил анализ данных, отредактировал промежуточный вариант рукописи.

Кононенко Д.В. провел статистическую обработку данных, подготовил рисунки и таблицы, английский перевод и 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. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Ивановской области. Население. URL: <https://37.rosstat.gov.ru/folder/27479> (Дата обращения: 31.03.2024).
2. Управление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ивановской области. Материалы для подготовки государственного доклада «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации» по Ивановской области в 2022 году. URL: <https://37.rospotrebnadzor.ru/document/10109/> (Дата обращения: 31.03.2024).
3. Голубов Б.Н., Сапожников Ю.А. Подземный ядерный взрыв «Глобус-1» и дальняя миграция его радионуклидов к подземным источникам питьевого водоснабжения Кинешемского района Ивановской области // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 13, Вып. 1. 22 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28796042> (Дата обращения: 31.03.2024).
4. Радиационная обстановка на территории Российской Федерации в 2022 году: справочник. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2023. 66 с. URL: http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2022.pdf (Дата обращения: 31.03.2024).
5. Романович И.К., Стамат И.П., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. Природные источники ионизирующего излучения: дозы облучения, радиационные риски, профилактические мероприятия. Под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко и проф. А.Ю. Поповой. СПб.: ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2018. 432 с.
6. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения. Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населенных пунктов восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 6–18. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
7. Кормановская Т.А., Историк О.А., Романович И.К. и др. Исследование уровней содержания радона в воздухе помещений зданий детских учреждений // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 2. С. 6–20. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20.
8. Кормановская Т.А., Романович И.К., Историк О.А., Еремина Л.А. Принципы планирования радонометрических обследований в зданиях детских учреждений Ленинградской области // Радиационно-гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1»: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 22-23 апреля 2021 г.). СПб., 2021. С. 142–144.
9. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е. и др. Уровни содержания радона в воздухе помещений социально-значимых объектов Бузулукского и Бугурусланского районов Оренбургской области // Сборник трудов очно-заочной Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. уч. «Радиационная гигиена: итоги и перспективы», посвященной 60-летию курса «Радиационная гигиена» кафедры гигиены условий воспитания, обучения, труда и радиационной гигиены Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова (Санкт-Петербург, 18 мая 2022 г.). СПб.: Изд-во ФГБОУ ВО СЗГМУ им. И.И. Мечникова Минздрава России, 2022. С. 58–60.

Поступила: 09.04.2024 г.

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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru
ORCID 0009-0005-7922-7367

Даричева Ольга Алексеевна – кандидат медицинских наук, заведующая радиологической лабораторией Центра гигиены и эпидемиологии в Ивановской области Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Иваново, Россия

Колесник Павел Александрович – руководитель Управления Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Ивановской области, Иваново, Россия

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, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0002-1392-1226

Для цитирования: Кормановская Т.А., Даричева О.А., Колесник П.А., Кононенко Д.В. Анализ данных об уровнях облучения населения Ивановской области природными источниками излучения // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 86–96. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-86-96

Analysis of data on levels of public exposure to natural sources of radiation in the Ivanovo region

Tatyana A. Kormanovskaya ¹, Olga A. Daricheva ², Pavel A. Kolesnik ³, Dmitry V. Kononenko ¹

¹ 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

² Center of Hygiene and Epidemiology in the Ivanovo region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Ivanovo, Russia

³ Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Ivanovo region, Ivanovo, Russia

The paper presents the results of analysis of the Ivanovo Regional databank of radiation doses to the public from exposure to natural and technologically enhanced radiation background for 2008–2022. Despite the fact that the average individual annual effective dose of public exposure due to natural sources of radiation in the Ivanovo region calculated for the whole 15-year period (4.63 mSv/year) does not qualify as increased (i.e. does not exceed the level of 5 mSv/year), in some years of the period under review the average dose repeatedly exceeded this level, reaching 7.50 mSv/year. The analysis of the structure of the doses of public exposure due to natural sources of radiation in the Ivanovo region showed that the contribution of the dose from internal exposure to radon, thoron and progenies according to measurement results from 2008–2022 ranged from 65.98 to 81.47%. The paper provides examples of buildings of different types in settlements of the Ivanovo region, in which the indoor radon isotopes equilibrium equivalent concentrations are more than 1.5 times higher than the established action level for existing dwellings and public buildings (200 Bq/m³). Despite the significant amount of measurement data in the Regional databank, it is necessary to obtain additional information on the indoor radon levels in existing wooden and other low-rise dwellings and public buildings in the most radon-prone areas of the region. For this purpose, a radon survey is planned for 2024–2026 in the cities of Ivanovo and Kholm, Privolzhsky, Gavrilovo-Posadsky, Teykovsky and Zavolzhsky districts of the Ivanovo region within the framework of a joint project of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Ivanovo region, and the Center of Hygiene and Epidemiology in the Ivanovo region.

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

Personal contribution of the authors

Kormanovskaya T.A. – the responsible executive of the research, developed the design of the study, defined the goals, performed data analysis and hygienic assessment of its results, wrote a draft of the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Daricheva O.A. – the responsible for operation of Ivanovo Regional databank of radiation doses to the public from exposure to natural and technologically enhanced radiation background, defined the objectives of the study, and edited the interim version of the manuscript.

Kolesnik P.A. – performed data analysis and edited the interim version of the manuscript.

Kononenko D.V. – conducted statistical analysis of data, prepared figures and tables, made the translation and edited the interim version of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the sectoral program of Rosпотребнадзор 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. Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Ivanovo region. Population. Available from: <https://37.rosstat.gov.ru/folder/27479> [Accessed 31 Mar 2024]. (In Russian).
2. Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Ivanovo region. Materials for the preparation of the state

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

- report "On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population of the Russian Federation" for the Ivanovo region in 2022. Available from: <https://37.rospotrebnadzor.ru/document/10109/> [Accessed 31 Mar 2024]. (In Russian).
3. Golubov BN, Sapozhnikov YuA. "Globus-1" Underground Nuclear Explosion and Its Radionuclides Long-Range Migration to the Underground Drinking Water Sources in Kineshma District of Ivanovo Region. *Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2016;13(1): 22. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28796042> [Accessed 31 Mar 2024]. (In Russian).
 4. Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2022: reference book. St. Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2023. 66 p. Available from: http://niirg.ru/PDF/inf_sbor/2022.pdf [Accessed 31 Mar 2024]. (In Russian).
 5. Romanovich IK, Stamat IP, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. Natural sources of ionizing radiation: radiation doses, radiation risks, preventive measures. Saint-Petersburg: FBUN NIIRG im. P.V. Ramzaeva; 2018. 432 p. (In Russian).
 6. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltsina NE, Gaevoy SV, Bondar LV, Kononenko DV, et al. Public exposure in the Orenburg region due to natural sources of ionizing radiation. Part 1: Results of the comprehensive survey of settlements in the eastern districts of the Orenburg region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 6–18. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18>.
 7. Kormanovskaya TA, Istorik OA, Romanovich IK, Eremina LA, Koroleva NA, Balabina TA, et al. Radon surveys in the buildings of children institutions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(2): 6–20. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-2-6-20>.
 8. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Istorik OA, Eremina LA. Approaches to radon survey planning in the educational institutions in the Leningrad region. In: Radiation-hygienic consequences and lessons learned from the Chernobyl and Fukushima Daiichi accidents. Proceedings of the international scientific and practical conference, 22-23 April 2021, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg; 2021. P. 142–144. (In Russian).
 9. Kormanovskaya TA, Romanovich IK, Vyaltsina NE, Gaevoy SV, Konstantinov DS, Bondar LV. Indoor radon concentrations in public buildings in Buzuluksky and Buguruslansky districts of the Orenburg region. In: Radiation hygiene: results and prospects. Proceedings of All-Russian scientific and practical conference with international participation, 18 May 2022, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 2022. P. 58–60. (In Russian).

Received: April 09, 2024

For correspondence: Tatyana A. Kormanovskaya – PhD, 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

Olga A. Daricheva – PhD, Head of Radiological Laboratory of the Center of Hygiene and Epidemiology in the Ivanovo region, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Ivanovo, Russia

Pavel A. Kolesnik – Head of the Directorate of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing in the Ivanovo region, Ivanovo, Russia

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, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0002-1392-1226

For citation: Kormanovskaya T.A., Daricheva O.A., Kolesnik P.A., Kononenko D.V. Analysis of data on levels of public exposure to natural sources of radiation in the Ivanovo region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 86–96. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-86-96

Проблемы радиационной безопасности при передвижении в общественном транспорте пациента после радионуклидной терапии с ^{131}I

А.В. Петрякова^{1,2}, Л.А. Чипига^{1,3,4}, И.А. Звонова¹, А.В. Водоватов^{1,5}, Г.А. Горский^{1,6}, А.А. Станжевский³

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 Городская больница №40 Курортного района, 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 Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия

Радионуклидная терапия с ^{131}I на протяжении многих лет является одним из наиболее распространенных видов радионуклидной терапии. Радиационная безопасность населения обеспечивается ограничением контактов пациента с другими людьми путем его госпитализации до снижения радиологических параметров до установленных критериев. Для повышения доступности данного вида лечения были предложены смягченные критерии выписки пациентов после радионуклидной терапии с ^{131}I . Однако ранняя выписка пациентов может приводить к увеличению облучения лиц из населения, например, пассажиров в транспорте при следовании пациента после терапии к месту жительства, и образованию отходов, содержащих ^{131}I . Целью работы является оценка радиационного воздействия излучения от пациентов после радионуклидной терапии с ^{131}I -МИБГ и Na^{131}I на окружающих лиц в транспорте с учетом образования радиоактивных биологических отходов. В работе было оценено выведение ^{131}I из организма пациентов в транспорте для различных сценариев передвижения пациента до места жительства. В результате было установлено, что смягчение критериев выписки пациентов приводит к увеличению эффективной дозы облучения окружающих лиц в транспорте и увеличению активности ^{131}I , выводимой с отходами пациентов. Удельная активность в баках биотуалетов в транспорте, образующаяся после проезда пациента с введенным радиофармацевтическим лекарственным препаратом, меченным ^{131}I , превышает предельное значение отнесения жидких отходов к радиоактивным. С целью оптимизации радиационной защиты населения целесообразно применять дифференцированный подход при выписке пациентов после терапии с ^{131}I : выделить иногородних пациентов в отдельную категорию, сохранив для них существующий критерий выписки (без смягчения), чтобы минимизировать радиационное воздействие на окружающих лиц.

Ключевые слова: ядерная медицина, радионуклидная терапия, жидкие радиоактивные отходы, радиационная безопасность, ^{131}I -МИБГ, Na^{131}I .

Введение

Согласно данным отчета Научного комитета по действию атомной радиации Организации Объединенных Наций 2020/2021, за последнее десятилетие частота проведения процедур радионуклидной терапии (РНТ)

увеличилась на 33% [1]. Много лет во всем мире наиболее популярной является РНТ с ^{131}I , которая применяется для лечения рака щитовидной железы (ЩЖ), гипертиреоза и тиреотоксикоза [1, 2], а также для лечения феохромоцитомы и нейробластомы у взрослых и детей ^{131}I -метайодбензилгуанидином (^{131}I -МИБГ) [3].

Петрякова Анастасия Валерьевна

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

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

В Российской Федерации, по данным формы федерального статистического наблюдения №30¹, в 2020 г. было выполнено 10 235 процедур РНТ, из которых 72% составляют процедуры с ¹³¹I [4].

Экономическая целесообразность и эффективность работы медицинских организаций (МО), осуществляющих радиойодтерапию, увеличение количества пациентов, которым может и должна быть оказана медицинская помощь в рамках существующего коечного фонда, диктует необходимость максимально быстрой выписки пациентов из радиологических отделений после применения радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП), но формирует дополнительные риски облучения населения, которые подлежат обоснованию и оценке приемлемости с точки зрения радиационной безопасности.

В соответствии с отечественными нормативными документами СанПин 2.6.1.25-23-09 (НРБ-99/2009)² и СанПиН 2.6.1.2368-08³ пациенты после процедур РНТ могут быть выписаны из отделения РНТ при непревышении радиологических критериев выписки [5–10], которые для ¹³¹I установлены на уровне 20 мкЗв/ч по мощности эквивалентной дозы на расстоянии 1 м от пациента и/или 0,4 ГБк по остаточной активности в теле пациента.

Используемый в настоящее время в отечественной практике подход к определению радиологических критериев выписки основан на снижении активности в теле только за счет радиоактивного распада радионуклида со временем и не учитывает биологическое выведение РФЛП из организма пациента [6–7]. В работе [5] был предложен подход и смягченные критерии выписки пациентов при РНТ с ¹³¹I, которые учитывают, что мощность дозы от пациента со временем будет снижаться в том числе и за счет биологического выведения радионуклида из организма пациента. Однако рассмотренные сценарии облучения критических групп населения от пациента после РНТ не учитывают долгосрочный контакт с пациентом (до нескольких суток) в транспорте в первые часы после выписки его из стационара, когда мощность дозы от него будет наиболее высокой. Более мягкие критерии выписки пациентов после РНТ будут сокращать время пребывания пациентов в отделении РНТ, что может приводить к увеличению дозы у лиц, контактирующих с пациентом, и росту неконтролируемого образования отходов, содержащих ме-

дицинские радионуклиды, за пределами МО, поскольку выведение РФЛП, меченных ¹³¹I, из организма пациента происходит преимущественно с мочой [2, 11, 12].

Критерии отнесения отходов к радиоактивным отходам (РАО), в том числе к жидким радиоактивным отходам (ЖРО), по удельной активности радионуклида установлены в Постановлении Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069⁴. Установленные критерии не учитывают специфику ядерной медицины с точки зрения характера образования отходов, являющихся биологическими жидкостями, и достаточно короткого периода радиоактивного распада. При этом неконтролируемое образование техногенных медицинских радионуклидов в общественных местах и транспорте может создавать нештатные ситуации, когда стационарные системы радиационного контроля транспортной инфраструктуры регистрируют превышение гамма-фона от пациентов или от баков биотуалетов транспортных средств.

Цель исследования – оценка радиационного воздействия излучения от пациента после РНТ с ¹³¹I на окружающих лиц в транспорте с учетом образования радиоактивных биологических отходов в биотуалетах транспортных средств.

Материалы и методы

Выписка пациентов из МО после РНТ

Мощности дозы от пациента после РНТ с ¹³¹I-МИБГ и ¹³¹I-NaI при тиреотоксикозе и раке ЩЖ были определены на основании экспериментальных данных, представленных в литературных источниках [13–15], с использованием дозовых коэффициентов перехода (использовали коэффициент перехода от амбиентного эквивалента дозы к эффективной дозе 0,7 для энергий в диапазоне 300–700 кэВ) [16].

Время выписки пациентов из МО и посадки в транспорт определяли по достижении радиологических критериев выписки. Для этого вводимые пациентам активности ¹³¹I и мощности дозы от пациентов были сопоставлены с радиологическими критериями выписки, представленными в таблице 1 [5]. Критерии выписки установлены в НРБ-99/2009, исходя из допустимого предела дозы для населения 1 мЗв в год. В статье [5] это значение исполь-

¹ Приказ Росстата от 20.12.2021 № 932 «Об утверждении форм федерального статистического наблюдения с указаниями по их заполнению для организации Министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере охраны здоровья» [Order of the Federal State Statistics Service of 20.12.2021 N 932 "On Approval of Federal Statistical Observation Forms with Instructions for their Completion for the Organisation by the Ministry of Health of the Russian Federation of Federal Statistical Observation in the Field of Health Protection" (In Russ.)]

² СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности [Norms of the Radiation Safety NRB-99/2009 (In Russ.)].

³ СанПиН 2.6.1.2368-08. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. М.: Роспотребнадзор, 2008. 99 с. [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2368-08. Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources. Moscow: Rospotrebnadzor; 2008. 99 p. (In Russ.)]

⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069). [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012 "On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, classifying radioactive waste as special radioactive waste and as radioactive waste to be disposed of criteria for classifying radioactive waste to be disposed of" (In Russ.)]

зовано для отдельных лиц из населения, включая детей и беременных женщин, эпизодически контактирующих с пациентом, и 5 мЗв в год для взрослых, осуществляющих уход за пациентом.

Таблица 1

Значения радиологических критериев выписки пациентов после РНТ с ^{131}I , рассматриваемые в настоящей работе

[Table 1]

Patient release criteria after radiopharmaceutical therapy with ^{131}I using in the current study

Параметр [Parameter]	РФЛП [Radiopharmaceutical]		
	НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]	Чипига и др., 2023 [Chipiga et al., 2023]	
	^{131}I	^{131}I -МИБГ [^{131}I -mIBG]	Na^{131}I
Взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Carers]			
Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, $\mu\text{Sv/h}$]	20	260	65
Активность, ГБк [Activity, GBq]	0,4	4,9	1,3
Население, в том числе дети и беременные, контактирующие с пациентом [General public including children and pregnant women]			
Мощность дозы, мкЗв/ч [Dose rate, $\mu\text{Sv/h}$]	20	100	26
Активность, ГБк [Activity, GBq]	0,4	2,0	0,5

Сценарии передвижения пациента

В зависимости от удаленности проживания пациента были рассмотрены следующие сценарии: время пути в электропоезде или междугороднем автобусе – 2 ч; время пути в поезде дальнего следования – 48 ч; время пути в самолете – 7 ч; время пути в скоростном сидячем поезде (например, «Сапсан») – 4 ч. Предполагали, что пациент после выписки из МО добирается до электропоезда/автобуса/поезда за 1 ч, до самолета за 3 ч.

Активность ^{131}I , выводимая с отходами пациентов после РНТ в транспорте

Изменение активности в теле пациента определяется согласно выражению (1) [17]:

$$A(t) = A_0 \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{eff i}} \cdot t\right), \quad (1)$$

Соответственно, выведенную активность радионуклида из организма пациента за время $\Delta t = (t_2 - t_1)$ после введения РФЛП определяли по формуле (2):

$$A_{\text{вывед}}(\Delta t) = A_0 \cdot \left[\sum_{i=1}^n a_i \left(\exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{eff i}} \cdot t_1\right) - \sum_{i=1}^n a_i \left(\exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{eff i}} \cdot t_2\right) \right) \right], \quad (2)$$

где A_0 – вводимая пациенту активность радионуклида в РФЛП, Бк;

α_i – фракция выведения i -й фазы РФЛП из организма пациента, отн. ед.;

T_{eff} – эффективный период полувыведения, сут.

Выводимая активность в транспорте была рассчитана по формуле (2) за промежуток времени в пути согласно сценарию передвижения после достижения критериев выписки пациента из отделения РНТ. Параметры, необходимые для оценки выведения РФЛП из организма пациента, были определены с использованием литературных данных [5, 11, 12, 18] и представлены в таблице 2. Относительную остаточную активность в теле пациента и в отходах (долю от введенной активности) определяли делением активности в теле/отходах в определенный период времени на введенную пациенту активность с учётом радиоактивного распада радионуклида.

При определении удельной активности, образующейся в баках транспортных биотуалетов, считали, что объем бака в электропоезде/автобусе составлял 100 л, в поезде и самолете – 300 л.

Определение мощности дозы от баков биотуалетов в транспорте

Расчет мощности дозы от бака биотуалета, содержащего ^{131}I , был проведен методом Монте-Карло с помощью программы MCC3D (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия). Баки биотуалетов моделировали в виде цилиндров (диаметром 44 см для бака 100 л и 76 см для бака 300 л, высотой 66 см) однородной плотности 1 г/мл, идеальный гамма-детектор площадью 1 м² был установлен на расстоянии 1 м от бака.

Таблица 2

Принятая в расчетах вводимая пациентам активность и параметры в формуле (2) для оценки выведения РФЛП из организма пациента

[Table 2]

Administered activity and parameters in equation (2) for estimation of the radiopharmaceuticals excretion used in the calculations

РФЛП [Radiopharmaceutical]	A_0 , ГБк	α_1	α_2	Период полувыведения $T_{eff 1}$, сут [Effective half-life $T_{eff 1}$]	Период полувыведения $T_{eff 2}$, сут [Effective half-life $T_{eff 2}$]
^{131}I -МИБГ [^{131}I -mIBG]	0,6	0,37	0,63	0,12	1,88
Na^{131}I тиреотоксикоз [thyrotoxicosis]	7,5	0,2	0,8	0,33	7,5
Na^{131}I пак ЩЖ [thyroid cancer]	7,5	0,9	0,1	0,33	7,5

Оценка эффективной дозы облучения критических групп

Эффективные дозы критических групп – пассажиров, находящихся рядом с пациентом после РНТ с ^{131}I , были определены, исходя из мощности дозы от пациента за промежуток времени в пути согласно сценарию передвижения. При расчете считалось, что пассажир будет находиться на расстоянии 0,5 м от пациента в электропоезде/автобусе, самолете, высокоскоростном сидячем поезде или на расстоянии 1,5 м от пациента в поезде дальнего следования (вагоны купе/плацкарт).

Эффективные дозы от баков биотуалетов были определены для тех пассажиров, чьи места располагаются на самом близком расстоянии от бака биотуалета, содержащего ^{131}I . При этом считали, что пассажиры или члены экипажа на протяжении всего времени в пути находятся над баком биотуалета с отходами (резервуаром для сточной воды), который расположен в подвагонном пространстве

или под салоном самолета, на расстоянии 1 м, а технический персонал, опорожняющий баки биотуалетов, проводит не более 30 мин на расстоянии 0,5 м от отходов с ^{131}I .

Результаты исследования

Согласно экспериментальным данным из литературных источников, мощность эффективной дозы на расстоянии 1 м от пациентов (95-й перцентиль) с ^{131}I -МИБГ составляет $0,043 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{МБк}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ [13]; с Na^{131}I при тиреотоксикозе – $0,049 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{МБк}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ [14]; с Na^{131}I при раке ЩЖ – $0,046 \text{ мкЗв}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{МБк}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$ [15].

Мощность дозы от пациента после введения РФЛП представлена в таблице 3. Также в таблице 3 приведено время до достижения существующего критерия выписки и смягченных критериев выписки (мощности дозы на расстоянии 1 м от пациента).

Эффективные дозы пассажиров от пациентов после РНТ с ^{131}I в транспорте, при условии выписки их по разным критериям, представлены в таблице 4.

Таблица 3

Мощность эффективной дозы (МЭД) от пациента после введения РФЛП на расстоянии 1 м, время ожидания в отделении ядерной медицины до выписки

[Table 3]

Effective dose rate at 1 m from patient after radiopharmaceutical injection, time in nuclear medicine department before release

РФЛП [Radio-pharmaceutical]	МЭД, мкЗв/ч [Effective dose rate, $\mu\text{Sv/h}$]	Ориентировочное время ожидания в отделении, ч		
		НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]	Чипига и др., 2023 [Chipiga et al., 2023] [5]	
			Взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Carers]	Дети, беременные, контактирующие с пациентом [Children and pregnant women]
^{131}I -МИБГ [^{131}I -mIBG]	325	152	3	48
Na^{131}I тиреотоксикоз [thyrotoxicosis]	30	44	0	8
Na^{131}I рак ЩЖ [thyroid cancer]	341	140	26	76

Таблица 4

Эффективные дозы пассажиров от пациента с ^{131}I

[Table 4]

Passengers' effective doses from patient with ^{131}I

Вид транспорта до места проживания [Transport type]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, μSv]		
	^{131}I -МИБГ [^{131}I -mIBG]	Na^{131}I тиреотоксикоз [thyrotoxicosis]	Na^{131}I рак ЩЖ [thyroid cancer]
	НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]		
Электропоезд/автобус [short-distance train, bus]	0,1	0,2	0,2
Поезд [long-distance train]	0,2	0,3	0,1
Самолет [plane]	0,4	0,5	0,4
Скоростной поезд [high-speed train]	0,3	0,3	0,3
Чипига Л.А. и др., 2023 [5] – взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Chipiga L. et al., 2023 [5] – carers]			
Электропоезд /автобус [short-distance train, bus]	1,7	0,2	0,4
Поезд [long-distance train]	2,4	0,5	0,4
Самолет [plane]	4,7	0,7	1,2

Вид транспорта до места проживания [Transport type]	Эффективная доза, мЗв [Effective dose, μSv]		
	^{131}I -МИБГ [^{131}I -mIBG]	Na^{131}I тиреотоксикоз [thyrotoxicosis]	Na^{131}I рак ЩЖ [thyroid cancer]
Скоростной поезд [high-speed train]	3,2	0,4	0,8
Чипига Л.А. и др., 2023 [5] – дети, беременные, контактирующие с пациентом [Chipiga L. et al., 2023 [5] – children and pregnant women]			
Электропоезд /автобус [short-distance train, bus]	0,7	0,2	0,2
Поезд [long-distance train]	1,0	0,4	0,2
Самолет [plane]	2,0	0,6	0,6
Скоростной поезд [high-speed train]	1,3	0,4	0,5

Жирным выделены значения дозы более 1 мЗв [Bold underlines the dose values more than 1 mSv].

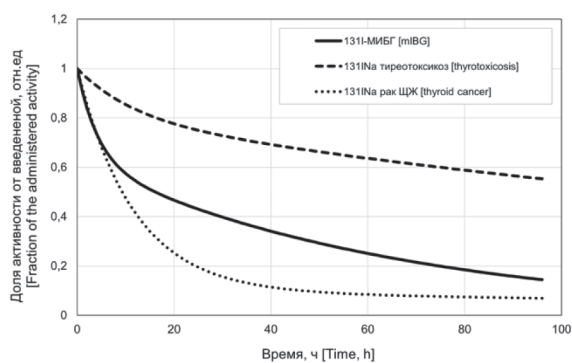
Динамика снижения содержания ^{131}I в организме пациентов для различных РФЛП при разных заболеваниях, а также пример накопления ^{131}I в баках биотуалета поезда в течение 48 ч поездки при выписке пациента при достижении такой величины при проведении РНТ различаются от нескольких часов до нескольких дней при тиреотоксикозе (в зависимости от тяжести заболевания) до 5–7 сут при раке ЩЖ или нейроэндокринных опухолях.

Мощность эффективной дозы от бака биотуалета объемом 100 л на расстоянии 1 м равна $0,021 \text{ мЗв} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{МБк}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$; объемом 300 л – $0,014 \text{ мЗв} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{МБк}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. Накопленная за время в пути активность ^{131}I в транспортных биотуалетах и соответствующие им оценки мощности дозы от баков приведены в таблице 5. Эффективные дозы облучения лиц из критических групп в транспорте (пассажиры и экипаж, технический персонал), находящихся в непосредственной близости от баков биотуалетов с ^{131}I , представлены в таблице 6.

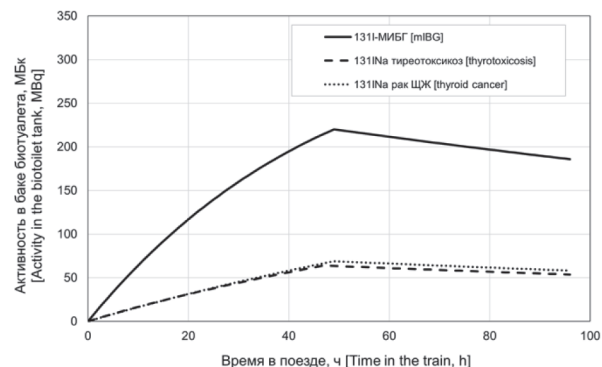
Обсуждение

Расчеты, приведенные в таблице 4, демонстрируют, что смягчение критерия выписки может приводить к облучению пассажиров в транспорте от пациента с ^{131}I выше установленного предела дозы для населения. Помимо этого, удельная активность в баках биотуалетов в транспорте, образующаяся после проезда пациента с введенным РФЛП, меченным ^{131}I , превышает предельное значение отнесения жидких отходов к радиоактивным. Такие отходы могут быть обнаружены при радиационном контроле транспортного средства за счет высокой мощности дозы от баков (см. табл. 5).

Согласно ОСПОРБ-99/2010⁵, эффективная доза облучения населения, обусловленная РАО, не должна превышать 0,1 мЗв в год. Как видно из таблицы 6, смягчение критериев выписки пациентов может привести к увеличению активности ^{131}I , выводимой с отходами пациентов, в транспорте и увеличению эффективной дозы облучения отдельных лиц от баков биотуалетов. Исходя из прове-



а



б

Рис. Динамика: а – содержания ^{131}I в теле пациента после введения РФЛП, меченных ^{131}I ; б – активности ^{131}I в баках биотуалета поезда в течение 48 ч нахождения пациента спустя 1 ч после выписки из отделения РНТ при мощности дозы 20 мЗв/ч [Fig. Dynamic: а – of the ^{131}I activity in patient body; б – of ^{131}I activity in the train biotilet tanks accumulated during 48-hour traveling of patient after 1 hour post release from hospital ($20 \mu\text{Sv/h}$)]

⁵ СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [Basic sanitary rules for radiation safety. Sanitary rules and regulations 2.6.1.2612-10 (In Russ.)].

Оценки выводимой активности в транспорте после РНТ и мощности эффективной дозы на расстоянии 1 м от бака биотуалета

Estimated excreted activity from patient after radiopharmaceutical therapy in transport and effective dose rate from sewage tank at 1 m

Таблица 5

[Table 5]

РФЛП [Radio- pharmaceutical]	Вид транспорта до места проживания [Transport type]	Чипига и др., 2023 [Chipiga L. et al., 2023] [5]					
		НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]			Взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Carers]		
		Выводимая активность в транспорте, МБк [Excreted activity in trans- port, MBq]	Удельная активность в баке биотуалета, Бк/г [Activity concen- tration in sewage tank, Bq/g]	МД, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]	Выводимая активность в транспорте, МБк [Excreted activity in transport, MBq]	Удельная активность в баке биотуалета, Бк/г [Activity concen- tration in sewage tank, Bq/g]	МД, мкЗв/ч [Dose rate, μSv/h]
¹³¹ I-МИБГ [¹³¹ I-mIBG]	Электропоезд /автобус [short-distance train, bus]	14	140	0,3	540	5400	11
	Поезд [long-distance train]	230	780	3,3	3400	11300	47
	Самолет [plane]	44	150	0,6	980	3300	14
	Высокоскоростной поезд [high-speed train]	27	89	0,4	920	3100	13
Na ¹³¹ I тиреотоксикоз [thyrotoxicosis]	Электропоезд/автобус [short-distance train, bus]	3,5	35	0,1	21	210	0,4
	Поезд [long-distance train]	71	235	1,0	190	630	2,7
	Самолет [plane]	12	39	0,2	55	180	0,8
	Высокоскоростной поезд [high-speed train]	6,9	23	0,1	40	130	0,6
Na ¹³¹ I пак ЩЖ [thyroid cancer]	Электропоезд/автобус [short-distance train, bus]	3	33	0,07	110	1100	2,3
	Поезд [long-distance train]	74	250	1,0	760	2500	11
	Самолет [plane]	12	38	0,2	270	890	3,7
	Высокоскоростной поезд [high-speed train]	7	22	0,09	200	670	2,8

Предельное значение отношения отходов к ЖРО для ¹³¹I – 0,62 Бк/г⁶ [Note: limit activity concentration in waste with ¹³¹I – 0,62 Bq/g].

⁶ Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069 [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012 "On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, classifying radioactive waste as special radioactive waste and as radioactive waste to be disposed of criteria for classifying radioactive waste to be disposed of" (In Russ.)]

Эффективные дозы облучения критических групп лиц от бака биотуалета за 1 поездку/рейс

Таблица 6

[Table 6]

Effective doses for the critical groups from sewage tank per 1 trip

Вид транспорта до места проживания [Transport type]	Эффективная доза, мкЗв [Effective dose, μ Sv]					
	¹³¹ I-МИБГ [¹³¹ I-mIBG]		Na ¹³¹ I тиреотоксикоз [thyrotoxicosis]		Na ¹³¹ I рак ЩЖ [thyroid cancer]	
	Пассажиры/ экипаж [Passengers/ crew]	Технический персонал [Stuff]	Пассажиры/ экипаж [Passengers/ crew]	Технический персонал [Stuff]	Пассажиры/ экипаж [Passengers/ crew]	Технический персонал [Stuff]
НРБ-99/2009 [NRB-99/2009]						
Электропоезд/автобус [short-distance train, bus]	0,6	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1
Поезд [long-distance train]	144	6,6	44	2,0	45	2,1
Самолет [plane]	4,3	1,2	1,1	0,3	1,1	0,3
Высокоскоростной поезд [high-speed train]	1,5	0,8	0,4	0,2	0,4	0,2
Чипига Л.А. и др., 2023 [5] – взрослые, осуществляющие уход за пациентом [Chipiga L. et al., 2023 [5] – carers]						
Электропоезд/автобус [short-distance train, bus]	23	23	0,9	0,9	4,6	4,6
Поезд [long-distance train]	2 100	95	117	5,3	466	21
Самолет [plane]	95	27	5,3	1,5	26	7,5
Высокоскоростной поезд [high-speed train]	51	26	2,2	1,1	11	5,6
Чипига Л.А. и др., 2023 [5] – дети, беременные, контактирующие с пациентом [Chipiga L. et al. 2023 [5] – children and pregnant women]						
Электропоезд/автобус [short-distance train, bus]	2,8	2,8	0,5	0,5	0,2	0,2
Поезд [long-distance train]	716	32	82	3,7	63	2,9
Самолет [plane]	21	6,2	3,2	0,9	1,7	0,5
Высокоскоростной поезд [high-speed train]	7,4	3,7	1,3	0,7	0,6	0,3

Жирным курсивом выделены значения доз более 0,1 мЗв⁵, жирным – более 1 мЗв [***Bold italic*** underlines the dose values more than 0,1 mSv, **bold** – more than 1 mSv].

денных в работе оценок дозы облучения отдельных лиц из населения от биологических отходов пациентов в транспорте могут быть выше 1 мЗв, и дополнительная доза может быть получена от контакта с самим пациентом.

Смягчение критериев выписки приведет к увеличению числа пациентов, выписанных после РНТ с ¹³¹I и использующих транспорт для проезда к месту проживания, и неконтролируемо образующимся РАО с ¹³¹I в транспорте. Это может приводить к более частому возникновению нештатных (аварийных) ситуаций при пересечении пациентами контрольных пунктов, оборудованных системами радиационного контроля, фиксирующими повышенные уровни ионизирующего излучения. Как показано в работе [19], выявление пациентов после РНТ с ¹³¹I занимает 3-е место среди причин возникновения радиационных аварий. Это необходимо учитывать при выписке иногородних пациентов.

Таким образом, встает вопрос о применимости смягченных радиологических критериев выписки пациентов после РНТ для иногородних пациентов, которым необ-

ходимо добираться до места жительства на общественном транспорте. Одним из решений этого вопроса может быть введение ограничения по времени передвижения пациента в общественном транспорте и/или расстоянию между пациентом и пассажиром (по виду транспорта). Однако такое решение является затруднительным с точки зрения контроля.

Другой проблемой является образование ЖРО от пациентов в общественном транспорте. Для предотвращения возможности образования ЖРО и переоблучения окружающих лиц могут быть использованы следующие решения:

– использование собственного автомобиля или спецтранспорта МО для доставки пациента до места проживания, при этом водитель должен быть отнесен к персоналу группы А или Б в зависимости от условий работы. Однако при РНТ с ¹³¹I такое решение не является в полной мере реалистичным. Перевозка пациента после РНТ спецтранспортом ограничена временем и расстоянием между МО и местом проживания пациента;

– перевод пациента из отделения РНТ в обычную палату после удовлетворения критерию выписки по мощности дозы (см. табл. 1) на время, пока удельная активность ^{131}I в отходах пациента в транспорте не станет ниже предельного значения отнесения их к ЖРО. При этом срок госпитализации для снижения активности в отходах пациентов после РНТ с ^{131}I , согласно оценкам, может достигать месяцев, что существенно увеличит затраты МО и доступность такого лечения. Кроме того, по действующему законодательству РНТ с РФЛП на основе ^{131}I не может проводиться без спецканализации, что ставит под сомнение возможность снижения удельной активности ^{131}I за счет объема системы водоотведения после выписки пациента из отделения РНТ и перевода в стационар и требует дополнительных оценок.

Поэтому целесообразно применять дифференцированный подход и выделить иногородних пациентов в отдельную категорию с сохранением для них более строгих критериев выписки (НРБ-99/2009). При этом в справках при выписке пациентов целесообразно указывать расчетные мощности дозы на расстоянии 1 м от пациента в различные временные точки после его выписки для предотвращения вопросов при радиационном контроле в транспорте и объектах транспортной инфраструктуры.

Дополнительным решением рассмотренных проблем может быть и значительное расширение сети отделений (центров) РНТ регионального уровня, исключающих использование объектов транспорта после получения медицинской помощи иногородними пациентами в крупных федеральных центрах.

Заключение

В работе представлены расчеты потенциального радиационного воздействия на пассажиров от пациентов с ^{131}I и образующихся отходов в транспорте для условий выписки по существующим критериям и возможным смягченным критериям. Полученные результаты продемонстрировали оптимальность установленных в НРБ-99/2009 критериев выписки с точки зрения радиационной безопасности окружающих лиц из населения. Попытки смягчить критерии выписки с целью увеличения числа (потока) пациентов, получающих РНТ с ^{131}I , могут привести к избыточному облучению окружающих лиц и неконтролируемо образующимся в транспорте РАО с ^{131}I . Использование смягченных критериев выписки пациентов с ^{131}I -МИБГ возможно только для пациентов, проживающих в том же населенном пункте.

Ограничения работы

Приведенные в работе оценки выведения РФЛП являются довольно грубыми и могут отличаться для индивидуальных пациентов, что связано с физиологическими различиями. Представленные значения эффективных доз облучения пассажиров и экипажа определены для условий постоянного пребывания рядом с баком биотуалета с максимальной выведенной активностью за весь промежуток времени в пути (учитывая радиоактивный распад ^{131}I в баке) и не учитывают постепенное накопление активности радионуклида в баке биотуалета. Помимо этого, при оценке выписки пациентов после РНТ использованы консервативные оценки мощности дозы от пациентов, однако мощность дозы от некоторых пациентов

может снизиться до критерия выписки раньше, что сократит срок его пребывания в медицинской организации. Эти факторы вносят дополнительную неопределенность в оценки активностей ^{131}I и доз, представленных в результате работы. Все значения в работе рассчитаны при условии передвижения одного пациента после РНТ с ^{131}I . Расчет удельных активностей в баках биотуалетов учитывает полное заполнение бака, однако меньший объем жидкости в баке повысит значения удельной активности.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Петрякова А.В. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов, обработка и анализ полученных результатов, написание текста, перевод.

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, обработка и анализ полученных результатов, написание текста статьи.

Звонова И.А. – поиск и анализ литературы, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов, редактирование текста.

Водоватов А.В. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

Горский Г.А. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

Станжевский А.А. – поиск и анализ литературы, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

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. Evaluation of Medical Exposure to Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 Report Volume I. Annex A.
2. Звонова И.А., Лихтарев И.А., Николаева А.А. Облучение щитовидной железы, сопровождающее радиойодное обследование пациентов с тиреоидными заболеваниями // Медицинская радиология. 1984. Т. 4. С. 42-44.
3. Carrasquillo J.A., Chen C.C. Neuroendocrine Tumors: Therapy with ^{131}I -MIBG. In: Strauss H., Mariani G., Volterrani D., Larson S. (eds). Nuclear Oncology. Springer, Cham. 2016. P. 1-38. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26067-9_26-1.
4. 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.
5. Чипига Л.А., Звонова И.А., Водоватов А.В. и др. Совершенствование подхода к определению радиологических критериев выписки пациентов после радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 2. С. 19-31. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31>.
6. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А. Радиологические критерии выписки пациента из клини-

- ки после радионуклидной терапии или брахитерапии с имплантацией закрытых источников // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 4. С. 5-9.
7. Zvonova I., Balonov M., Golikov V. Release criteria for patients having undergone radionuclide therapy and criteria for their crossing the state border of the Russian Federation // Radiation Protection Dosimetry. 2011. Vol. 147, № 1-2. P. 254-257. doi: 10.1093/rpd/ncr308.
8. International Atomic Energy Agency, Release of Patients After Radionuclide Therapy, Safety Reports Series No. 63. IAEA: Vienna, 2009.
9. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Interim edition. Safety Standards Series No. GSR Part 3 (interim). IAEA: Vienna, 2011.
10. International Commission on Radiological Protection. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94 // Annual ICRP. 2004. Vol. 34, No 2.
11. Jacobsson L., Mattsson S., Johansson L. et al. Biokinetics and dosimetry of ¹³¹I-metaiodobenzylguanidine (MIBG). Proc. Fourth Int. Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium. Oak Ridge 1985, Oak Ridge Assoc. Universities CONF-851113, Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, Tennessee. 1986. P. 389-398.
12. Радионуклидная диагностика для практических врачей / Под ред. Ю.Б. Лишманова, В.И. Чернова. Томск: STT, 2004. С. 317-319.
13. Willegaignon J., Crema K.P., Oliveira N.C. et al. Pediatric ¹³¹I-MIBG Therapy for Neuroblastoma: Whole-Body ¹³¹I-MIBG Clearance, Radiation Doses to Patients, Family Caregivers, Medical Staff, and Radiation Safety Measures // Clinical Nuclear Medicine. 2018. Vol. 43, No 8. P. 572-578. doi: 10.1097/RLU.0000000000002158.
14. O'Doherty M.J., Kettle A.G., Eustance C.N. et al. Radiation dose rates from adult patients receiving ¹³¹I therapy for thyrotoxicosis // Nuclear Medicine Community. 1993. Vol. 14, No 3. P. 160-8. doi: 10.1097/00006231-199303000-00003.
15. Barrington S.F., Kettle A.G., O'Doherty M.J. et al. Radiation dose rates from patients receiving iodine-¹³¹ therapy for carcinoma of the thyroid // European Journal of Nuclear Medicine. 1996. No 23. P. 123-130 doi: 10.1007/BF01731834.
16. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116 // Annual ICRP. 2010. Vol. 40, No 2-5.
17. ICRP. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53 // Annals of the ICRP. 1988. Vol. 18, No 1-4.
18. Чипига Л.А., Водоватов А.В., Звонова И.А. и др. Обращение с биологическими отходами пациентов после проведения радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 19-30. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30>.
19. Громов А.В., Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Тутельян О.Е. Сравнительный анализ информации о радиационных авариях в Российской Федерации в 2010–2022 гг. // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, №4. С. 122-133. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133>.

Поступила: 10.04.2024 г.

Петрякова 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, Городская больница №40 Курортного района. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: nastya.petryakova@gmail.com

ORCID 0000-0003-2663-9091

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

Звонова Ирина Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID 0000-0003-4340-8666

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

ORCID 0000-0002-5191-7535

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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID 0000-0001-7310-9718

Станжевский Андрей Алексеевич – доктор медицинских наук, заместитель директора по научной работе Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия
ORCID 0000-0002-1630-0564

Для цитирования: Петрякова А.В., Чипига Л.А., Звонова И.А., Водоватов А.В., Горский Г.А., Станжевский А.А. Проблемы радиационной безопасности при передвижении в общественном транспорте пациента после радионуклидной терапии с ^{131}I // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 97–108. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-97-108

Radiation safety problems during the patient traveling by public transport after radiopharmaceutical therapy with ^{131}I

Anastasia V. Petryakova^{1,2}, Larisa A. Chipiga^{1,3,4}, Irina A. Zvonova¹, Aleksandr V. Vodovатов^{1,5}, Grigory A. Gorsky^{1,6},
Andrey A. Stanzhevsky³

¹ 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

² The City Hospital No 40 of the Kurortny District, 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 Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

⁶ I. Mechnikov North Western State Medical University, Saint-Petersburg, Russia

Radiopharmaceutical therapy with ^{131}I has been one of the most common types of radiopharmaceutical therapy for many years. Radiation safety of the public is ensured by limiting the patient contacts until the radiological parameters are reduced to the established criteria. To increase the availability of the radiopharmaceutical therapy with ^{131}I , softer patient release criteria for ^{131}I have been proposed. However, early patient release may increase exposure to the public, e.g. in transport. The aim of the work is to evaluate the radiation exposure from patients with ^{131}I -MIBG and Na^{131}I on the public in transport considering the generation of biological waste. In this work, ^{131}I excretion from the body of patients in transport was evaluated for different scenarios of patient travel to the place of residence. As a result, it was found that mitigation of patient release criteria leads to an increase in the effective dose to the public in transport and an increase in the ^{131}I activity excreted with patient waste. The specific activity in the tanks of biotoilets in transport, generated after the passage of a patient with injected ^{131}I -labeled radiopharmaceuticals, exceeds the limit value of classifying liquid waste as radioactive. To optimize radiation protection of the public, it is advisable to apply a differentiated approach to release patients after therapy with ^{131}I : to group non-resident patients into a separate category retaining for them the established release criterion (without mitigation) to minimize the radiation impact on the public.

Key words: nuclear medicine, radiopharmaceutical therapy, liquid radioactive waste, radiation safety, ^{131}I -mIBG, Na^{131}I .

Limitations of the work

The radiopharmaceutical excretion estimates presented in the work are rather rough and may differ for individual patients due to physiological differences. The presented values of effective doses to passengers and crew are determined for con-

ditions of constant stay near the biotoilet tank with maximum excreted activity for the entire travel time (considering the radioactive decay of ^{131}I in the tank) and do not consider the gradual accumulation of radionuclide activity in the bio-toilet tank. In addition, conservative estimates of the dose rate from

Anastasia V. Petryakova

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

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

patients are used in the assessment of patient release after radiopharmaceutical therapy; however, the dose rate from some patients may decrease to the discharge criterion earlier, thus shortening their time in the hospital. All values in the work are calculated assuming a single patient traveling after radiopharmaceutical therapy with ^{131}I . The calculation of specific activities in biotilet tanks considers the full filling of the tank.

Authors contribution

Petryakova A.V. – search and analysis of literature, calculations, processing and analysis of results, translation.

Chipiga L.A. – scientific management of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, processing and analysis of results, writing the text of the article.

Zvonova I.A. – search and analysis of literature, calculations and interpretation of the results, editing the text of the article.

Vodovатов A.V. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Gorsky G.A. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Stanzhevsky A.A. – search and analysis of literature, discussion of the results.

Conflicts of interest

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. Evaluation of Medical Exposure to Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 Report Volume I. Annex A.
2. Zvonova IA, Likhtarev IA, Nikolaeva AA. Thyroid irradiation accompanying radioiodine examination of patients with thyroid diseases. *Meditsinskaya Radiologiya = Medical radiology*. 1984;4:42-44. (In Russian).
3. Carrasquillo JA, Chen CC. Neuroendocrine Tumors: Therapy with ^{131}I -MIBG. In: Strauss H, Mariani G, Volterrani D, Larson S. (eds). *Nuclear Oncology*. Springer: Cham; 2016. P. 1-38. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26067-9_26-1.
4. Chipiga LA, Ladanova ER, Vodovатов AV, Zvonova IA, 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) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133>.
5. Chipiga LA, Zvonova IA, Vodovатов AV, Petryakova AV, Stanzhevsky AA, Vazhenina DA, et al. Improvement of the approach to definition of patient release criteria after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(2): 19-31. (In Russian).
6. Balonov MI, Golikov VYu, Zvonova IA. Radiological criteria for patient release from clinic after radionuclide therapy of brachytherapy with sealed source implantation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 5-9. (In Russian).
7. Zvonova I, Balonov M, Golikov V. Release criteria for patients having undergone radionuclide therapy and criteria for their crossing the state border of the Russian Federation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011;147(1-2): 254-257. doi: 10.1093/rpd/ncr308.
8. International Atomic Energy Agency, Release of Patients After Radionuclide Therapy, Safety Reports Series No. 63. IAEA, Vienna; 2009.
9. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. Interim edition. Safety Standards Series No. GSR Part 3 (interim). IAEA, Vienna; 2011.
10. International Commission on Radiological Protection. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. ICRP Publication 94. *Annual ICRP*. 2004;34(2).
11. Jacobsson L, Mattsson S, Johansson L, Lindberg S, Fjalling M. Biokinetics and dosimetry of ^{131}I -metaiodobenzylguanidine (MIBG). Proc. Fourth Int. Radiopharmaceutical Dosimetry Symposium. Oak Ridge 1985, Oak Ridge Assoc. Universities CONF-851113, Oak Ridge National Laboratories. Oak Ridge, Tennessee; 1986. P. 389-398.
12. Lishmanova YuB, Chernov VI (Eds.) Radionuclide diagnostics for practitioners. Tomsk: STT; 2004. P. 317-319. (In Russian).
13. Willegaignon J, Crema KP, Oliveira NC, Pelissoni RA, Coura-Filho GB, Sapienza MT, et al. Pediatric ^{131}I -MIBG Therapy for Neuroblastoma: Whole-Body ^{131}I -MIBG Clearance, Radiation Doses to Patients, Family Caregivers, Medical Staff, and Radiation Safety Measures. *Clinical Nuclear Medicine*. 2018;43(8): 572-578. doi: 10.1097/RLU.0000000000002158.
14. O'Doherty MJ, Kettle AG, Eustance CN, Mountford PJ, Coakley AJ. Radiation dose rates from adult patients receiving ^{131}I therapy for thyrotoxicosis. *Nuclear Medicine Community*. 1993;14(3): 160-8. doi: 10.1097/00006231-199303000-00003.
15. Barrington SF, Kettle AG, O'Doherty MJ, Wells CP, Somer EJR, Coakley AJ. Radiation dose rates from patients receiving iodine-131 therapy for carcinoma of the thyroid. *European Journal of Nuclear Medicine*. 1996;23: 123–130 doi: 10.1007/BF01731834.
16. International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116. *Annual ICRP*. 2010;40(2-5).
17. ICRP. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53. *Annals of the ICRP*. 1988;18(1-4).
18. Chipiga LA, Vodovатов AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Petryakova AV, Anokina EE, et al. Management of biological waste of patients after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 19-30. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30>.
19. 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. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-122-133>.

Received: April 10, 2024

For correspondence: Anastasia V. Petryakova – 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 of the Kurortny District (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: nastya.petryakova@gmail.com)

ORCID 0000-0003-2663-9091

Larisa A. Chipiga – Ph.D., research fellow, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human 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

Irina A. Zvonova – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0003-4340-8666

Aleksandr V. Vodovatov – Ph.D., Head of Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; docent, Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0002-5191-7535

Grigory A. Gorsky – Ph.D., 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

ORCID 0000-0001-7310-9718

Andrey A. Stanzhevsky – M.D., Deputy Director for Research, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint-Petersburg, Russia

ORCID 0000-0002-1630-0564

For citation: Petryakova A.V., Chipiga L.A., Zvonova I.A., Vodovatov A.V., Gorsky G.A., Stanzhevsky A.A. Radiation safety problems during the patient traveling by public transport after radiopharmaceutical therapy with ¹³¹I. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 97–108. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-97-108

Предпочтительные способы кулинарной обработки лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС

К.В. Варфоломеева, С.А. Зеленцова, В.С. Репин

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

В статье представлены результаты анализа данных анкетного опроса о предпочтениях в выборе способов кулинарной обработки разных видов лесных грибов жителями наиболее загрязненных юго-западных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. В период с 2019 по 2022 г. специалистами Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева было проведено очное анкетирование взрослого населения. В анкеты, помимо общих вопросов о респонденте, входили вопросы о видовом составе грибной корзины, объеме и доле потребления каждого вида грибов респондентом и членами его семьи (как в текущем, так и в прошлом году), а также способы кулинарной обработки потребляемых грибов. На основании анализа данных индивидуальных опросов была выбрана группа, в состав которой вошли 1311 респондентов, в рацион питания которых входят разные виды грибов. Анализ результатов опросов показал, что респонденты предпочитают заготавливать большую долю свежесобранных лесных грибов (59%) для длительного хранения (маринование, заморозка, сушка, соление и др.); 41% грибов потребляется сразу. Наиболее популярными видами предварительной обработки свежесобранных грибов являются промывание и отваривание (34 и 26% соответственно). При заморозке, мариновании и солении до 97% респондентов проводят предварительную обработку (промывание, вымачивание и/или отваривание) свежесобранных грибов. Менее популярными способами заготовки грибов (от 2 до 4%) являются соление, сушка и жарка свежих грибов с их последующей консервацией. Таким образом, большая часть респондентов активно используют различные виды кулинарной обработки с применением предварительных этапов обработки в виде промывания, вымачивания и (или) отваривания. Использование вышеперечисленных способов предварительной кулинарной обработки свежесобранных грибов приводит к снижению содержания ^{137}Cs в потребляемом продукте.

Ключевые слова: авария на Чернобыльской АЭС, Брянская область, радиоактивное загрязнение, ^{137}Cs , лесные грибы, опросы населения, кулинарная обработка грибов.

Введение

Потребление радиоактивно загрязненных пищевых продуктов лесного происхождения в настоящее время является одним из важных факторов формирования дозы внутреннего облучения у населения, проживающего на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

В разные годы после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) вклад грибной составляющей в пищевой рацион населения, проживающего на юго-западных территориях Брянской области, сильно варьировал, что отражалось на дозе внутреннего облучения. По данным ряда публикаций, в период с 1986 по 2011 г. вклад грибов в дозу внутреннего облучения населения варьировал от 4 до 80% [1], а с 2015 г. наметилась некоторая тенденция к снижению

его роли в формировании дозы внутреннего облучения [1 – 3].

По данным опросов о структуре рационов питания населения юго-западных районов Брянской области, потребление грибов в период с 2019 по 2022 г. в среднем на одного жителя составляло 4,7 кг/год [4].

На величину дозы внутреннего облучения вследствие потребления грибов влияют такие факторы: уровни радиоактивного загрязнения территорий, в границах которых население собирает грибы; типы почв в местах их произрастания; климатические условия в период сезона их сбора; урожайность и традиционные видовые предпочтения при сборе грибов (каждый вид грибов характеризуется своей накопительной способностью радионуклидов [5, 6]), а также доля, уровень потребления каждого вида

Варфоломеева Ксения Владимировна

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

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

грибов в рационе питания населения и вид их кулинарной обработки.

По данным многолетних исследований, обычно применяемые способы предварительной обработки грибов (сухая чистка, промывание, вымачивание) и кулинарной обработки (варка, жарка с предварительным промыванием и вымачиванием, заморозка с предварительной варкой, маринование, соление) являются эффективным путем снижения уровней поступления ^{137}Cs в организм человека, а значит, и уменьшения вклада в дозу внутреннего облучения от потребления грибов [7–14].

Для количественной оценки эффективности кулинарной обработки грибов используется коэффициент кулинарного снижения, учитывающий остаточное содержание ^{137}Cs в конечных продуктах [15]. Иногда его также называют коэффициентом удержания ^{137}Cs при обработке грибов [11, 16]. По данным разных исследований, снижение содержания ^{137}Cs в конечном продукте в зависимости от способа кулинарной обработки варьирует от 15 до 99%. Сухая чистка и водная обработка – вымачивание и (или) вываривание – снижает содержание ^{137}Cs в грибах от 15 до 85% [8, 10, 11]. В процессе засолки и маринования грибов доля снижения ^{137}Cs в конечном потребляемом продукте варьирует от 50 до 94% [8, 10, 11, 17]. Отмечено, что некоторые способы приготовления грибов могут приводить к концентрированию ^{137}Cs в готовых продуктах, например, жарка без предварительной обработки свежесобранных грибов способствует увеличению концентрации ^{137}Cs в потребляемом продукте вследствие испарения воды [18–20]. Сушка грибов также приводит к увеличению удельной активности ^{137}Cs в них (от 3 до 10 раз). С другой стороны, обработка сушеных грибов (мытьё, вымачивание, варка) позволяет снизить содержание ^{137}Cs от 62 до 99% в готовом продукте [14]. Коэффициент снижения содержания ^{137}Cs в разных видах грибов при применении разных способов кулинарной обработки отличается до 3 раз [1]. Наиболее предпочтительными способами обработки свежесобранных грибов являются их предварительное вымачивание и отваривание [12, 21, 22].

Для оценки текущего и прогнозируемого поступления ^{137}Cs с лесными грибами в организм человека важно учитывать уровни потребления наиболее предпочитаемых местным населением видов грибов и коэффициенты кулинарного снижения (удержания) ^{137}Cs в зависимости от способов, применяемых к их кулинарной обработке. В ранее опубликованной нами статье представлены материалы по изучению уровней потребления и видовой структуры грибного рациона местного населения [4].

Цель исследования – выявить предпочтительные способы кулинарной обработки и заготовки лесных грибов (далее грибов) жителями юго-западных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы

В рамках реализации мероприятий «Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС» [23] специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (далее ФБУН НИИРГ) в период с 2019 по 2022 гг. проводили опрос местного населения. Опрос респондентов проводили среди взрослого населения (18 лет и старше) методом очного анкетирования [24] по индивидуальной опросной анкете¹ [25]. Описание районов проведения анкетирования приведено в публикациях [4, 26].

По результатам анкетирования респондентов была собрана информация и сформирован массив данных по уровням потребления населением разных видов грибов [4] и способам их кулинарной обработки и заготовки.

Анализ уровней потребления разных видов грибов в зависимости от способа их кулинарной обработки выполнен по результатам опросов 1311 респондентов (средний возраст 49 лет), проживающих в 86 НП (табл. 1), находящихся в границах территорий с плотностью загрязнения почвы ^{137}Cs свыше 1 Кз/км² (37 КБк/м²) [27].

Таблица 1

Количество опрошенных респондентов в населенных пунктах радиоактивно загрязненных районов Брянской области

[Table 1]

Number of interviewed respondents in settlements of the radioactively contaminated districts of the Bryansk region

Район исследования [Study district]	Количество НП, шт. [Number of settlements]	Количество респондентов [Number of respondents]
Гордеевский [Gordeevsky]	10	90
Злынковский [Zlynkovsky]	6	73
Климовский [Klimovsky]	24	352
Клинцы (г.о) [Klinsky (urban district)]	2	92
Клинцовский [Klintsovsky]	18	276
Красногорский [Krasnogorsky]	12	240
Новозыбковский (г.о) [Novozybkovsky (urban district)]	1	19
Новозыбковский [Novozybkovsky]	13	169
ВСЕГО [TOTAL]:	86	1 311

С целью выявления наиболее часто используемых способов кулинарной обработки грибов у респондентов уточняли, сколько раз они применяли те или иные способы кулинарной обработки (варка, жарка, жарка с после-

¹ Методические рекомендации МР 2.6.1.0006-10 «Проведение комплексного экспедиционного радиационно-гигиенического обследования населенного пункта для оценки доз облучения населения». М.: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 10 с. [MR 2.6.1.0006-10. Carrying out of the comprehensive expeditionary radiation-hygienic survey of the settlement to assess population exposure doses. Methodical guidelines. Moscow: Rospotrebnadzor; 2010. 10 p. (In Russ.)]

дующей консервацией, заморозка, засолка, маринование, сушка) при приготовлении различных видов грибов. Затем выясняли основные этапы приготовления грибов: 1 – чистка, мойка; 2 – вымачивание; 3 – отваривание. В случаях приготовления грибов с предварительным вымачиванием и отвариванием уточняли количество этапов обработки, длительность, использование соли.

Результаты и обсуждение

Анализ результатов опросов 1311 респондентов позволил выявить предпочтительные способы кулинарной обработки и заготовки разных видов лесных грибов. Доли потребления респондентами разных видов грибов в зависимости от способа их кулинарной обработки приведены в таблице 2.

По результатам анализа данных опроса респондентов (см. табл. 2) установлено, что 41% собранных респондентами грибов потребляются ими в сезон сбора, а 59% применяются для заготовок длительного хранения.

Предпочтительным способом кулинарной обработки свежесобранных грибов является жарка – 34% (см. табл. 2). Анализ результатов опроса показал, что перед жаркой свежесобранных грибов все респонденты их чистят, 34% опрошенных их промывают, 16% – вымачивают и 26% – отваривают. Все этапы предварительной кулинарной обработки грибов используют 14% опрошенных.

Наиболее предпочитаемыми способами кулинарной обработки грибов при заготовке для длительного хранения являются маринование и заморозка (23 и 19% соответственно). Существует два способа маринования грибов (с предварительным вымачиванием и отвариванием и без предварительного отваривания – сырые грибы кладут в кипящий маринад). Ввиду того, что предварительная обработка приводит к снижению содержания ¹³⁷Cs в потребляемом продукте, при опросе респондентов уточняли методы обработки грибов перед маринованием. Результаты опросов показали, что 97% респондентов перед маринованием свежесобранных грибов пред-

Доли потребления респондентами грибов в зависимости от способа их кулинарной обработки

Таблица 2

[Table 2]

Average consumption of mushrooms depending on the cooking method]

Виды грибов [Mushroom species (rus. / lat.)]	Общее количество респондентов [Total number of respondent]	Способ кулинарной обработки [Cooking method]							Не указан [Not specified]
		В сезон сбора, доля¹,% [Consumed in the season, customer portion,%]		Заготовлено для длительного хранения, доля¹,% [Preserves stocked / Harvesting mushrooms for long-term storage customer portion,%]					
		Варка [Boiling]	Жарка / тушение [Pan-broil/ stewing]	Жарка с консер- вированием [Canned fried]	Заморозка [Frozen]	Маринование [Vinegar pickling]	Соление [Coring]	Сушка [Drying]	
Все грибы [All mushrooms]	1 311	7	34	2	19	23	3	4	8
Белый гриб [Сер] / (<i>Boletus edulis</i>)	360	5	32	2	21	23	1	8	8
Лисичка [Chanterelle] / (<i>Cantharellus cibarius</i>)	238	3	47	4	22	9	1	0	14
Масленок [Annulated boletus] / (<i>Suillus luteus</i>)	148	10	22	1	20	36	0	1	10
Подосиновик [Orange-cup boletus] / (<i>Leccinum aurantiacum</i>)	83	5	41	1	16	18	1	5	13
Подберезовик [Rough boletus] / (<i>Leccinum scabrum</i>)	63	6	38	2	16	17	2	5	14
Опенок [Honey fungus] / (<i>Armillaria mellea</i>)	66	8	29	2	17	41	0	0	3
Сыроежка [Russule] / (<i>Russula</i>)	22	0	73	0	14	5	0	0	8
Рыжик (Orange milkcap) / (<i>Lactarius deterrimus</i>)	31	0	42	0	16	26	13	0	3
Рядовка [Yellow knight] / (<i>Tricholoma equestre</i>)	27	4	30	0	19	37	7	0	3
Разные виды [Different mushroom species]	273²	15	29	0	18	25	7	6	0

¹ – доля от числа респондентов, использующих данный вид заготовки и потребления [¹portion of the respondents used this method of mushrooms cooking];

² – респонденты, использующие для кулинарной обработки смеси из разных видов грибов [² – respondents who used mixtures of different types of mushrooms for cooking]

варительно их отваривают, из них 48% их дополнительно вымачивают. При заморозке грибов 92% респондентов предварительно их отваривают, а 42% из них дополнительно грибы вымачивают.

Наименее используемыми способами кулинарной обработки (от 2 до 4%) являются соленье, сушка и жарка свежих грибов с их последующей консервацией (см. табл. 2). Перед засаливанием грибов 64% респондентов предварительно их вымачивают, 36% – дополнительно отваривают, используют оба способа (вымачивание и варка) 12% респондентов.

В работе [14] было показано, что мытье, замачивание и варка ведут к снижению (иногда существенному) содержания ^{137}Cs в потребляемых после обработки грибов. Применение кулинарной обработки грибов в различных сочетаниях и при различных способах их заготовки является залогом существенного снижения поступления радионуклидов в организм человека.

Заключение

Согласно проведенным в период с 2019 по 2022 г. индивидуальным опросам 1311 респондентов, проживающих на радиоактивно загрязненных территориях Брянской области, установлено, что 41% свежесобранных грибов респонденты потребляют в сезон сбора. Предпочтительным (34%) является потребление грибов в жареном виде.

Опросы показали, что 59% свежесобранных грибов респонденты используют для приготовления заготовок длительного хранения (маринование, заморозка, сушка, соленье и др.). Преимущественным способом являются маринование (23%) и замораживание (19%).

Выявленное в процессе опроса применение предварительных этапов кулинарной обработки способствует уменьшению содержания ^{137}Cs в потребляемом продукте.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Варфоломеева К.В. – поиск и анализ литературных данных, опрос респондентов в 2020 и 2022 гг., систематизация и обработка массива данных анкетных опросов по потреблению грибов и видов их кулинарной обработки, статистическая обработка результатов и их оформление, написание, редактирование и окончательное оформление статьи.

Зеленцова С.А. – обработка данных анкетных опросов для последующего анализа, редактирование промежуточных вариантов и окончательного текста статьи.

Репин В.С. – планирование и общее руководство выполнением исследования, редактирование промежуточных вариантов и окончательного текста статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заведующей лабораторией внутреннего облучения А.А. Братиловой за оказание содействия в проведении исследований, сотрудникам Т.В. Жеско, Т.А. Кормановской, а также О.С. Кравцовой и О.С. Баженовой (в период проведения исследований являлись сотрудниками ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) за возможность использования полученных ими результатов анкетного опроса для обобщения. Авторы выражают благодарность рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Работа была выполнена на основе данных, полученных при выполнении государственного контракта от 18 октября 2019 г. № 0173100001419000019 в рамках Программы совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, утвержденной постановлением Советом министров Союзного государства от 29 августа 2019 г. № 8.

Литература

1. Панов А.В., Марочкина Е.В., Пономаренко В.В. О роли грибов в формировании доз внутреннего облучения населения, проживающего на радиоактивно загрязненных в следствии аварии на ЧАЭС территориях // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 1. С. 63–70.
2. Братилова А.А., Брук Г.Я. Влияние потребления различных пищевых продуктов на формирование доз внутреннего облучения взрослого населения Российской Федерации после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 2. С. 53–59. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-2-53-59.
3. Панов А.В., Комарова Л.Н., Ляпунова Е.Р., Мельникова А.А. Вклад содержащих радионуклиды пищевых продуктов в формирование доз внутреннего облучения населения юго-запада Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2023. Т. 32, № 3. С. 26–37. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-3-26-37.
4. Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Репин В.С. Структура потребления лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС. Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 4. С. 55–83. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2023-16-4-55-63>.
5. Кадука М.В., Басалаева Л.Н., Бекашева Т.А. и др. Радиоактивное загрязнение грибов в отдаленный период после аварии на ЧАЭС. Сборник материалов междунауч.-практ. конф. «Радиационно-гигиенические последствия и уроки аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 года. Санкт-Петербург: ФБУН им. П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. С. 111–115.
6. Зарубина Н.Е., Тришин В.В. Радионуклидное загрязнение высших грибов в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Сборник трудов междунауч. конф. «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий», Москва 5–6 декабря 2005. М., 2005. Т. 3. С. 109–118.
7. Rautavaara A. Radioactivity of vegetables and mushrooms in Finland after the Chernobyl accident in 1986 Supplement 4 to Annual Report STUK A55. Finland, 1987. 94 p.
8. IAEA. Modelling of resuspension, seasonality and losses during food processing: First report of the VAMP terrestrial working group. IAEA. Vienna, 1992. P. 35–52.
9. Корзун В.Н. Рациональное питание и технология приготовления блюд при радиационном заражении окружающей среды // Здоровье и питание. 1998. № 2. С. 12–13.
10. IAEA. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. TECDOC-1616. IAEA, Vienna. 2009.
11. Balonov M.I., Barnett C.L., Belli M. et al. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments: International Atomic Energy Agency Energy Agency (Technical reports series,

- ISSN 0074–1914; no. 472). ISBN 978-92-0-113009-9. – EDN ZTQYGT. Vienna, 2010. 194 p.
12. Шутов В.Н., Кадука М.В., Кравцова О.С. и др. Защита от радиации. Научно-популярное пособие. СПб., 2011. 88 с.
 13. Варфоломеева К.В. Содержание цезия-137 в домашних заготовках грибов в 2014 году у жителей Территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена. 2015. Т. 8, № 3. С. 47–55.
 14. Варфоломеева К.В. Кулинарная обработка сушеных грибов как эффективный способ снижения содержания в них цезия-137 // Радиационная гигиена. 2019. Т. 2, № 4. С. 82–88. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-82-88.
 15. Богдевич И., Санжарова Н., Пристер Б. Тарасюк С. Контрмеры в отношении природных и сельскохозяйственных районов после аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. Дж. Колейка. Роль ГИС в снятии облака с Чернобыля. Научная серия НАТО. Springer: Dordrecht, 2002. Т. 10. DOI: 10.1007/978-94-010-0518-0_12.
 16. Long S., Pollard D., Cunningham J.D. et al. The effects of food processing and direct decontamination techniques on the radionuclide content of foodstuffs: A literature review, Part 2: Meat, fruit, cereals and drinks // Journal of Radioecology. 1995. Vol. 3. P. 15–38.
 17. IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. Technical Report Series №364. IAEA: Vienna, 1994. P. 84.
 18. Falandysz J., Saba M., Strumiska-Parulska D. ¹³⁷Cs, ⁴⁰K and total K in Boletus edulis at different maturity stages: Effect of braising and estimated radiation dose intake // Chemosphere. 2021. No 268. P. 129336. DOI: 10.1016.
 19. Falandysz J., Meloni D., Fernandes A.R. Effect of drying, blanching, pickling and maceration on the fate of ⁴⁰K, total K and ¹³⁷Cs in bolete mushrooms and dietary intake // Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 29, № 1. P. 742–754. DOI: 10.1007/s11356-021-15523-9.
 20. Falandysz J., Wang Y., Saniewskid M. Caesium-137, potassium-40 and potassium in raw and deep-oil stir-fried mushroom meals from Yunnan in China // Journal of Food Composition and Analysis. 2020. Vol. 91. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103538>.
 21. Памятка для населения, проживающего на территории, загрязненной радиоактивными веществами. Минск: Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, 2000. 16 с.
 22. Стасевич Г.С., Гиндюк Н.Т. Формирование здорового образа жизни населения, проживающего на территориях, загрязненных радионуклидами. Памятка для медицинских работников, 2005. 23 с.
 23. Программа совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС. URL: <https://rusbelmeteo.ru/programs/chernobylunionprogram> (Дата обращения 20.02.2023).
 24. Репин Л.В., Библин А.М., Вишнякова Н.М. и др. Проблемы риск-коммуникации: методические подходы к использованию социологических данных в планировании информационной работы с населением по вопросам радиационной безопасности // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 3. С. 50–57. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-50-57.
 25. Травникова И.Г. Динамика изменений рационов питания населения Брянской области, живущего на территориях, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 26–32.
 26. Романович И.К., Базюкин А.Б., Барковский А.Н. и др. Результаты современных радиационно-гигиенических обследований приграничных с Республикой Беларусь населенных пунктов Брянской области Российской Федерации. Часть 1: Характеристика населенных пунктов // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 22–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-22-36.
 27. Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240 / Под ред. С.М. Вакуловского, подготовил В.Н. Яхрюшин. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2023. 228 с.

Поступила: 11.03.2024 г.

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

Зеленцова Светлана Александровна – 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

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

Для цитирования: Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Репин В.С. Предпочтительные способы кулинарной обработки лесных грибов жителями загрязненных районов Брянской области в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 109–116. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-109-116

Preferred techniques for forest mushrooms cooking by residents of contaminated areas of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident

Kseniya V. Varfolomeeva, Svetlana A. Zelentsova, Viktor S. Repin

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

The article presents results of the analysis of questionnaire survey data on preferences in the choice of cooking methods of different types of forest mushrooms by residents of the most contaminated south-western districts of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. In the period from 2019 to 2022, the employees of Federal Budgetary Institution of Science «Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev» conducted a face-to-face questionnaire survey of the adult population. In addition to general questions about the respondent, the questionnaires included questions about the species composition of the mushroom basket, the volume and proportion of consumption of each type of mushroom by the respondent and his family members (both in the current and last year), as well as methods of culinary processing of the mushrooms consumed. Based on the analysis of individual survey data, a group of 1 311 respondents, whose diet included various types of mushrooms, was selected. Analysis of the survey results shows that respondents prefer to process a large proportion of freshly picked forest mushrooms (59%) for long-term storage (pickling, freezing, drying, salting, etc.); 41% of mushrooms are consumed immediately. The most popular pretreatments of freshly picked mushrooms are washing and boiling (34 and 26%, respectively). When freezing, pickling and pickling up to 97% of respondents carry out pre-treatment (rinsing, soaking and / or boiling) of freshly picked mushrooms. Less popular methods of the mushroom preparation (from 2 to 4%) are pickling, drying and frying of fresh mushrooms with their subsequent preservation. Thus, the majority of respondents actively use various types of culinary processing with the use of preliminary stages of technological processing in the form of rinsing, soaking and (or) boiling. The use of the above methods of pre-cooking of freshly harvested mushrooms leads to a decrease in the ^{137}Cs content in the consumed product.

Key words: Chernobyl NPP accident, Bryansk region, radioactive contamination, ^{137}Cs , population surveys, forest mushrooms, cooking.

Personal contribution of authors

Varfolomeeva K.V. – literature data search and analysis, survey of respondents in 2020 and 2022, systematization and processing of the questionnaire survey data set, statistical processing of the results and their design, writing, editing and finalization of the article.

Zelentsova S.A. – processing of questionnaire data for further analysis, editing of intermediate versions and the final text of the article.

Repin V.S. – general management of the research, editing of the intermediate and final text of the article.

Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

Information about the source of funding

The work was done on the basis of data obtained during the execution of the state contract No. 0173100001419000019 dated October 18, 2019 within the framework of the Program of joint activities of Russia and Belarus within the Union State on protection of the population and rehabilitation of the territories affected by the Chernobyl NPP catastrophe,

approved by the Resolution of the Council of Ministers of the Union State No. 8 dated August 29, 2019.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to A.A. Bratilova, Head of the Laboratory of Internal Exposure at the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, for assistance in conducting the research, employees T.V. Zhesko, T.A. Kormanovskaya, as well as O.S. Kravtsova and O.S. Bazhenova (during the period of research they were employees of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing) for the opportunity to use the results of the questionnaire survey obtained by them. The authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments and suggestions.

References

1. Panov AV, Marochkina EV, Ponomarenko VV. On the role of mushrooms in the internal dose formation to the population in the Chernobyl NPP accident affected areas. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(1): 63-70. (In Russian).

Kseniya V. Varfolomeeva

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

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

2. Bratilova AA, Bruk GYa. Influence of the consumption of different foodstuffs on the internal exposure dose formation in the adult population of the Russian Federation after the accident at the Chernobyl NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(2): 53-59. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-2-53-59>
3. Panov AV, Komarova LN, Lyapunova ER, Melnikova AA. Contribution of radionuclide-containing foodstuffs to the formation of internal doses to the population of the south-west of Bryansk region after the Chernobyl accident. *Radiatsia i Risk = Radiation and Risk*. 2023;32(3): 26-37. (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-3-26-37.
4. Varfolomeeva KV, Zelentsova SA, Repin VS. Consumption structure of forest mushrooms by residents of contaminated districts of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(4): 55-63. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-4-55-63.
5. Kaduka MV, Basalaeva LN, Bekyasheva TA, Ivanov SA, Salazkina NV, Stupina VV, et al. Radioactive contamination of mushrooms in the remote period after the Chernobyl accident. Collection of materials int. scientific-practical. conf. "Radiation and hygienic consequences and lessons from the accident at the Chernobyl nuclear power plant and the Fukushima-1 nuclear power plant", St. Petersburg, April 22–23, 2021. St. Petersburg: Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. P. 111-115. (In Russian).
6. Zarubina NE, Trishin VV. Radionuclide contamination of higher fungi as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. Collection of works int. conf. "Radioactivity after nuclear explosions and accidents", Moscow December 5-6, 2005. Moscow; 2005. Vol. 3. P. 109-118. (In Russian).
7. Rautavaara A. Radioactivity of vegetables and mushrooms in Finland after the Chernobyl accident in 1986. Supplement 4 to Annual Report STUK A55. Finland; 1987. 94 p.
8. IAEA. Modelling of resuspension, seasonality and losses during food processing: First report of the VAMP terrestrial working group. IAEA: Vienna; 1992. P. 35-52.
9. Korzun VN. Rational diet and cooking technology considering the radioactive contamination of the environment. *Zdorovie i pitanie = Health and diet*. 1998;2: 12-13. (In Russian).
10. IAEA. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. TECDOC-1616. IAEA, Vienna. 2009.
11. Balonov MI, Barnett CL, Belli M, Barnett CL, Beresford N. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments: International Atomic Energy Agency Energy Agency (Technical reports series, ISSN 0074–1914; no. 472). Vienna; 2010. 194 p.
12. Shutov VN, Kaduka MV, Kravtsova OS, Parkhomenko VI, Samoilenko VM. Protection from radiation. Popular science manual. Spb: Textbook; 2011. 88 p. (In Russian).
13. Varfolomeeva KV. Content of Cs-137 in homemade preserves of mushrooms picked in 2014 by local residents in areas affected by radioactive contamination after Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 47-55. (In Russian).
14. Varfolomeeva KV. Cooking of the dried mushrooms as an effective solution for the reduction of the ¹³⁷Cs concentration. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 82-88. (In Russian). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-4-82-88>.
15. Bogdevich I, Sanzharova N, Priester B, Tarasiuk S. Countermeasures for natural and agricultural areas after the Chernobyl accident. Ed.: Kolejka J. The role of GIS in Chernobyl cloud removal. NATO Science Series. Springer: Dordrecht; 2002. Vol. 10. (In Russian). DOI: 10.1007/978-94-010-0518-0_12.
16. Long S, Pollard D, Cunningham JD, Astasheva NP, Donskaya GA, Labetsky EV. The effects of food processing and direct decontamination techniques on the radionuclide content of foodstuffs: A literature review, Part 2: Meat, fruit, cereals and drinks. *Journal of Radioecology*. 1995;3: 15–38.
17. IAEA. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. Technical Report Series № 364. IAEA: Vienna; 1994. P. 84.
18. Falandysz J, Saba M, Strumiska-Parulska D. ¹³⁷Cs, ⁴⁰K and total K in Boletus edulis at different maturity stages: Effect of braising and estimated radiation dose intake. *Chemosphere*. 2021;268: 129336. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129336. Epub 2020 Dec 17. PMID: 333599944.
19. Falandysz J, Meloni D, Fernandes AR, Saniewski M. Effect of drying, blanching, pickling and maceration on the fate of ⁴⁰K, total K and ¹³⁷Cs in bolete mushrooms and dietary intake. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;29(1): 742–754. DOI: 10.1007/s11356-021-15523-9.
20. Falandysz J, Wang Y, Saniewski M, Alwyn R. Caesium-137, potassium-40 and potassium in raw and deep-oil stir-fried mushroom meals from Yunnan in China. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2020;91: 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103538>.
21. Reminder Leaflet for Population Residing in Areas Contaminated by Radioactive Substances. Minsk: Committee on Problems of Chernobyl NPP Accident Impact; 2000. 16 p. (In Russian).
22. Stasevich GS, Gindjuk NT. Formation of a healthy lifestyle of the population living in the territories contaminated with radionuclides [Promotion of Healthy Way of Life Among Population Residing in Areas Contaminated by Radionuclides]. Reminder Card for Healthcare Workers; 2005. 23 p. (In Russian).
23. The program of joint activities of Russia and Belarus within the framework of the Union state for the protection of the population and rehabilitation of the territories affected by the disaster at the Chernobyl nuclear power plant. Available from: <https://rusbelmeteo.ru/programs/chernobylunionprogram>. (Accessed 20 Feb 2023). (In Russian).
24. Repin LV, Biblin AM, Vishnyakova NM, Sokolov NV, Davydov AA. Problems of risk communication: methodological approaches to the use of sociological data in planning of information work with the population on radiation safety issues. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(3): 50-57. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-3-50-57. (In Russian).
25. Travnikova IG. The dynamics of food rations of Bryansk region population living in the territories contaminated after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(3): 26-32. (In Russian).
26. Romanovich IK, Bazyukin A.B, Barkovsky AN, Biblin AM, Bratilova AA, Bruk GYa, et al. Results of modern radiation-hygienic surveys of settlements of Bryansk Oblast of the Russian Federation bordering the Republic of Belarus. Part 1: Characteristics of the settlements. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 22-36. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-22-36. (In Russian).
27. Data on radioactive contamination of the territory of settlements of the Russian Federation with cesium-137, strontium-90 and plutonium-239+240 / Ed. SM Vakulovsky, prepared by VN Yakhryushin. Obninsk: FGBU "NPO "Typhoon"; 2023. 228 p. (In Russian).

Received: March 11, 2024

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

Svetlana A. Zelentsova – Junior Researcher of the Laboratory of Ecology, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint-Petersburg, Russia

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

For citation: Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Repin V.S. Preferred techniques for forest mushrooms cooking by residents of contaminated areas of the Bryansk region in the remote period after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 109–116. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-109-116

Радиационное обследование территории села Териберка и острова Кильдин Мурманской области

Ю.В. Гущина, Н.К. Шандала, В.А. Серегин, Д.В. Исаев, В.Г. Старинский, А.А. Шитова, А.А. Филонова

Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

Арктическая зона является стратегически важной территорией Российской Федерации с точки зрения социально-экономической и научно-технологической составляющих, а также в аспекте планирования развития системы обеспечения национальной обороны, государственной и общественной безопасности. Интенсивное освоение и развитие арктических территорий в сочетании с быстро меняющейся средой вследствие глобальных климатических изменений несет в себе ряд рисков для окружающей среды, что определяет необходимость оценки потенциального экологического ущерба и определения значимости факторов возможного негативного воздействия на уникальные арктические экосистемы в настоящее время и в будущем. В статье представлены актуальные данные радиационного исследования прибрежной зоны районов проживания населения, близлежащих к месту затопления атомной подводной лодки «К-159» — села Териберка и острова Кильдин Мурманской области, а также морской акватории с целью оценки первичных уровней содержания техногенных и природных радионуклидов перед началом работ по потенциальному подъему затопленного объекта. Данная работа выполнена в рамках реализации Государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» (утв. Постановлением Правительства РФ от 26 декабря 2017 г. № 1640). Отражены результаты измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на открытой местности и определения содержания техногенных и природных радионуклидов в пробах объектов окружающей среды (почва, водная растительность, морские гидробионты) и пищевых продуктов местного происхождения и производства (грибы, ягоды, рыба, молоко). Результаты исследований показали, что состояние исследуемой территории в целом стабильное по радиационному фактору, содержание радионуклидов находится на фоновом уровне. В рамках выполнения данной работы разработаны электронные модули базы данных по полученным результатам радиационного мониторинга в селе Териберка и на острове Кильдин. Получено Свидетельство № 2022621890 о регистрации базы данных с результатами радиационной обстановки вышеупомянутых территорий.

Ключевые слова: Арктическая зона, атомная подводная лодка, радиационное исследование, среднегодовая эффективная доза населения, техногенные радионуклиды.

Введение

Арктическая зона является перспективной территорией субъектов Российской Федерации с позиции обеспечения национальной безопасности, социально-экономического и научно-технологического развития. Реализация инновационных и конкурентоспособных проектов в Арктике приобретает особую важность для формирования стратегических национальных приоритетов. Основной задачей является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики и повышения качества жизни и благосостояния населения.

Освоение новых месторождений суши и прибрежно-шельфовой зоны, увеличение уровня транзитного грузопотока по Северному морскому пути и объёмов пере-

валки грузов в портах Арктического бассейна определяют необходимость оценки потенциального экологического ущерба и определения значимости факторов возможного негативного воздействия на уникальные арктические экосистемы в настоящее время и в будущем.

Вследствие глобальных выпадений продуктов ядерных испытаний, размещения значительного количества промышленных, оборонных и народно-хозяйственных объектов (атомные станции, Северный флот ВМФ России, судоремонтные и судостроительные заводы как гражданского, так и военного профиля) и проведенных в 1957–1992 гг. СССР/Россией захоронений твердых радиоактивных отходов (ТРО) в акваториях Карского и Баренцева морей экосистема Арктики в большей степе-

Гущина Юлия Валерьевна

Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна

Адрес для переписки: 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46; E-mail: yuliyagushina@yandex.ru

ни подвергается потенциальному риску радиоактивного загрязнения. К возможным источникам загрязнения также следует отнести реакторные отсеки атомных подводных лодок (АПЛ), оказавшиеся на морском дне в результате аварий [1].

Прежде всего, это затонувшая в Баренцевом море АПЛ «К-159» (ныне «Б-159»). 30 августа 2003 г. АПЛ в надводном состоянии переводилась на утилизацию и вследствие шторма, потеряв остойчивость, затонула в Баренцевом море, в 3 милях к северо-западу от острова Кильдин [2]. На момент затопления на борту лодки находилось около 800 кг отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Общая активность радионуклидов в реакторах на борту на момент затопления оценивалась в 7,4 ПБк.

Комплексные исследования, включающие радиационно-экологический мониторинг, в месте затопления АПЛ «К-159» проводились с 2003 по 2014 г. [3, 4], что позволило сделать вывод о неизменности радиационной обстановки с момента ее гибели. Мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на палубе корабля, в морской воде и донных отложениях имела фоновые значения. Визуальный осмотр «К-159» показал, что значительного обрастания и заиливания корпуса не произошло. Явных коррозионных повреждений, вызванных нахождением АПЛ в морской воде, не наблюдалось.

Проведение полноценных радиационных исследований сухопутной территории в районе возможного влияния выброса радионуклидов в случае образования самопроизвольной цепной реакции (СЦП) не осуществлялось.

Для мониторинга текущей радиационной обстановки на территории села Териберка имеется пост Мурманской территориальной автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (МТ АСКРО), фиксирующий мощность дозы гамма-излучения, и пункт отбора проб морской воды для определения содержания Sr-90. Исследование других параметров и объектов радиационного мониторинга на данной территории не проводится. Радиационный мониторинг в районе острова Кильдин до данного момента не был реализован, поэтому судить об оценке возможного влияния предполагаемой деятельности по поднятию АПЛ «К-159» на население и окружающую среду затруднительно.

В целом, по данным радиационно-гигиенической паспортизации Мурманской области (2012–2020 гг.), МАЭД на ее территории регистрировалась в пределах 0,09–0,16 мкЗв/ч, что соответствует среднегодовым значениям естественного радиационного фона. Плотность загрязнения почвы Cs-137 находится на уровне значений глобальных выпадений и не превышает средних статистических показателей. За весь период наблюдения превышение гигиенических нормативов^{1,2} по содержанию Sr-90 и Cs-137 в пищевых продуктах, как местного происхождения, так и во ввозимых на территорию области, не зарегистри-

ровано. Среднее значение годовой эффективной дозы облучения населения за счет всех источников ионизирующего излучения составило в среднем 3,899 мЗв/год [5].

Основываясь на проанализированных литературных данных, можно сделать вывод об отсутствии данных по отдельным параметрам при проведении радиационного мониторинга на территории села Териберка и острова Кильдин.

Цель и задачи исследования

Принимая во внимание намеченные планы по подъему и утилизации затопленных и затонувших АПЛ, необходимым видится проведение радиационного мониторинга на территориях, находящихся в непосредственной близости к местам их нахождения, что позволит оценить потенциальное изменение содержания радионуклидов и оперативно выявить и предотвратить неблагоприятные последствия для окружающей среды и здоровья населения. Особое внимание следует уделить созданию базы данных радиационных исследований для выработки механизмов принятия решения и информирования населения.

Материалы и методы

В качестве территорий исследований, которые в большей мере могут подвергнуться радиационному загрязнению, были выбраны остров Кильдин и село Териберка Мурманской области.

Териберка – село в Кольском районе Мурманской области, расположенное в 130 км от города Мурманска (рис. 1). Численность населения села с каждым годом уменьшается и сократилась до 957 человек. Однако стоит отметить, что с 2014 г. увеличился туристический поток в данном направлении. В среднем село посещают 2000 иностранных и российских туристов ежегодно.

Кильдин – остров в Баренцевом море, который находится в 1,5 км от Мурманского берега Кольского полуострова (см. рис. 1). На данный момент на острове население отсутствует. На востоке острова находится рыболовно-охотничья база, предназначенная для размещения туристов.

В ходе экспедиционных выездов проводились измерения следующих радиационных параметров:

- МАЭД;
 - удельной активности техногенных радионуклидов в почве и грунте, донных отложениях;
 - удельной активности техногенных радионуклидов в пищевых продуктах (грибы, ягоды, рыба, молочная продукция);
 - объемной (удельной) активности техногенных радионуклидов в морской воде и водной растительности.
- Отбор проб объектов окружающей среды и пищевых продуктов проводился в соответствии с действующими нормативами.

¹ СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» [Sanitary Regulations and Standards 2.3.2.1078-01 'Hygienic requirements for safety and nutritional value of food products' (In Russ.)]

² ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» [Technical Regulations of the Customs Union 'On the Safety of Food Products' (In Russ.)]



Рис. 1. Карта расположения села Териберка и острова Кильдин
[Fig. 1. Location map of Teriberka village and Kildin Island]

ющими нормативными документами и методическими указаниями^{3,4,5,6,7}.

Точки отбора проб почвы и грунта располагались равномерно по площади исследуемой территории, на участках с ненарушенным почвенным покровом. Отбирались пробы массой 1 кг из поверхностного 5-сантиметрового слоя.

Отбор проб морской воды производился путем выемки на расстоянии 1–2 м от берега одинаковых по объему проб воды (5,0 л). Далее вода самотеком пропусклась через сорбент «АНФЕЖ» (Россия)⁸, после чего сорбент отправлялся на спектрометрический анализ в лабораторию. Точки отбора проб морской воды выбирались на

участках прибрежной акватории, свободной от водной растительности и других предметов.

В качестве пищевых продуктов местного происхождения, потребление которых дает основной вклад в дозу внутреннего облучения населения за счет техногенных источников, принимались дикорастущие грибы, ягоды, рыба и молоко местного производства.

Измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в отобранных пробах проводились спектрометрическим методом на гамма-спектрометре фирмы «CANBERRA» (США) с германиевым блоком детектирования в соответствии с методикой выполнения измерений⁹.

Определение удельной активности Sr-90 в отобранных пробах проводилось на радиометрических установках УМФ-2000 (Россия) после радиохимического выделения в соответствии с методическими указаниями^{10,11}.

Измерения МАЭД проводились на высоте 1 м от поверхности земли с помощью портативных спектрометрических установок МКС-01А «Мультирад-М» (Россия) и МКС-АТ6101С (Республика Беларусь) методом непрерывной пешеходной гамма-съемки с привязкой к географическим координатам в соответствии с методическими рекомендациями¹².

Все исследования по изучению содержания радионуклидов в пробах объектов окружающей среды были выполнены в Испытательном лабораторном центре Гигиенического мониторинга (ИЛЦ ГМ) ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (Номер в реестре аккредитованных лиц – № RA.RU.215Y01 от 17.08.2015).

³ ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб [State standard 31861-2012. 'Water. General requirements for sampling' (In Russ.)]

⁴ ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб [State standard 17.4.3.01-2017. 'Nature protection. Soils. General requirements for sampling' (In Russ.)]

⁵ ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа [State standard 'Nature protection. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis' (In Russ.)]

⁶ ГОСТ Р 53123-2008 (ИСО 10381-5:2005). Качество почвы. Отбор проб. Часть 5. Руководство по изучению городских и промышленных участков на предмет загрязнения почвы [State standard R 53123-2008 (ISO 10381-5:2005). 'Soil quality. Sampling. Part 5. Guidelines for the examination of urban and industrial sites for soil contamination' (In Russ.)]

⁷ ГОСТ 32164-2013. Продукты пищевые. Метод отбора проб для определения стронция Sr-90 и цезия Cs-137 [State standard 32164-2013. Food products. Sampling method for the determination of strontium Sr-90 and cesium Cs-137 (In Russ.)]

⁸ Методика измерений удельной активности радионуклидов цезия в растворах. Рег. номер ФР.1.40.2015.21030. Редакция 2015 г. [Measurement procedure for specific activity of cesium radionuclides in solutions. Reg. number FR.1.40.2015.21030. Edition 2015. (In Russ.)]

⁹ Методика выполнения измерений активности гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с применением гамма-спектрометрической системы LabSOCS. ООО НТЦ «РАДЕК» [Methodology of gamma-emitting radionuclide activity measurements in counting samples using LabSOCS gamma-spectrometric system. ООО НТЦ 'RADEK' (In Russ.)]

¹⁰ МУК 4.3.2503-09. Стронций-90. Определение удельной активности в пищевых продуктах [Methodological guidelines 4.3.2503-09. Strontium-90. Determination of specific activity in foodstuffs (In Russ.)]

¹¹ МУК 2.6.1.033-2003. Стронций-90. Определение концентрации в почве экстракцией моноизооктиловым эфиром метилфосфоновой кислоты иттрия-90 [Methodological guidelines 2.6.1.033-2003. Strontium-90. Determination of the concentration in soil by extraction with yttrium-90 monoisoctyl ether of methylphosphonic acid (In Russ.)]

¹² МУ 2.6.1.2398-08. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности [Methodological guidelines 2.6.1.2398-08. 2.6.1 Ionizing radiation, radiation safety. Radiation control and sanitary-epidemiologic assessment of land plots for construction of residential houses, buildings and structures of public and industrial purposes in terms of radiation safety (In Russ.)]

Результаты исследования

Мощность дозы гамма-излучения

В ходе экспедиционного выезда в село Териберка (2020 г.) и на остров Кильдин (2021 г.) проведена пешеходная гамма-съемка местности.

По результатам измерений установлено, что значение мощности дозы гамма-излучения на территории села Териберка находится в пределах от 0,03 до 0,29 мкЗв/ч. Карты маршрутов пешеходной гамма-съемки и полученные результаты исследований приведены на рисунке 2.

На локальных участках села Териберка можно наблюдать повышенные значения МАЭД – 0,29 мкЗв/ч. Данный факт объясняется тем, что основной вклад в мощность дозы определяется подстилающими горными породами.

Карты маршрутов пешеходной гамма-съемки и полученные результаты исследований на острове Кильдин приведены на рисунке 3.

Удельная активность радионуклидов в пробах объектов окружающей среды

На территории села Териберка и острова Кильдин была проведена оценка содержания техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды. На рисунках 4 и 5 отмечены места отбора проб.

Места отбора проб выбирались с учетом охвата большей территории, а также с точки зрения наибольшего пребывания людей, наличия туристических маршрутов и рекреационных зон.

Почва

Отбор проб почв производился согласно ГОСТ 17.4.4.02-20175.

В таблице 1 приведены результаты анализа проб почвы на содержание техногенных и природных радионуклидов в исследуемых районах.

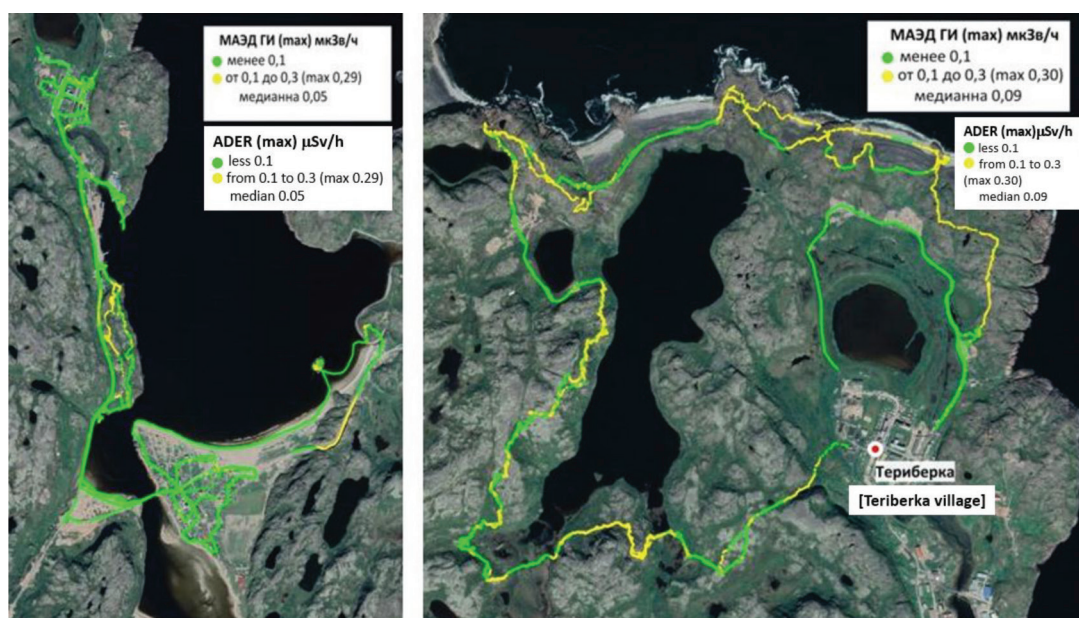


Рис. 2. Картограмма значений МАЭД на территории села Териберка
[Fig. 2. Cartogram of ADER values in the territory of Teriberka village]



Рис. 3. Картограмма значений МАЭД по результатам пешеходной гамма-съемки на территории острова Кильдин
[Fig. 3. Cartogram of ADER values based on the results of pedestrian gamma survey in the territory of Kildin Island]

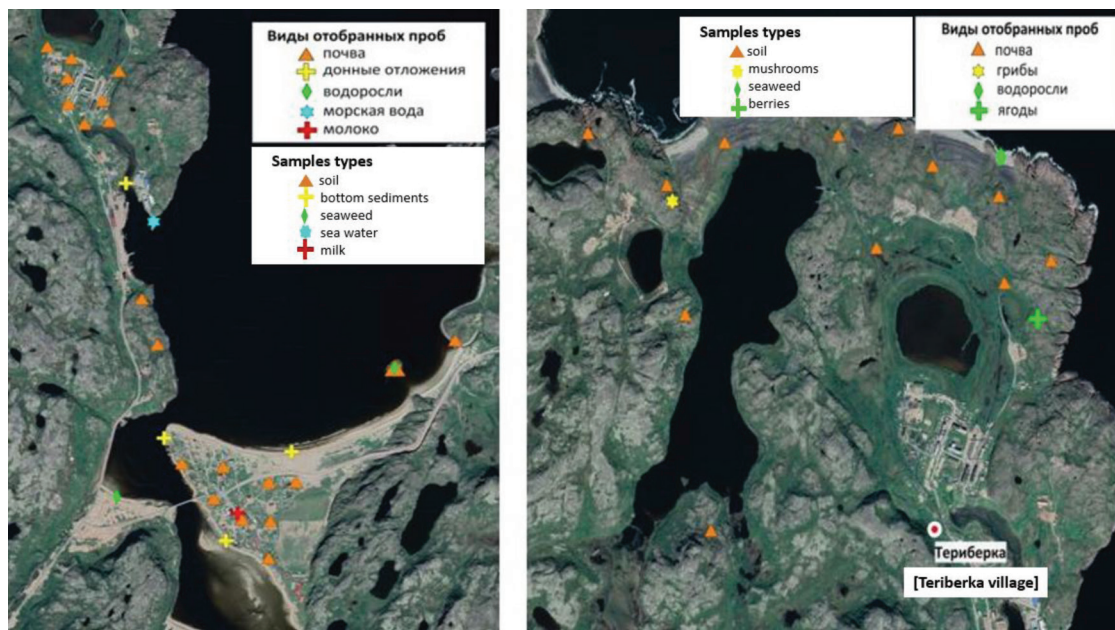


Рис. 4. Карта отбора проб в селе Териберка по видам проб
[Fig. 4. Map of sampling in Teriberka village by sample type]



Рис. 5. Карта отбора проб на острове Кильдин по видам проб
[Fig. 5. Map of sampling on Kildin Island by sample type]

Диапазон значений удельной активности радионуклидов в почве и грунте

Таблица 1

[Table 1]

Range of values of specific activity of radionuclides in soil and subsoil

Территория [Location]	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг [Range of values of specific activity, Bq/kg]					
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²³⁵ U
Село Териберка [Teriberka village]						
Село Териберка [Teriberka village]	0,1–12,8 (6,45)	0,2–21,0 (10,6)	2,3–16,0 (9,15)	3,3–13,0 (8,15)	65–440 (252,5)	0,1–1,4 (0,75)
Окрестности села Териберка [Teriberka village neighborhoods]	0,1–12,1 (6,1)	0,8–92,0 (46,4)	1,4–122,0 (61,7)	3,3–61 (32,15)	20–607 (313,5)	0,6–6,9 (3,75)

Территория [Location]	Диапазон значений удельной активности, Бк/кг [Range of values of specific activity, Bq/kg]					
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²³⁵ U
Губа Долгая [Dolgaya Bay]	0,4–10 (5,2)	0,1–40 (24,55)	1,6–8,4 (5)	0,1–12 (6,05)	14–324 (169)	0,3–0,8 (0,55)
Бухта Зеленецкая [Zelenetskaya Creek]	0,2–12 (6,1)	0,3–19 (9,65)	3–9 (6)	2,5–8,9 (5,7)	38–384 (211)	0,1–1,1 (0,6)
Губа Опасова [Opasova Bay]	0,4–23 (11,7)	0,7–16 (8,35)	5–12 (8,5)	10–17 (13,5)	316–679 (497,5)	0,1–0,4 (0,25)
Бухта Безымянная [Bezimyannaya Creek]	0,3–1,5 (0,9)	16–18 (17)	2,2–2,8 (2,5)	4–6,1 (5,05)	269–300 (284,5)	0,1–0,3 (0,2)
Остров Кильдин [Kildin Island]						
Восточный Кильдин [East Kildin]	0,3–6,0 (0,7)	1–60 (17,5)	2,2–22,2 (14,5)	1,8–24,1 (14,5)	10,8–614,7 (406)	0,2–2,9 (1,3)
Западный Кильдин [West Kildin]	0,4–2,6 (1,5)	4–102 (37)	10–25 (20)	11,7–27,5 (16)	307–615 (502)	0,4–2,5 (2,4)
Аэродром [Aerodrome]	0,1–0,5 (0,3)	0,4–0,8 (0,4)	17–18 (17,5)	17–18 (17,5)	570–630 (600)	1,9–2,5 (2,2)
Южная дорога [South Road]	0,1–1,2 (0,5)	1,2–72,0 (6,5)	15–24 (19)	14–28,1 (27,5)	315–713 (582)	1,2–2,8 (2,45)
Верхний Кильдин [Verkhny Kildin]	0,3–1,0 (0,3)	0,9–35,7 (2,8)	3,4–28,8 (15)	2–37,4 (19)	38,4–802,1 (497)	0,1–3,3 (1,5)
Остров Кильдин (территория вне обозначен- ных локаций) [Kildin Island (area outside the designated locations)]	0,2–11,9 (0,7)	0,7–82,5 (25)	3,7–24 (14)	2,4–29,8 (15)	29–724 (390)	0,5–3,6 (1,3)

В скобках указано медианное значение удельной активности радионуклидов.

[The median value of specific activity of radionuclides is given in brackets.]

Значения приведены с учётом расширенной неопределённости измерений (P=0,95).

[Values are given considering the expanded measurement uncertainty (P=0.95).]

Значения удельной активности Cs-137 на территории села Териберка и прилегающих территориях лежит в диапазоне от 0,1 до 92 Бк/кг, на территории острова Кильдин – от 0,4 до 102 Бк/кг. Полученные результаты свидетельствуют о пятнистом характере загрязнения почвы данным радионуклидом. Однако при сравнении полученных значений с нормативным показателем удельной активности техногенных радионуклидов, при которых допускается неограниченное использование твердых материалов¹³, полученные значения Cs-137 в почве исследуемых территорий не превышают 100 Бк/кг. Только в одной пробе почвы удельная активность Cs-137 составила 102 Бк/кг. Медианное значение удельной активности Cs-137 в почве на территории, где была отобрана данная проба, составляет 37 Бк/кг, что может говорить о соответствии территории критериям неограниченного использования твердых материалов¹³.

Донные отложения

Содержание радионуклидов в пробах донных отложений, отобранных на территории села Териберка и в морских бухтах фоновых районов, варьирует в следующих пределах: Cs-137 – от 0,3 до 1,2 Бк/кг, Sr-90 – от 0,1 до 0,6 Бк/кг; на острове Кильдин – Cs-137 от 0,3 до 0,7 Бк/кг, Sr-90 – от 0,1 до 0,4 Бк/кг.

Полученные данные показывают, что донные отложения в районе проживания населения по содержанию техногенного радионуклида Cs-137 не противоречат литературным данным [3] и составляют менее 3–5 Бк/кг.

Морская вода

Содержание Cs-137 в морской воде вблизи села Териберка составляет 0,3 Бк/м³, что сопоставимо со среднегодовым содержанием данного радионуклида в Баренцевом море (1,71 Бк/м³) [6]. Значение удельной

¹³ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. № 40 «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)» [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated April 26, 2010 N 40 «On approval of SP 2.6.1.2612-10 «Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB 99/2010)» (In Russ.)]

активности Cs-137 в морской воде Баренцева моря вблизи острова Кильдин составило 1,07 Бк/м³ и также не превышает среднего значения объемной активности Cs-137 в поверхностных водах Баренцева моря за 2013–2017 гг.

*Морская биота, наземная растительность
и пищевые продукты местного производства*

Обобщенные данные по содержанию техногенных радионуклидов в образцах морской биоты, наземной растительности и пищевых продуктов местного производства села Териберка и острова Кильдин представлены в таблице 2.

Таблица 2
Диапазон значений удельной активности Sr-90 и Cs-137 в селе Териберка на острове Кильдин в пробах объектов окружающей среды, Бк/кг

[Table 2]
Range of values of specific activity of Sr-90 и Cs-137 in Teriberka village on Kildin Island in environmental samples, Bq/kg]

Вид пробы [Sample type]	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Водоросли [Seaweed]	0,5–17 (2,0)	0,2–2,3 (0,7)
Грибы [Mushrooms]	0,3–0,9 (0,6)	4,0–4,7 (4,3)
Ягоды [Berries]	<0,5	8–9,1 (8,3)
Рыба [Fish]	0,1–1,1 (0,4)	0,1–0,2 (0,15)
Молоко [Milk]	0,4–1,6 (1)	0,1–0,3 (0,2)
Водоросли, морская растительность [Seaweed, marine vegetation]	0,3–0,7 (0,5)	0,1–0,4 (0,2)
Мясо краба [Crab meat]	0,3–0,7 (0,5)	<0,03
Рыба [Fish]	0,3–1,1 (0,7)	<0,07
Грибы [Mushrooms]	0,3–1,0 (0,6)	3,1–4,5 (3,7)
Мхи и лишайники [Mosses and lichens]	0,5–1,5 (1,0)	0,2–0,3 (0,2)
Ягоды [Berries]	0,1–0,16 (0,13)	4–4,5 (4,2)

В скобках указано медианное значение удельной активности радионуклидов.

[The median value of specific activity of radionuclides is given in brackets.]

Значения приведены с учётом расширенной неопределённости измерений (P=0,95).

[Values are given considering the expanded measurement uncertainty (P=0.95).]

Измеренное значение удельной активности Cs-137 в пробе дикорастущих трубчатых грибов не превышает значение допустимого уровня (500 Бк/кг) содержания данного радионуклида^{1,2}.

Содержание Sr-90 и Cs-137 в молоке варьирует от 0,5 до 1,6 Бк/кг и от 0,2 до 0,3 Бк/кг соответственно. Данные уровни на несколько порядков ниже гигиенических нормативов^{1,2} для молока (Cs-137 – 100 Бк/кг, Sr-90 – 25 Бк/кг).

Содержание Sr-90 в рыбе составляет 0,3–1,1 Бк/кг, Cs-137 – 0,03–0,09 Бк/кг. Нормативные значения^{1,2} (100 Бк/кг по Sr-90 и 130 Бк/кг по Cs-137) не превышены.

Содержание Cs-137 в дикорастущих ягодах на порядок ниже гигиенических нормативов^{1,2} (Cs-137 – 160 Бк/кг).

Обсуждение результатов

Результаты, представленные на рисунках 2 и 3, демонстрируют, что МАЭД на территории села Териберка и острова Кильдин соответствует уровню естественного фона Мурманской области.

Значения удельной активности Cs-137 в почве в селе Териберка и на острове Кильдин (см. табл. 1) свидетельствуют о неравномерном пятнистом характере загрязнения данным радионуклидом. Нормативные уровни¹³ не превышены (100 Бк/кг). Медианное значение удельной активности Cs-137 в почве на территории с максимальными значениями (102 Бк/кг, Западный Кильдин) составляет 37 Бк/кг, что свидетельствует о соответствии территории критериям неограниченного использования твердых материалов¹³.

Анализ значений активности Cs-137 в донных отложениях на протяжении более чем 30 лет [7] позволяет сделать вывод, что донные отложения Баренцева моря в районе острова Кильдин и села Териберка характеризуются низкими уровнями содержания техногенных радионуклидов, которые сравнимы с фоновыми региональными значениями. Данный факт можно объяснить низкими уровнями Cs-137 в воде. Известно, что при низких концентрациях в морской воде цезий образует ионную форму Cs⁺, которая имеет тенденцию оставаться в водной среде, слабо сорбироваться взвесью, а значит, в незначительной степени накапливаться в донных осадках [8].

Одним из важных путей облучения населения является пероральный путь поступления радионуклидов в организм человека. По этой причине особое внимание уделялось пищевым продуктам местного происхождения.

Сопоставив значения активности Cs-137 и Sr-90 в ягодах, грибах и рыбе (см. табл. 2) с данными радиационного контроля за 2011–2020 гг. [5], можно судить о том, что в пищевых продуктах местного происхождения в селе Териберка и на острове Кильдин нет превышения содержания техногенных радионуклидов над региональными значениями. Согласно нормативным документам^{1,2}, допустимые уровни содержания Cs-137 в ягодах установлены на уровне 160 Бк/кг, в грибах – 500 Бк/кг, при этом Sr-90 не нормируется. Нормативные уровни для отобранных проб ягод и грибов не превышены.

Содержание Cs-137 в водорослях в 1980-е гг. в Баренцевом море варьировало от 7–10 Бк/кг сухой массы. Начиная с 1990-х гг. по 2018 г. уровни Cs-137 и Sr-90 заметно снизились и составляют от 0,2 до 0,8 Бк/кг и 0,1–1,0 Бк/кг соответственно [9].

В целом, можно сделать вывод о том, что радиационная обстановка характеризуется фоновыми значениями содержания техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды.

В рамках выполнения данной работы разработаны электронные модули базы данных (БД) по полученным результатам радиационного мониторинга в селе Териберка и на острове Кильдин (рис. 6). Получено Свидетельство № 2022621890 о регистрации базы данных с результатами радиационной обстановки вышеупомянутых территорий.

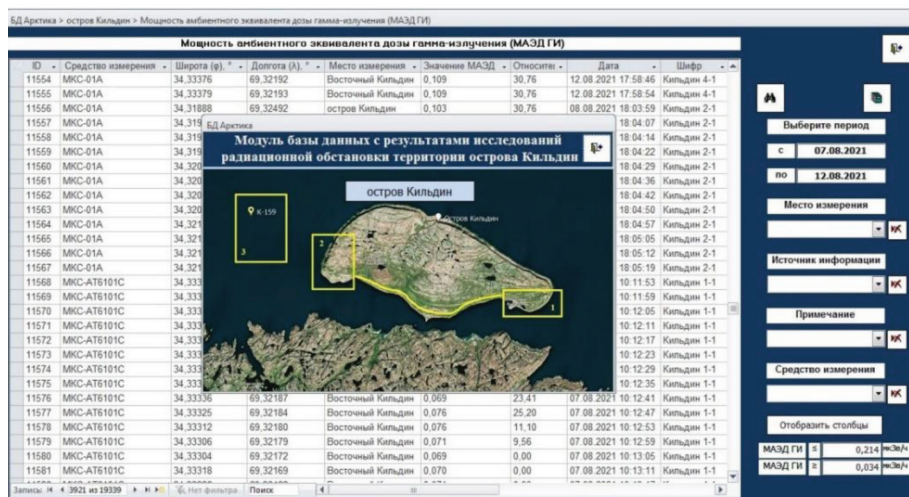


Рис. 6. Графическая форма базы данных
[Fig. 6. Graphical form of database]

Закключение

Проведены радиационные исследования прибрежной зоны районов проживания населения, близлежащих к объектам затопления ядерно и радиационно опасных объектов, для характеристики состояния территорий проживания населения по радиационному фактору перед намечаемой хозяйственной деятельностью в Арктике, в том числе предполагаемому подъему затопленных и затонувших объектов. На основании полученных данных получена оценка радиационного состояния территории и морской акватории села Териберка и острова Кильдин.

1. Установлено, что уровни МАЭД на исследуемых территориях соответствуют естественному гамма-фону региона и не превышают среднегодовое значение для Мурманской области.

2. Почвы и донные отложения в районе проживания населения по содержанию техногенных радионуклидов Cs-137 и Sr-90 удовлетворяют требованиям неограниченного использования материалов.

3. Показано, что уровни загрязнения радионуклидами Cs-137 и Sr-90 пищевых продуктов, морской воды и др. на несколько порядков ниже соответствующих нормативов.

Состояние исследуемой территории, в целом, стабильное по радиационному фактору. Содержание радионуклидов находится на фоновом уровне.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Гущина Ю.В. – написание текста статьи, редактирование.

Шандала Н.К. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта текста статьи.

Сергеев В.А. – научное консультирование, редактирование текста статьи.

Исаев Д.В. – сбор и обработка полученных в ходе исследования данных.

Старинский В.Г. – написание текста статьи, редактирование.

Шитова А.А. – сбор литературного материала.

Филонова А.А. – научное консультирование, редактирование текста.

Информация о конфликте интересов

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

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось по Государственному контракту № 10.004.20.0 от 9 июня 2020 г. с ФМБА России в рамках реализации Государственной программы Российской Федерации «Развитие здравоохранения» (утв. Постановлением Правительства РФ от 26 декабря 2017 г. № 1640).

Литература

1. Разработка концепций экологической реабилитации арктических морей от затопленных радиационно опасных объектов ИБРАЭ РАН. URL: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/465/> (дата обращения 13.09.2023).
2. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая хитина-2000»). М.: ИздАТ, 2005. С. 117-118.
3. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. М., 2015. С. 120-133.
4. Казеннов А.Ю. Проведение радиационного мониторинга АПЛ Б-159. Материалы российско-британской группы экспертов, 15 августа 2007 г. М., 2007. 9 с.
5. Ежегодный доклад о состоянии окружающей среды Мурманской области (2011-2020 гг.). URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/> (дата обращения: 12.09.2023).
6. Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С. Техногенная радиоактивность вод центрального полярного бассейна и смежных районов Арктики // Доклады академии наук. 2019. Т. 485, №1. С. 93-98. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485193-9>.

7. Параскив А.А., Мирзоева Н.Ю., Мирошниченко О.Н. Содержание радионуклидов цезия в воде и донных отложениях Баренцева моря. Система Баренцева моря / под ред. академика А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. 672 с. DOI:10.29006/978-5-6045110-0-8/(36).
8. Никитин Е.Д. Современное почвоведение и сохранение биосферы // Почвоведение. М., 1991. № 4. С. 59-70.
9. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С. и др. Концентрация искусственных радиоизотопов в биоте арктического шельфа в современных условиях (2013–2018 гг.) // Доклады российской академии наук. Науки о земле. 2020. Т. 494, № 1. С.71-75. DOI:10.31857/S2686739720090133.

Поступила: 16.11.2023 г.

Гущина Юлия Валерьевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной коммунальной гигиены, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России. **Адрес для переписки:** 123098, Москва, ул. Живописная, д. 46; E-mail: yuliyagushina@yandex.ru

ORCID 0000-0002-5953-4475

Шандала Наталия Константиновна – доктор медицинских наук, заместитель генерального директора по науке и биофизическим технологиям, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID 0000-0003-1290-3082

Серегин Владимир Александрович – старший научный сотрудник лаборатории радиационной коммунальной гигиены, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID 0000-0001-9883-1571

Исаев Дмитрий Викторович – старший научный сотрудник лаборатории радиационной коммунальной гигиены, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID 0000-0002-9687-628X

Старинский Виталий Григорьевич – руководитель Испытательного лабораторного центра Гигиенического мониторинга, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID 0000-0003-1026-3472

Шитова Анастасия Александровна – младший научный сотрудник лаборатории радиационной коммунальной гигиены, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID 0000-0002-9584-4286

Филонова Анна Александровна – старший научный сотрудник лаборатории радиационной коммунальной гигиены, Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Россия

ORCID 0000-0002-0832-2878

Для цитирования: Гущина Ю.В., Шандала Н.К., Серегин В.А., Исаев Д.В., Старинский В.Г., Шитова А.А., Филонова А.А. Радиационное обследование территории села Териберка и острова Кильдин Мурманской области // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 117–127. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-117-127

Radiation survey of the territory of Teriberka village and Kildin Island of Murmansk Region

Iuliia V. Gushchina, Nataliya K. Shandala, Vladimir A. Seregin, Dmitriy V. Isaev, Vitaliy G. Starinskiy, Anastasiya A. Shitova, Anna A. Filonova

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

The Arctic zone is a strategically important territory of the Russian Federation from the point of view of socio-economic, scientific, and technological components, as well as in terms of planning the development of a system for ensuring national defense, state, and public security. Intensive exploration and development of Arctic territories, combined with a rapidly changing environment due to global climate change, carries a few risks for the environment. This determines the need to assess potential environmental damage and determine the significance of factors of potential negative impact on unique Arctic ecosystems now and in the future. The article presents current data from a radiation survey of the coastal zone of residential areas close to the site of the sinking of the nuclear submarine 'K-159' – Teriberka village and Kildin Island, Murmansk region, as well as the sea area to assess the primary levels of man-made and natural radionuclides before starting work on the potential lifting of the submerged object. This work was carried out as part of the implementation of the State Program of the Russian Federation 'Health Development' (approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated December 26, 2017, No. 1640). The results of measuring the ambient dose equivalent rate of gamma radiation in open areas and determining the content of man-made and natural radionuclides in samples of environmental media (soil, aquatic vegetation, marine aquatic organisms) and food products of local origin and production (mushrooms, berries, fish, milk). The research results showed that the state of the study area is generally stable in terms of the radiation factor, the content of radionuclides is at the background level. As part of this work, electronic database modules have been developed based on the results of radiation monitoring in Teriberka village and on Kildin Island. Certificate No. 2022621890 was received on registration of a database with the results of the radiation situation of the above-mentioned territories.

Key words: Arctic zone, nuclear submarine, radiation survey, annual average effective public dose, man-made radionuclides.

Personal contribution of authors

Gushchina Iu.V. – writing the text of the article, editing.
Shandala N.K. – the concept and design of the study, approval of the final version of the article.
Seregin V.A. – scientific consulting, editing the text of the article.
Isaev D.V. – collection and processing of data obtained during the study.
Starinsky V.G. – writing the text of the article, editing.
Shitova A.A. – collection of literary material.
Filonova A.A. – scientific consulting, editing the text 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 financed under State Contract No. 10.004.20.0 dated June 09, 2020, with the FMBA of Russia as part of the implementation of the State Program of the Russian Federation 'Health Development' (approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated December 26, 2017, No. 1640).

References

1. Development of Concepts of Ecological Rehabilitation of Arctic Seas from Submerged Radiation Hazardous Facilities IBRAE RAS [Internet]. Available from: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/465/> [Accessed 13 Sep 2023] (In Russian).
2. Sivintsev YV, Vakulovsky SM, Vasiliev AP, Vysotsky VL, Gubin AT, Danilyan VA, et al. Technogenic Radionuclides in the Seas Washing Russia. Radioecological Consequences of Radioactive Waste Disposal in the Arctic and Far Eastern Seas ('White Book-2000'). Moscow, Izdat; 2005. P. 117-118 (In Russian).
3. Sarkisov AA, Sivintsev YV, Vysotsky VL, Nikitin VS. Atomic legacy of the Cold War at the bottom of the Arctic. Moscow; 2015. P. 120-133 (In Russian).
4. Kazennov AY. Carrying out radiation monitoring of the nuclear submarine B-159. Materials of the Russian-British Group of Experts, August 15, 2007, Moscow; 2007. 9 p. (In Russian).
5. Annual report on the state of the environment of the Murmansk region (2011-2020) [Internet]. Available from: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/> [Accessed 11 Aug 2023] (In Russian).
6. Matishov GG, Kasatkina NE, Usyagina IS. Technogenic radioactivity of the waters of the central polar basin and adjacent Arctic areas. *Doklady akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*. 2019(1): 93-98. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485193-9> (In Russian).

Iuliia V. Gushchina

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center

Address for correspondence: Zhivopisnaya Str., 46; Moscow, 123098, Russia; E-mail: yuliagushina@yandex.ru

7. Paraskiv AA, Mirzoeva NYu, Miroshnichenko ON. Cesium radionuclide content in water and bottom sediments of the Barents Sea. System of the Barents Sea. Ed. by Academician A.P. Lisitsyn. Moscow: GEOS, 2021. 672 p. DOI:10.29006/978-5-6045110-0-8/(36) (In Russian).
8. Nikitin ED. Modern soil science and biosphere conservation. *Pochvovedenie = Soil Science*. Moscow. 1991;(4):59-70 (In Russian).
9. Matishov GG, Ilyin GV, Usyagina IS, Valuyskaya DA, Kirillova EE. Concentration of artificial radioisotopes in the biota of the Arctic shelf in modern conditions (2013-2018). *Doklady russiyskoy akademii nauk. Nauki o zemle = Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2020;494(1): 71-75. DOI:10.31857/S2686739720090133 (In Russian).

Received: November 16, 2023

For correspondence: Iuliia V. Gushchina – Junior Researcher of Laboratory of Radiation Public Hygiene, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia (Zhivopisnaya Str., 46; Moscow, 123098, Russia; E-mail: yuliyagushina@yandex.ru)

ORCID 0000-0002-5953-4475

Nataliya K. Shandala – M.D., Ph.D., Science and Biophysics Technologies Deputy Director General, Doctor of Medical Science, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID 0000-0003-1290-3082

Vladimir A. Seregin – Senior Researcher of Laboratory of Radiation Public Hygiene, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID 0000-0001-9883-1571

Dmitriy V. Isaev – Senior Researcher of Laboratory of Radiation Public Hygiene, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID 0000-0002-9687-628X

Vitaly G. Starinskiy – Head of the Testing Laboratory Center for Hygienic Monitoring of State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID 0000-0003-1026-3472

Anastasiya A. Shitova – Junior Researcher of Laboratory of Radiation Public Hygiene, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID 0000-0002-9584-4286

Anna A. Filonova – Senior Researcher of Laboratory of Radiation Public Hygiene, State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia

ORCID 0000-0002-0832-2878

For citation: Gushchina Iu.V., Shandala N.K., Seregin V.A., Isaev D.V., Starinskiy V.G., Shitova A.A., Filonova A.A. Radiation survey of the territory of Teriberka village and Kildin Island of Murmansk Region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 117–127. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-117-127

К вопросу регулирования радона в Российской Федерации. Дискуссия по материалам публикации «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению»

И.К. Романович, Т.А. Кормановская, Д.В. Кононенко

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 данной статье представлены комментарии, замечания и мнения по поводу материала, изложенного в статье «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению» Цапалова А.А., Микляева П.С., Петровой Т.Б., Кувшинникова С.И., опубликованной в журнале «Аппаратура и новости радиационных измерений» (АНРИ) № 1 за 2024 г.

Ключевые слова: радон, торон, регулирование, гармонизация, гигиенический норматив, референтный уровень, радонозащитные мероприятия, средства измерений, методики измерений, национальная радоновая программа, национальный план действий.

В № 1 за 2024 г. журнала «Аппаратура и новости радиационных измерений» (АНРИ) опубликована статья «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению» Цапалова А.А., Микляева П.С., Петровой Т.Б., Кувшинникова С.И. [1]. В рамках дискуссии по вопросу регулирования радона в Российской Федерации мы хотим обсудить опубликованный материал и дать научную оценку отдельным его тезисам.

Статья опубликована в уважаемом научном издании авторским коллективом, в состав которого входят известные российские ученые, о научных изысканиях и точке зрения которых по ряду вопросов относительно принципов нормирования уровней содержания радона в воздухе помещений и подходов к измерениям мы хорошо осведомлены и чью научную позицию уважаем.

Вызывает некоторое удивление общий тон статьи, являющийся, на наш взгляд, недопустимым для научной полемики и избыточный некорректными оценками роли учреждений Роспотребнадзора и, в частности, ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в обеспечении радиационной

безопасности населения страны, в сочетании со словами «саботаж», «неадекватная методология» и т.п.

Прежде всего стоит сказать, что предлагаемые и продвигаемые Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) и Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) принципы регулирования радиационной безопасности населения при облучении радоном нам прекрасно известны: с 2014 по 2022 г. специалисты ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, наряду со специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, участвовали в 3 региональных проектах технического сотрудничества МАГАТЭ по радоновой тематике (RER9127¹ «Внедрение усовершенствованных подходов к контролю облучения населения радоном» 2014–2015 [2]; RER9136² «Снижение облучения населения радоном путем поддержки внедрения и дальнейшего развития национальной стратегии по радону», 2016–2017; RER9153³ «Развитие региональных возможностей по контролю долгосрочных рисков для населения в связи с облучением радоном в жилых домах и на рабочих местах», 2018–2022).

¹ IAEA TC Project RER9127 “Establishing Enhanced Approaches to the Control of Public Exposure to Radon”.

² IAEA TC Project RER9136 “Reducing Public Exposure to Radon by Supporting the Implementation and Further Development of National Strategies”.

³ IAEA TC Project RER9153 “Enhancing the Regional Capacity to Control Long Term Risks to the Public due to Radon in Dwellings and Workplaces”.

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

По тексту статьи обращает на себя внимание многократное и настойчивое повторение тезиса о том, что «МАГАТЭ требует» выстраивать национальную нормативную базу каким-то определенным образом. Здесь уместно процитировать работу, анализирующую взаимодействие РФ и МАГАТЭ исключительно с юридической точки зрения [3]: «Пользователями таких норм являются государства-члены Агентства, которые на добровольной основе могут применять их». Поэтому документы МАГАТЭ – это по сути сборники «наилучших практик», при добровольном применении которых определенная задача в области обеспечения радиационной безопасности может быть решена наиболее оптимальным, с точки зрения МАГАТЭ (опирающейся в том числе на рекомендации МКРЗ и научные данные, агрегированные и проанализированные Научным комитетом по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН)), способом. На этот важнейший момент обращается внимание и в предисловии к Основным нормам безопасности [4], на которые многократно ссылаются авторы статьи: «Настоящие Нормы являются международным «эталоном» для требований, касающихся радиационной безопасности, и могут играть важную роль в формировании политики и принятии решений. ... Поэтому желательно, чтобы все государства-члены вводили в действие и применяли эти требования безопасности». Отметим, что в разработке документов МАГАТЭ различного уровня принимают активное участие и российские специалисты, в том числе сотрудники ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева (например, [5, 6]).

Большое внимание в статье уделено проблеме «гармонизации» российского санитарного законодательства с рекомендациями международных организаций; авторы настаивают на переходе к нормированию содержания радона в воздухе помещений по значению объемной активности (ОА) радона (вместо эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона) и установлению референтного уровня ОА радона равным 300 Бк/м³ (в пересчете на ЭРОА радона – 120–150 Бк/м³ в зависимости от принятого значения коэффициента равновесия между радонам и его дочерними продуктами распада (ДПР)), являющегося, на первый взгляд, более жестким, чем установленный в настоящее время в Российской Федерации гигиенический норматив ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений эксплуатируемых зданий жилого и общественного назначения, равный 200 Бк/м³. Эти вопросы давно обсуждаются на страницах научных изданий (например, [7–9]).

Отдельно хочется отметить, что, постоянно апеллируя к рекомендациям и мнению профильных международных организаций, авторы допускают непоправимые ошибки в названиях этих самых организаций: так, Международную комиссию по радиологической защите (МКРЗ) они называют Международным комитетом по радиационной защите, а Научный комитет по действию

атомной радиации ООН (НКДАР ООН) – Национальным комитетом по действию атомной радиации ООН.

Ратую за реформирование российской нормативной базы в целях гармонизации с международным сообществом, авторы упускают из виду (или сознательно не акцентируют на этом внимание) фундаментальную разницу между понятиями «Гигиенический норматив» и «Референтный уровень». Достаточно подробно эти моменты уже были нами освещены в статье [10]: «Концепция референтных уровней (предполагающая постоянную и добровольную оптимизацию показателей природного облучения даже в области значений ниже установленных референтных уровней), предложенная МКРЗ в Публикации 103 [11], продвигаемая МАГАТЭ в Основных нормах безопасности [4] и поддерживаемая Советом ЕС в Директиве № 2013/59/Euratom [12], отличается от понятия гигиенических нормативов российских санитарных правил (обязательные к выполнению требования, при соблюдении которых дальнейшая оптимизация не требуется)». Согласно [4], «фактическое облучение может быть выше или ниже референтного уровня, референтный уровень используется как ориентир для определения дальнейших мер радиационной защиты вне зависимости от уровней фактического облучения». Таким образом, переход от гигиенических нормативов к референтным уровням в корне изменит подход к обязательности соблюдения установленных требований, что, к сожалению, в нашей стране вряд ли приведет к росту количества проводимых радонозащитных мероприятий. Это путь к тому самому «ослаблению требований радиационной безопасности», вопросом о котором задаются в статье авторы.

Вместе с тем, следует признать, что присутствие ЭРОА торона в величине действующего норматива в ряде случаев явно избыточно. Одна из причин, по которой нормирование до сих пор осуществляется по величине среднегодовой ЭРОА изотопов радона ($ЭРОА_{гн} + 4,6 \cdot ЭРОА_{тн}$), заключается в том, что более 17 млн домов, на которые приходится 66% площади жилого фонда (по данным Росстата на 2022 г. [13]), были возведены до 1996 г., т.е. до того, как в НРБ-96⁴ были впервые установлены 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. Компромиссным вариантом могло бы стать установление раздельных нормативов для зданий, введенных в эксплуатацию начиная

⁴ 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.)]

с 1999 г. (исходя из того, что МУ 2.6.1.715-98⁵, разработанные после утверждения НРБ-96, были введены в действие с 01.11.1998), в форме среднегодового значения ЭРОА радона (или ОА, или обеих величин сразу с учетом стандартного значения коэффициента равновесия), и всех прочих зданий, для которых был бы сохранен существующий сейчас подход.

Помимо гармонизации, авторы активно поднимают вопрос проведения радонозащитных мероприятий при превышении установленных нормативных уровней содержания радона, выражая крайнее недовольство малым их количеством и «сомнительным» качеством реализации. Нельзя не обратить внимание на следующий тезис авторов: «Проблема отсутствия МЗР в отечественной практике радиационно-гигиенического обеспечения безопасных условий жизнедеятельности населения России не рассматривается до сих пор как наиболее актуальная в сфере ответственности регулятора». Вообще говоря, такой проблемы не существует, поскольку в действующих санитарных правилах и нормативах требования о проведении защитных мероприятий в случае превышения установленных нормативов прописаны и для проектируемых зданий (пп. 5.1.6 и 5.2.3 ОСПОРБ 99/2010⁶, пп. 3.2.4 и 4.2.2 СанПиН 2.6.1.2800-10⁷), и для сдающихся в эксплуатацию зданий (п. 4.2.6 СанПиН 2.6.1.2800-10), и для эксплуатируемых зданий (п. 5.3.3 НРБ-99/2009⁸, пп. 3.2.3 и 4.2.7 СанПиН 2.6.1.2800-10), а с 06.06.2018 Минстроем России введен в действие свод правил⁹ проектирования противорадоновой защиты. Поэтому налицо все правовые, инженерные и технологические основы для проектирования и выполнения радонозащитных мероприятий. Ни их раз-

работка, ни осуществление, ни тем более финансирование не входят в зону ответственности ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева, хотя за последние 20 лет нами было осуществлено непосредственное экспертное и измерительное сопровождение таких работ на нескольких объектах в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. Поэтому тезис авторов о том, что «МЗР не проводятся в стране до сих пор», основывающийся исключительно на отсутствии соответствующих публикаций в научных журналах, говорит только о том, что они не отслеживают иные источники информации, например, тендерные площадки (заказчиками таких работ в отношении эксплуатируемых зданий, как правило, выступают органы исполнительной власти субъектов РФ). При возведении новых зданий на потенциально радоноопасных участках территории включение радонозащитных мероприятий в проект стало рутинной работой, которую строительные организации не воспринимают как ноу-хау, нуждающееся в научном сопровождении.

Интересно, что по тексту статьи авторы сами себе противоречат, сначала утверждая, что в г. Лермонтове (Ставропольский край) «серьезных (эффективных) мер по снижению облучения населения радона... до сих пор предпринято не было», а далее в этом же абзаце цитируют доклад Межрегионального управления № 101 ФМБА России за 2017 г.: «В течение последних 5 лет противорадоновые мероприятия по снижению уровня радона в воздухе помещений проведены в 4 дошкольных организациях, в 2 школах, в 3 учреждениях дополнительного образования. В 2017 г. проведены противорадоновые мероприятия в МОУ СОШ № 1, позволившие снизить уровень содержания радона-222 в воздухе части помещений до норми-

⁵ 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. Expired. (In Russ.)]

⁶ 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 Минюстом России 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.)]

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.)]

⁸ 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.)]

⁹ 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.)]

руемых показателей». Очевидно, радонозащитные мероприятия, позволившие снизить содержание радона до нормативного уровня, авторами не рассматриваются как «эффективные меры», но, к сожалению, конкретные пояснения, какой же тогда смысл вкладывается в этот термин, в статье не представлены, несмотря на его многократное употребление.

Также многократно по тексту статьи авторы говорят о «сверхнормативном облучении радоном» и даже «сверхнормативном риске». Здесь стоит напомнить, что в российском санитарном законодательстве облучение населения за счет природных источников ионизирующего излучения (ПИИИ) не нормируется как таковое: п. 5.1.2 ОСПОРБ 99/2010 и п. 4.1.3 СанПиН 2.6.1.2800-10 лишь определяют уровни индивидуальной годовой эффективной дозы облучения за счет всех основных ПИИИ, в соответствии с которыми проводится классификация степени радиационной безопасности населения при их воздействии, результаты которой в дальнейшем используются органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации при планировании и осуществлении мероприятий по снижению уровней облучения населения за счет ПИИИ. Это совершенно не эквивалентно установлению гигиенического норматива, который не должен превышать.

Ввиду явно недостаточной информированности по вопросам переработки нормативной базы Российской Федерации в части природного облучения населения авторы статьи делают ошибочные выводы, говоря, например, «о продолжающейся в настоящее время ревизии НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010». Хотелось дать разъяснение по этой теме, вкратце изложив последовательность событий (более подробно она освещена в [14]).

Работа по актуализации НРБ-99/2009 началась с 2018 г., подготовленный проект НРБ-2019 с частично реализованными положениями международных рекомендаций был рассмотрен на НТС-10 «Экологическая, ядерная и радиационная безопасность» Госкорпорации «Росатом», однако был отклонен как несоответствующий существующей законодательной базе. На основании решения НТС-10, письма генерального директора Госкорпорации «Росатом» и итогов заседания Российской научной комиссии по радиологической защите (РНКРЗ) Роспотребнадзором было принято решение о продлении сроков действия НРБ-99/2009 на 5 лет.

Затем работа по пересмотру НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010 (уже без внедрения новых положений) была про-

должена на этапе ввода в действие Плана мероприятий («дорожной карты») по реализации механизма «регуляторной гильотины», утвержденного Правительством Российской Федерации 29.05.2019 № 4714п-ПЗ6В. С выходом Постановления Правительства РФ от 31.12.2020 № 2467¹⁰, отменившего «регуляторную гильотину» в отношении санитарных правил по радиационной безопасности, эта работа была прекращена.

Уже тогда было ясно, что внесение взвешенных изменений, соответствующих рекомендациям международных организаций, в санитарные нормы и правила Российской Федерации невозможно без переработки основного документа в области радиационной безопасности – Федерального закона № 3-ФЗ¹¹. Работа по его актуализации с учетом международных тенденций была начата в 2022 г. и продолжается сейчас. Приказом Руководителя Роспотребнадзора от 06.04.2022 № 174¹² была создана рабочая группа, в которую, помимо представителей различных подразделений Роспотребнадзора (в том числе ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева), были приглашены ведущие специалисты других ведомств и организаций (Госкорпорации «Росатом», Минприроды, Минобороны, Минздрава, Ростехнадзора, МЧС России, ФТС России, ФГБУ ГНЦ ФМБУ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ФГБУН ИБРАЭ РАН, НИЦ «Курчатовский институт», ФБУ «НТЦ ЯРБ», ФГБУ «НПО «Тайфун» и др.) Необходимо отметить, что и ранее работа по пересмотру НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010 всегда велась с привлечением большого числа ведущих специалистов страны в области обеспечения радиационной безопасности (в том числе и при облучении природными источниками излучения). Таким образом, настойчивое «революционное предложение» авторов статьи [1] о создании рабочей группы для обсуждения вопросов нормирования радона несколько запоздало.

Итак, совершенно очевидно, что без принятия поправок в Федеральный закон № 3-ФЗ, в котором были бы закреплены такие современные концепции МКРЗ, как «ситуация облучения» или «референтный уровень» (включенные в настоящее время в проект федерального закона «О внесении изменений в федеральный закон «О радиационной безопасности населения»), переработка основных норм и правил обеспечения радиационной безопасности невозможна. В свою очередь, без этого невозможна переработка санитарных правил по отдельным видам облучения (например, природному), а также по-

¹⁰ Постановление Правительства РФ от 31.12.2020 № 2467 «Об утверждении перечня нормативных правовых актов и групп нормативных правовых актов Правительства Российской Федерации, нормативных правовых актов, отдельных положений нормативных правовых актов и групп нормативных правовых актов федеральных органов исполнительной власти, правовых актов, отдельных положений правовых актов, групп правовых актов исполнительных и распорядительных органов государственной власти РСФСР и Союза ССР, решений Государственной комиссии по радиочастотам, содержащих обязательные требования, в отношении которых не применяются положения частей 1, 2 и 3 статьи 15 Федерального закона «Об обязательных требованиях в Российской Федерации» [Decree of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No. 2467. (In Russ.)]

¹¹ Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (ред. от 18.03.2023) [Federal Law No. 3-FZ of 09.01.1996 “On Radiation Safety of the Population” (as amended on 18.03.2023). (In Russ.)]

¹² Приказ Руководителя Роспотребнадзора от 06.04.2022 № 174 «О создании рабочей группы по разработке проекта федерального закона «О внесении изменений в федеральный закон «О радиационной безопасности населения» [Order of the Head of Rosпотребнадзор No. 174 of 06.04.2022 “On the establishment of a working group to develop a draft federal law “On Amendments to the Federal Law “On Radiation Safety of the Population”. (In Russ.)]

следующих методических документов, устанавливающих порядок радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки отдельных объектов по показателям радиационной безопасности при воздействии ПИИИ.

Что касается национального плана действий (национальной радоновой программы), то авторы справедливо отмечают, что информирование о «радоновой проблеме» является одним из ключевых направлений реализации такого плана или программы. Однако заметим, что при разработке стратегии риск-коммуникации по вопросам радона (что гораздо шире, чем просто информирование о проблеме) необходимо опираться на четкое понимание уровня знаний населения о данном факторе риска и его восприятия в контексте заботы о здоровье. Информация об этом может быть получена только в ходе специальных социологических исследований. До настоящего времени ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева остается единственной организацией, которая провела подобное исследование в масштабе всей страны в рамках кросс-культурного многоязычного опроса общественного мнения о радоне «STEAM», организованного МАГАТЭ в ходе выполнения регионального проекта технического сотрудничества RER9153 (и продолжает проводить аналогичные исследования уже на региональном уровне по собственной инициативе). Результаты исследования были опубликованы [15] и широко обсуждались на нескольких конференциях, но, по-видимому, авторы с ними не знакомы. Между тем именно эти результаты, а также опыт проведения информационных кампаний по вопросам радона, представленный зарубежными коллегами на целом ряде семинаров в рамках проекта RER9153, используются при разработке в рамках коммуникационной стратегии Роспотребнадзора «Санпросвет» информационно-просветительских материалов, размещаемых на официальном сайте ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева¹³.

В материале авторы позволяют себе достаточно пренебрежительные отзывы о данных, собранных в Федеральном банке данных доз облучения населения за счет природного и техногенно измененного радиационного фона (ФБДОПИ), однако все свои расчеты, оценки и заключения основывают как раз на них. Хочется напомнить, что целью создания ФБДОПИ являлось не построение красивых математических распределений содержания радона в воздухе зданий, а автоматизированный учет и контроль показателей природного облучения жителей разных регионов страны. Решение этой сугубо практической задачи позволило в том числе скорректировать численные значения доз, характеризующие повышенное и высокое облучение населения ПИИИ (ср. п. 7.2.2

ОСПОРБ-99¹⁴ и п. 5.1.2 ОСПОРБ 99/2010). Но если авторы так обеспокоены «серьезной проблемой сбора данных» по форме № 4-ДОЗ (которую они ошибочно именуют «ДОЗ-4»), то рассчитываем, что в будущем они будут основывать свои выкладки исключительно на собственных данных сопоставимого объема.

Что касается произведенных авторами финансовых подсчетов, следует напомнить, что у Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года» (ФЦП ЯРБ-2)¹⁵ (в названии и аббревиатуре авторами допущены неточности) есть совершенно конкретная цель – «Комплексное обеспечение ядерной и радиационной безопасности в Российской Федерации путем решения первоочередных проблем **ядерного наследия**», достижение которой запланировано путем реализации более 130 мероприятий по 4 направлениям, ни одно из которых не включает вопросы обеспечения радиационной безопасности населения при воздействии ПИИИ в коммунальных условиях и быту. Исходя из этого, попытки получить какое-либо финансирование радонозащитных мероприятий за счет ФЦП ЯРБ-2 могут быть классифицированы как нецелевое использование бюджетных средств. Причем авторы сами подчеркивают, что «руководство ФЦП ЯРБ, представляющее Госкорпорацию «Росатом», не поддержало финансирование работ по обеспечению радиационной безопасности населения от воздействия радона». Таким образом, тезис авторов о том, что «целесообразно в рамках ФЦП ЯРБ оценить расходы, необходимые для восстановления эффективного контроля радона в стране», – это рассуждения об абсолютно нереализуемых на практике предложениях.

Здесь хочется отметить, что, несмотря на отсутствие действующей национальной радоновой программы и государственного финансирования массовых исследований содержания радона в воздухе помещений, специалисты территориальных органов Роспотребнадзора при содействии ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева в рамках совместных инициативных НИР проводят выборочные радоновые обследования в регионах. Так, только в период 2018–2023 гг. были выполнены обследования 242 детских учреждений и 55 эксплуатируемых жилых зданий в 154 населенных пунктах Ленинградской области, 85 общественных и 90 жилых зданий в 63 населенных пунктах Оренбургской области; начиная с 2024 г. аналогичные обследования запланированы в Ивановской области.

¹³ Официальный сайт ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Радон: что о нём нужно знать. URL: <http://niirg.ru/News.php?subaction=showfull&id=1713255862> (Дата обращения: 16.04.2024) [Official site of Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev. Radon: what you need to know about it. Available from: <http://niirg.ru/News.php?subaction=showfull&id=1713255862> [Accessed 16 Apr 2024] (In Russ.)]

¹⁴ Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): Санитарные правила СП 2.6.1.799-99. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 27.12.1999 [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB-99). Sanitary rules SP 2.6.1.799-99. Approved by the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation 27.12.1999. Expired. (In Russ.)]

¹⁵ ФЦП ЯРБ-2. Официальный сайт. URL: <https://фцп-ярб.пф/about/overview/> (Дата обращения: 16.04.2024) [Federal target program “Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the period up to 2035”. Official site. Available from: <https://фцп-ярб.пф/about/overview/> [Accessed 16 Apr 2024] (In Russ.)]

Говоря об ответственности за обеспечение требований радиационной безопасности в отношении помещений зданий, авторы предлагают переложить ее на собственников недвижимости. Вряд ли такой подход можно считать универсальным, поскольку, например, в отдельной квартире радонозащитные мероприятия могут оказаться неэффективными (если только источником поступления радона в воздух помещений не являются материалы строительных конструкций) – в многоквартирном доме для проведения таких мероприятий необходимо будет задействовать различное общее имущество, в первую очередь, подвальные помещения (п. 1 ч. 1 ст. 36 Жилищного кодекса РФ¹⁶). И здесь следует напомнить, что, согласно ч. 1.1 ст. 161 Жилищного кодекса РФ, «надлежащее содержание общего имущества собственников помещений в многоквартирном доме должно осуществляться в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации, в том числе в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения». При этом, согласно ч. 2 ст. 161 Жилищного кодекса РФ, непосредственное управление многоквартирным домом собственниками помещений допускается, только если в доме не более 30 квартир; в иных случаях управление осуществляет управляющая компания, товарищество собственников жилья, жилищный кооператив или иной специализированный потребительский кооператив. Что касается владельцев частных домов, то ответственность за их собственное здоровье и здоровье их семьи и так целиком и полностью лежит на них самих.

Тезис авторов о том, что измерения содержания радона в зданиях группы «Ж» (любые жилые здания, которые не используются в коммерческих целях) «должны проводиться только на добровольной основе по инициативе жителей, которые согласны самостоятельно оплачивать эти услуги», не несет в себе ничего нового относительно текущей ситуации. Более того, анализ обращений территориальных органов Роспотребнадзора за методической помощью во ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева показывает, что даже в случае установленного факта превышения действующего норматива ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений одной из квартир малоэтажного многоквартирного дома жильцы других квартир нередко отказываются от проведения **бесплатных** измерений силами аккредитованной испытательной лаборатории (ИЛ) регионального ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии», выполняемых в рамках определений на проведение исследований Роспотребнадзора. Это возвращает нас к проблеме восприятия населением радона как фактора риска для своего здоровья в контексте необходимости разработки информационных кампаний по вопросам радона, для начала хотя бы в виде региональных пилотных проектов.

Кроме того, в предлагаемой авторами статьи классификации зданий для определения порядка выполнения в них измерений и радонозащитных мероприятий полностью отсутствует такая группа жилых зданий, в которых нижние один или два этажа являются нежилыми и находятся в собственности или аренде для использования под объекты социально-бытового обслуживания населения или коммерческого назначения; между тем именно такие здания составляют основную часть современной многоэтажной жилой застройки в крупных населенных пунктах.

Никак нельзя обойти вниманием поднимаемые в статье вопросы обеспечения не только ИЛ, но и всех желающих «доступными, дешевыми и надежными (на основе IoT-технологий) современными средствами измерений» содержания радона в воздухе (к слову, аббревиатура IoT, под которой скрывается, по всей видимости, «Интернет вещей» (“Internet of Things”), авторы не сочли нужным раскрыть). Выдвигаются достаточно спорные тезисы о «сложности и более высокой стоимости измерений ЭРОА по сравнению с ОА радона», об «устаревших и достаточно дорогих средствах измерений ЭРОА радона», если ориентироваться на текущие рыночные цены. Здесь необходимо заметить, что первый и основной автор статьи – сотрудник НПП «Доза», разработчик комплекса «КАМЕРА», аэрозольного радиометра радона РАА-20П2 «Поиск» (выпускаются НТЦ «НИТОН») и РАА-3-01 «АльфаАЭРО» (выпускается НТЦ Амплитуда), о чем сказано в сведениях об авторах монографии [16]. С учетом этого вполне резонно возникает целый ряд вопросов: если, по мнению авторов, у нас в стране все так плохо и, главное, неправильно с приборной базой, почему НПП «Доза» до сих пор не производит ни одного «современного и недорогого» средства измерений содержания радона собственной разработки, а занимается исключительно продажей оборудования, выпущенного Приборостроительной компанией «НТМ-Защита» и ТОО «СОЛО ЛЛП (SOLO LLP)» (Республика Казахстан)? Или если существуют проблемы с разработкой и производством, то почему не наладить поставку, например, действительно современного радон-монитора «RadonEye Plus2», который вполне вписывается в концепцию IoT и который можно приобрести даже на известной китайской розничной интернет-площадке по цене на 1–2 порядка (!) ниже по сравнению с радон-мониторами, внесенными на данный момент в государственный реестр средств измерений (ГРСИ)? Или хотя бы почему для «КАМЕРЫ-01», РАА-20П2 «Поиск» и РАА-3-01 «АльфаАЭРО» до сих пор нет аттестованных в установленном порядке методик (методов) измерений, в которых учитывались бы современные требования к представлению результатов радиационного контроля, установленные п. 7.4 ГОСТ 8.638¹⁷, и подходы к выражению неопре-

¹⁶ Жилищный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 188-ФЗ (ред. от 23.03.2024) [Housing Code of Russia No. 188-FZ of 29.12.2004 (as amended on 23.03.2024)]. (In Russ.)]

¹⁷ ГОСТ 8.638–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения». Введен в действие приказом Росстандарта от 13.03.2014 № 138-ст. [Interstate Standard GOST 8.638–2013 “State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological ensuring of radiation control. General principles”. Put into effect by the order of Rosstandart of 13.03.2014 No. 138-st. (In Russ.)]

деленности измерений, установленные ГОСТ 34100.3¹⁸? Заметим, что для ИЛ, работающих в рамках аккредитации в национальной системе^{19,20}, абсолютно необходимо, чтобы средства измерений не только были внесены в ГРСИ – ФГИС Росстандарта, подсистему «АРШИН»²¹, но и были укомплектованы методиками (методами) измерений, удовлетворяющими требованиям, предъявляемым к соответствующим документам Федеральным законом от 26.06.2008 № 102-ФЗ²² «Об обеспечении единства измерений» (ч. 11 ст. 2; ч. 1, 2, 3 ст. 5).

К слову, тезис о том, что «наиболее эффективная стратегия организации массового радонового контроля с привлечением не только специалистов, но и самого населения, достигается за счет применения не долгосрочных, а краткосрочных тестов (в течение 2–7 дней), тем более с использованием современных электронных мониторов и IoT-технологий», авторы сопровождают ссылкой на свою публикацию [17], при внимательном изучении которой выясняется, что за «современными электронными мониторами и IoT-технологиями» скрывается прекрасно известный всем российским специалистам квазиинтегральный метод измерений средней ОА радона с помощью угольных адсорберов, а приведенный на рисунке 2 в статье [17] детектор «BDB-13» является ни чем иным, как блоком детектирования бета-/гамма-излучения БДБ-13 из состава Комплекса измерительного для мониторинга радона «КАМЕРА-01», по-видимому, дополнительно оснащенный WiFi-модулем для подключения к многоканальному коммутатору в лаборатории. При чем тут концепция Интернета вещей и тем более электронные мониторы (в смысле средств непрерывных измерений ОА радона в воздухе, в качестве детектора в которых чаще всего используется импульсная ионизационная камера), остается загадкой.

Кроме того, предложение авторов о привлечении к «массовому радоновому контролю» населения серьезно может рассматриваться только в рамках научных проектов модного в последние годы направления «гражданской науки» (citizen science). В ситуациях, требующих принятия каких-либо управленческих решений органами исполнительной власти любого уровня (например, о необходимости выделения средств на проведение радо-

нозащитных мероприятий), основанием для них могут и должны являться результаты измерений, полученных исключительно аккредитованными ИЛ; в противном случае открываются широчайшие возможности для фальсификации результатов и дальнейших злоупотреблений и противоправных действий. Авторы приводят пример нарушения участниками подобного проекта процедуры измерений, приводящего к получению завышенных и неадекватных результатов, в своей же статье [17].

Надо заметить, что в упоминаемом авторами Указе 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» присутствует еще одно чрезвычайно важное направление – «развитие научно-производственного потенциала в области использования атомной энергии и его поддержание на уровне, обеспечивающем минимизацию рисков при использовании ядерных технологий, в том числе разработка и применение... контрольно-измерительных приборов для измерения содержания радона и продуктов его распада в жилых помещениях с применением интегральных методов». И здесь приходится констатировать, что кризис с интегральными измерениями в классическом их понимании в России уже не за горами. Напомним, что в ГРСИ имеется лишь один соответствующий тип средств измерений – ТРЕК-РЭИ-1М (выпускается ГК РЭИ), в котором в качестве трекового детектора используется нитроцеллюлозная пленка LR-115 Type II, единственное производство которой во Франции было полностью прекращено некоторое время назад, и складские запасы в России также на исходе. Между тем в 2022 г. ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России был получен патент на способ получения нитроцеллюлозного детектора альфа-частиц [18], однако запуск его в производство требует не только значительного объема инвестиций, но и решения большого числа сложных организационных вопросов. Под этот же детектор несколько лет назад был разработан и запатентован интервальный экспозиметр [19], который мог бы оказаться удобным инструментом при радиационном контроле эксплуатируемых зданий с некруглосуточным пребыванием людей в соответствии

¹⁸ ГОСТ 34100.3–2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения». Введен в действие приказом Росстандарта от 12.09.2017 № 1065-ст. [Interstate Standard GOST 34100.3–2017 “Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement” (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Put into effect by the order of Rosstandart of 12.09.2017 No. 1065-st. (In Russ.)]

¹⁹ Статья 31 Федерального закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (ред. от 25.12.2023). [Article 31 of Federal Law No. 184-FZ of 27.12.2002 “On Technical Regulation” (as amended on 25.12.2023). (In Russ.)]

²⁰ Федеральный закон от 28.12.2013 № 412-ФЗ «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» (ред. от 24.07.2023). [Federal Law No. 412-FZ of 28.12.2013 “On Accreditation in the National Accreditation System” (as amended on 24.07.2023). (In Russ.)]

²¹ Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Дата обращения: 16.04.2024) [Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments. Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> [Accessed 16 Apr 2024]. (In Russ.)]

²² Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (ред. от 14.02.2024). [Federal Law No. 102-FZ of 09.01.1996 “On Ensuring the Uniformity of Measurements” (as amended on 14.02.2024). (In Russ.)]

с новыми МР 2.6.1.0333-23²³, если бы не возникла проблема с расходными материалами.

В данных обстоятельствах расширение номенклатуры доступных ИЛ электронных интегральных радиометров (т.е. радон-мониторов) и, возможно, разработка или хотя бы импорт и вывод на рынок измерительных комплексов, использующих в качестве трекового детектора наиболее распространенный и доступный в данный момент материал CR-39 (полиаллилдигликолькарбонат), несомненно, являются важной задачей, которую должны решать именно приборостроительные компании.

Подытоживая, хочется сказать, что критика полезна только в том случае, когда она конструктивна и основывается на фактах, а не на домыслах и абстрактных размышлениях. Даже в отсутствие утвержденной на федеральном уровне национальной радоновой программы каждый специалист и его учреждение могут начать подготавливать отдельные ее компоненты в рамках своей компетенции, своих полномочий и доступных ресурсов, а не рассчитывать на то, что в ближайшие 10 лет финансовый поток внезапно потечет в нужную «радоновому сообществу» сторону: разрабатывать и выводить на рынок современные недорогие средства измерений; основывать компании, которые будут предоставлять удобные и недорогие сервисы измерений и радонозащиты, в том числе экспертизы ее эффективности; обеспечивать недорогие метрологические услуги; создавать «мощные информационные ресурсы на базе online платформы», на которой будут размещаться результаты собственных измерений, в том числе в картографическом виде с привлечением возможностей геоинформационных систем; актуализировать ГОСТы; вести просветительскую работу среди различных потенциально заинтересованных профессиональных групп; внедрять сертификацию «радоновых» услуг на строительном рынке; заниматься совершенствованием нормативно-методических документов. И тогда в один, несомненно, прекрасный для нас всех день, пазл под названием «Национальная радоновая программа» сложится, потому что в данном случае практические достижения – это гораздо более надежная основа успеха, чем голая, пусть и красивая, теория.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа не имела источников финансирования.

Литература

1. Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б., Кувшинников С.И. Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению // АНРИ. 2024. № 1(116). С. 3–29. DOI: 10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29.
2. Status of Radon Related Activities in Member States Participating in Technical Cooperation Projects in Europe. IAEA-TECDOC-1810. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017. 184 p.
3. Бабошина Е.В., Гусейнова И.С. О взаимодействии России и МАГАТЭ в области радиационной безопасности // Образование и право. 2022. № 7. С. 17–21. DOI: 10.24412/2076-1503-2022-7-17-21.
4. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR Part 3. Вена: МАГАТЭ, 2015. 477 с.
5. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 1: Technical Material. IAEA Safety Reports Series No. 114. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2023. 187 p.
6. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 2: Considerations in Implementing Requirement 51 of IAEA General Safety Requirements Part 3 (International Basic Safety Standards). IAEA-TECDOC-2011. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. 51 p.
7. Киселев С.М., Жуковский М.В. Современные подходы к обеспечению защиты населения от радона. Международный опыт регулирования // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 48–52.
8. Ярмошенко И.В., Онищенко А.Д., Жуковский М.В. Проблемы оптимизации защиты от радона и введения референтного уровня в Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 67–69.
9. Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. К обоснованию изменений в нормировании содержания радона в воздухе помещений // Здоровье населения и среда обитания. 2019. № 6 (315). С. 42–48. DOI: 10.35627/2219-5238/2019-315-6-42-48.
10. Кормановская Т.А. Сравнительный анализ российских и международных подходов к вопросам обеспечения радиационной безопасности при облучении природными источниками излучения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 40–49. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-40-49.
11. Рекомендации 2007 года Международной Комиссии по радиационной защите. Публикация 103 МКРЗ / пер. с англ.; под общ. ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 344 с.
12. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom // Official Journal of the European Union. 2013. Vol. 57, L 13. 73 p.
13. Жилищное хозяйство в России. 2022: стат. сб. / М.: Росстат, 2022. 83 с. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234> (Дата обращения: 16.04.2024).
14. Романович И.К., Водоватов А.В., Библин А.М., Кормановская Т.А. К проблеме совершенствования законодательного и нормативного обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 88–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-88-95.

²³ 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.)]

15. Давыдов А.А., Библин А.М., Кононенко Д.В. Проблемы риск-коммуникации по вопросу облучения радоном: результаты всероссийского социологического исследования // Анализ риска здоровью. 2021. № 3. С. 29–41. DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.03.
16. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
17. Tsapalov A., Kovler K., Shpak M. et al. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the «RadonTest» online system // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. No 217. P. 106215. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106215.
18. Маренный А.М., Яруллин Р.Н., Новиков С.В. и др. Пат. № 2769336, Российская Федерация, МПК C08J 5/18, G03F 1/62, B05C 3/09. Способ получения нитроцеллюлозного детектора альфа-частиц. Заявл. 30.08.2021. Опубл. 30.03.2022 Бюл. № 10.
19. Маренный А.М., Лукьянов С.Г., Маренный М.А., Нефедов Н.А. Пат. № 2731592, Российская Федерация, МПК G01T 1/00. Интегральный радиометр радона с диэлектрическим трековым детектором. Заявл. 02.09.2019. Опубл. 04.09.2020 Бюл. № 25.

Поступила: 10.04.2024 г.

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

ORCID 0000-0003-0668-459X

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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: f4dos@mail.ru

ORCID 0009-0005-7922-7367

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, Санкт-Петербург, Россия

ORCID 0000-0002-1392-1226

Для цитирования: Романович И.К., Кормановская Т.А., Кононенко Д.В. К вопросу регулирования радона в Российской Федерации. Дискуссия по материалам публикации «Кризис регулирования радона в России: масштаб проблемы и предложения по исправлению» // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 128–137. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-128-137

On the issue of radon regulation in the Russian Federation. Discussion on the materials of the publication “Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation”

Ivan K. Romanovich, Tatyana A. Kormanovskaya, Dmitry V. Kononenko

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

The paper presents comments, remarks and opinions on the material presented in the publication “Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation” by Tsapalov A., Miklyaev P., Petrova T., Kuvshinnikov S., published in the Russian peer-reviewed journal “ANRI” (“Radiation measurement equipment and news”), 2024, No. 1.

Key words: radon, thoron, regulation, harmonization, hygienic norm, reference level, radon remediation actions, measuring instruments, measurement methods, national radon program, radon action plan.

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

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. Tsapalov A, Miklyaev P, Petrova T, Kuvshinnikov S. Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation. *ANRI*. 2024; 1(116): 3–29. (In Russian) <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2024-116-1-3-29>.
2. Status of Radon Related Activities in Member States Participating in Technical Cooperation Projects in Europe. IAEA-TECDOC-1810. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2017. 184 p.
3. Baboshina EV, Guseinova IS. On interaction between Russia and the IAEA in the field of radiation safety. *Obrazovanie i Pravo = Education and Law*. 2022; 7: 17–21. (In Russian) <https://doi.org/10.24412/2076-1503-2022-7-17-21>.
4. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. IAEA safety standards series no. GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2014. 436 p.
5. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 1: Technical Material. IAEA Safety Reports Series No. 114. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2023. 187 p.
6. Exposure Due to Radionuclides in Food Other Than During a Nuclear or Radiological Emergency. Part 2: Considerations in Implementing Requirement 51 of IAEA General Safety Requirements Part 3 (International Basic Safety Standards). IAEA-TECDOC-2011. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2022. 51 p.
7. Kiselev SM, Zhukovsky MV. Modern approaches to public protection against indoor radon. International regulatory experience. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014; 7(4): 52–55. (In Russian).
8. Yarmoshenko IV, Onishchenko AD, Zhukovsky MV. Problems of establishing national reference level for radon. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014; 7(4): 67–69. (In Russian).
9. Romanovich IK, Kormanovskaya TA, Kononenko DV. On the justification of changes in the regulation of the indoor radon concentration. *Zdorovie naseleniya i sreda obitaniya = Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2019;6(315): 42–48. (In Russian) <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2019-315-6-42-48>.
10. Kormanovskaya TA. Comparative analysis of Russian and international approaches to radiation safety related to exposure to natural sources of radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022; 15(3): 40–49. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-3-40-49>.
11. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007; 37 (2–4). 332 p.
12. Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union*. 2013;57(13): 73.
13. Housing sector in Russia. 2022 Statistical digest. Moscow: Rosstat; 2022. 83 p. Available from: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13234> (Accessed 16 Apr 2024). (In Russian).
14. Romanovich IK, Vodovатов AV, Biblin AM, Kormanovskaya TA. On the issue of the development of legislative and regulatory provision of the radiation safety of the public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022; 15(1): 88–95. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-1-88-95>.
15. Davydov AA, Biblin AM, Kononenko DV. Radon risk communication issues: results of the all-Russian public opinion survey. *Health Risk Analysis*. 2021;3: 29–41. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2021.3.03.eng>.
16. Marennyy AM, Tsapalov AA, Miklyaev PS, Petrova TB. Regularities of radon field formation in the geological environment. Moscow: Pero; 2016. 394 p. (In Russian).
17. Tsapalov A, Kovler K, Shpak M, Shafir E, Golumbic Y, Peri A, et al. Involving schoolchildren in radon surveys by means of the «RadonTest» online system. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;217: 106215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106215>.
18. Marennyy AM, Yarullin RN, Novikov SV, Supyrev AV, Gertsen GP. Pat. No. 2769336, Russian Federation, Int. Cl. C08J 5/18, G03F 1/62, B05C 3/09. Method for producing a nitrocellulose alpha particle detector. Appl. 30.08.2021. Publ. 30.03.2022 Bull. № 10.
19. Marennyy AM, Lukyanov SG, Marennyy MA, Nefedov NA. Pat. No. 2731592, Russian Federation, Int. Cl. G01T 1/00. Integrated radon radiometer with dielectric track detector. Appl. 02.09.2019. Publ. 04.09.2020 Bull. № 25.

Received: April 10, 2024

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 correspondence: Tatyana A. Kormanovskaya – PhD, 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

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, Saint-Petersburg, Russia
ORCID 0000-0002-1392-1226

For citation: Romanovich I.K., Kormanovskaya T.A., Kononenko D.V. On the issue of radon regulation in the Russian Federation. Discussion on the materials of the publication “Radon regulation crisis in Russia: scale of the problem and proposals for remediation”. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 128–137. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-128-137

Новые методические рекомендации по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке жилых, общественных и производственных зданий и сооружений по показателям радиационной безопасности. Часть 1

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. В первой части статьи рассмотрены структура и статус новых методических рекомендаций, а также основные нововведения в части контроля мощности дозы гамма-излучения, поиска и идентификации локальных радиационных аномалий и участков радиоактивного загрязнения, контроля уровней поверхностного загрязнения, а также определения минимального объема контроля помещений; изложены причины введения тех или иных изменений. Подробно освещены вопросы оценки неопределенности измерений, представления результатов измерений и оформления протоколов обследований (радиационного контроля). Во второй части статьи будут рассмотрены многочисленные нововведения в части оценки среднегодового значения эквивалентной равновесной объемной активности изотопов радона в воздухе помещений.

Ключевые слова: радиационный контроль, показатели радиационной безопасности, здания и сооружения, ввод в эксплуатацию, капитальный ремонт, реконструкция, снос, мощность амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, удельная активность радионуклидов, локальная радиационная аномалия, поверхностное загрязнение, неопределенность измерений.

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, утвержденную в Российской Федерации за последние 25 лет, вслед за МУ 2.6.1.715-98², действовавшими с 01.11.1998 по 27.02.2011,

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

и МУ 2.6.1.2838-11³, действовавшими с 28.02.2011 по 30.11.2023.

Регулирование воздействия природных источников ионизирующего излучения на население при нахождении в зданиях в санитарном законодательстве Российской Федерации осуществляется путем введения гигиенических нормативов, определяющих допустимые уровни показателей радиационной безопасности существующих (эксплуатируемых) зданий и сооружений, а также объектов, вводимых в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. К основным показателям радиационной безопасности относятся мощность эффективной (эквивалентной) дозы гамма-излучения, определяющая дозу внешнего облучения населения, и эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений, определяющая дозу внутреннего облучения населения. Требования к показателям радиационной безопасности жилых и общественных зданий и сооружений установлены в НРБ-99/2009⁴ и СанПиН 2.6.1.2800-10⁵; производственных зданий и сооружений – в ОСПОРБ 99/2010⁶ и СанПиН 2.6.1.2800-10. Также в ОСПОРБ 99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10 установлены требования к показателям радиационной безопасности участков территории, предназначенных под застройку, к которым относятся мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на территории и плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта; в данном случае нормируемые показатели являются по своей сути уровнями вмешательства (действия), а не гигиеническими нормативами.

Несмотря на то, что ОСПОРБ 99/2010 (п. 5.1.7) предусматривает проведение радиационного контроля для проверки соответствия зданий требованиям НРБ-99/2009 на всех стадиях строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации, МУ 2.6.1.2838-11 определяли порядок проведения радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки зданий жилого и общественного назначения, а также производственных зданий и сооружений (далее для краткости – зданий и сооружений) только на этапе ввода их в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. МУ 2.6.1.715-98, содержащий алгоритм проведения обследования эксплуатируемых зданий по показателям радиационной безопасности, были отменены еще в 2011 г., а в пришедшие им на смену МУ 2.6.1.2838-11 этот алгоритм по каким-то причинам не вошел. Однако и этот алгоритм имел ряд существенных недостатков, например, не учитывал в полной мере факторы, требующие особого подхода к контролю содержания радона в воздухе помещений эксплуатируемых общественных зданий с некруглосуточным пребыванием людей, в частности, детских учреждений [1]. Кроме того, в МУ 2.6.1.715-98 рассматривались не все этапы жизненного цикла зданий в контексте проведения радиационного контроля, а область применения не включала контроль производственных зданий и сооружений.

Между тем именно эксплуатируемые общественные здания и, в первую очередь, здания детских учреждений в приоритетном порядке включаются в ежегодные планы контрольно-надзорной деятельности территориальных

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) (далее – НРБ-99/2009) [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) (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.)]

⁵ 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) (далее – СанПиН 2.6.1.2800-10) [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) (hereinafter – SanPiN 2.6.1.2800-10). (In Russ.)]

⁶ 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 Минюстом России 05.11.2013, регистрационный № 30309) (далее – ОСПОРБ 99/2010) [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. 18115), 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) (hereinafter – OSPORB 99/2010). (In Russ.)]

органов Роспотребнадзора. Вынужденное использование при измерениях содержания радона в воздухе помещений детских учреждений действовавших ранее МУ 2.6.1.2838-11 по причине отсутствия других утвержденных документов зачастую приводило к получению завышенных оценок среднегодового значения ЭРОА изотопов радона из-за применения требования к подготовке помещений к измерениям, предназначенного исключительно для ситуации обследования помещений еще не введенных в эксплуатацию зданий (а именно, согласно п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11, в помещениях перед измерениями необходимо было закрыть все окна и двери не менее чем на 12 ч), что не соответствует реальной ситуации облучения населения в таких зданиях. Использование при расчетах среднегодового значения ЭРОА изотопов радона формулы (10) из п. 6.5 МУ 2.6.1.2838-11, содержащей сезонный коэффициент запаса, еще более усугубляло ситуацию и приводило к многочисленным фактам применения территориальными органами Роспотребнадзора мер административного воздействия, предусмотренных Кодексом Российской Федерации об административных правонарушениях № 195-ФЗ (статья 6.3 «Нарушение законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения» или статья 6.4 «Нарушение санитарно-эпидемиологических требований к эксплуатации жилых помещений и общественных помещений, зданий, сооружений и транспорта»), и закрытию посреди учебного года всего здания или части помещений детского учреждения, что, в свою очередь, вело не только к росту уровня радиотрешности, но и к социальному напряжению. В особенности это касается небольших населенных пунктов, где временное закрытие единственного детского учреждения может быть катастрофичным и негативно сказывается на всем образовательном процессе. За последние годы сигналы о таких ситуациях поступали из целого ряда субъектов Российской Федерации: Иркутской, Кемеровской, Тульской и Челябинской областей, Алтайского и Приморского краев, Республик Алтай, Саха (Якутия) и Хакасия, Еврейской автономной области и др. Последующие детальные обследования этих зданий с использованием других методов измерений и подходов к оценке содержания радона в воздухе помещений в большинстве случаев не подтверждали первичные результаты и не выявляли превышений гигиенического норматива с учетом реального режима эксплуатации зданий.

За 12 лет использования МУ 2.6.1.2838-11 в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева поступило множество запросов от аккредитованных испытательных лабораторий (ИЛ)

и территориальных органов Роспотребнадзора о трактовке тех или иных пунктов этих методических указаний, что было связано с недостаточной четкостью формулировок. Таким образом, совокупность изложенных выше причин определила актуальность переработки МУ 2.6.1.2838-11 с расширением области их применения.

Структура и статус методических рекомендаций. Общие нововведения

Область применения МР 2.6.1.0333-23 была расширена, и теперь документ описывает алгоритм проведения и минимальный объем радиационного контроля и санитарно-эпидемиологической оценки зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла: при сдаче в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта, реконструкции (Глава IV); в процессе эксплуатации (Глава V); перед проведением капитального ремонта, реконструкции (Глава VI); перед сносом (Глава VII). Некоторые аспекты разработки отдельных разделов нового документа были представлены ранее в публикациях [1, 2].

В соответствии с МР 2.6.1.0333-23 на разных этапах жизненного цикла зданий подлежат определению разные перечни показателей радиационной безопасности, некоторые из которых ранее в рамках МУ 2.6.1.2838-11 не определялись. Однако все эти показатели присутствуют в области аккредитации подавляющего большинства ИЛ соответствующего профиля и ранее также подлежали определению в соответствии с действующими МУ 2.6.1.2398-08⁷, а также МУ 2.6.5.032-2017⁸ в части контроля поверхностного загрязнения альфа- и бета-активными радионуклидами. Новые МР 2.6.1.0333-23 лишь уточняют и детализируют алгоритмы проведения радиационного контроля в конкретных ситуациях. Приведенные в документе требования к средствам радиационного контроля учитывают метрологические характеристики средств измерений (СИ), обеспечивающих определение необходимых физических величин с достаточной точностью и внесенных в государственный реестр средств измерений – ФГИС Росстандарта, подсистему «АРШИН» [3].

Крайне важно обратить внимание на то, что ни МР 2.6.1.0333-23, ни МУ 2.6.1.2838-11 не являются методиками (методами) измерений: они не задумывались таковыми и не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к соответствующим документам Федеральным законом от 26.06.2008 № 103-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (часть 11 статьи 2; части 1 и 2 статьи 5). Кроме того, измерения мощности дозы гамма-излучения, ОА радона и торона, плотности потока альфа- и бета-частиц и удельной активности радионуклидов в материала-

⁷ 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 sites 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.)]

⁸ Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей: Методические указания МУ 2.6.5.032-2017. Утверждены заместителем руководителя ФМБА России, Главным государственным санитарным врачом по обслуживаемым организациям и обслуживаемым территориям 05.05.2017 [Control of radioactive contamination of surfaces. Guidelines MU 2.6.5.032-2017. Approved by the Deputy Head of the FMBA of Russia, the Chief state sanitary doctor for serviced organizations and serviced territories on 05.05.2017. (In Russ.)]

лах относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений⁹. Непосредственное выполнение измерений и оценка неопределенности измерений физических величин, которые либо напрямую являются показателями радиационной безопасности (например, мощность дозы гамма-излучения), либо на основе которых этот показатель рассчитывается (например, ЭРОА радона и торона), осуществляются в соответствии с аттестованными методиками (методами) измерений или руководствами по эксплуатации СИ, внесенными в область аккредитации ИЛ (согласно части 2 статьи 5 Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ, методики (методы) измерений, предназначенные для выполнения прямых измерений, вносятся в эксплуатационную документацию на СИ).

В текст МР 2.6.1.0333-23 внесен пункт, разъясняющий порядок сравнения результатов измерений параметров радиационной обстановки с установленными нормативами: согласно п. 7.4 ГОСТ 8.638–2013¹⁰, решение о соответствии контролируемого показателя радиационной безопасности установленному нормативу принимается с учетом оцененной расширенной неопределенности результата измерений (с коэффициентом охвата $k=2$, соответствующим интервалу с уровнем доверия, близким к 95%, согласно пп. 6.3.3 ГОСТ 34100.3–2017¹¹). В связи с этим все математические условия, использующиеся в МР 2.6.1.0333-23, переработаны с учетом современных подходов к выражению неопределенности измерений^{12,13}, а в необходимых случаях (для показателей, рассчитываемых на основе результатов измерений нескольких физических величин, например, эффективной удельной активности природных радионуклидов (ПРН) или ЭРОА изотопов радона) приведены формулы для расчета суммарной неопределенности.

Контроль МАЭД гамма-излучения

Говоря о контроле мощности дозы гамма-излучения, надо сказать, что упоминание в пп. 5.3.2 и 5.3.3 НРБ-99/2009 мощности эффективной дозы гамма-излучения все еще продолжает вызывать недопонимание у многих пользователей этого документа, поскольку в СанПиН 2.6.1.2800-10 в формулировку аналогичных пунктов (4.2.6 и 4.2.7) внесены изменения, и речь уже идет о мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, а численное значение допустимого превышения составляет 0,3 мкЗв/ч. Здесь следует пояснить, что измеряемая (операционная) величина – мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) – является приемлемо консервативной оценкой величин, используемых для целей радиационной защиты – мощности эквивалентной дозы и мощности эффективной дозы, которые являются не прямо измеряемыми величинами, а исключительно расчетными, но в которых выражены установленные нормативы. Для спектров излучения ПРН соотношение между поглощенной, а также эквивалентной дозой (коэффициент перехода между которыми для гамма-излучения составляет единицу¹⁴), которая используется в ОСПОРБ 99/2010 и СанПиН 2.6.1.2800-10, и эффективной дозой, которая используется в НРБ-99/2009, составляет, согласно оценкам Научного комитета по действию атомной радиации при ООН (НКДАР ООН), 0,7 [4]. По этой причине между одним и тем же нормативом, приведенным и в НРБ-99/2009 (пп. 5.3.2 и 5.3.3), и в СанПиН 2.6.1.2800-10 (пп. 4.2.6 и 4.2.7), существует странная, на первый взгляд, нестыковка. Однако причина заключается именно в использовании разных дозовых величин. Дабы исключить сложности с трактовкой этих величин, в соответствующих пунктах МР 2.6.1.0333-23 используются ссылки только на пункты СанПиН 2.6.1.2800-10 и ОСПОРБ 99/2010.

⁹ Постановление Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847 (ред. от 07.02.2023) «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» [Decree of the Government of the Russian Federation of 16.11.2020 No. 1847 (as amended on 17.02.2023) "On approval of the list of measurements related to the sphere of state regulation of ensuring the uniformity of measurements" . (In Russ.)]

¹⁰ ГОСТ 8.638–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения». Введен в действие приказом Росстандарта от 13.03.2014 № 138-ст. [Interstate Standard GOST 8.638–2013 "State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrological ensuring of radiation control. General principles". Put into effect by the order of Rosstandart of 13.03.2014 No. 138-st. (In Russ.)]

¹¹ ГОСТ 34100.3–2017 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения». Введен в действие приказом Росстандарта от 12.09.2017 № 1065-ст. [Interstate Standard GOST 34100.3–2017 "Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement" (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Put into effect by the order of Rosstandart of 12.09.2017 No. 1065-st. (In Russ.)]

¹² РМГ 29–2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения». Введены в действие приказом Росстандарта от 05.12.2013 № 2166-ст. [Recommendations on interstate standardization RMG 29–2013 "State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions". Put into effect by the order of Rosstandart of 05.12.2013 No. 2166-st. (In Russ.)]

¹³ РМГ 91–2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Использование понятий «Погрешность измерения» и «Неопределенность измерений». Общие принципы». Введены в действие приказом Росстандарта от 30.10.2019 № 1058-ст. [Recommendations on interstate standardization RMG 91–2019 "State system for ensuring the uniformity of measurements. Use of concepts «error of measurement» and «uncertainty of measurement». General principles". Put into effect by the order of Rosstandart of 30.10.2019 No. 1058-st. (In Russ.)]

¹⁴ Приложение 7 к НРБ-99/2009 [NRB-99/2009, Annex 7. (In Russ.)]

В п. 3.12 МР 2.6.1.0333-23 отсутствует ограничение на проведение измерений МАЭД гамма-излучения при толщине снежного покрова более 0,1 м, которое присутствовало в п. 4.5 МУ 2.6.1.2838-11. Предварительно были проведены расчеты слоев половинного ослабления для энергий фотонов, максимально близких к основным энергетическим линиям гамма-излучения ПРН (^{226}Ra – по линиям ^{214}Bi 0,609 и 1,758 МэВ, ^{232}Th – по линии ^{208}Tl 2,614 МэВ, ^{40}K по линии 1,460 МэВ), и различных типов снега с использованием универсальных справочных таблиц Н.Г. Гусева [5]: разброс значений составил от 32 до 667 см при среднем 161 см. Для стандартной плотности снега $\rho=0,3 \text{ г/см}^3$ (согласно п. А.2.2 ГОСТ Р ИСО 4355–2016¹⁵) для различных энергетических линий разброс значений составил от 90 до 113 см при среднем 100 см. Учитывая, что кратность ослабления $K=2^n$, где n – число слоев половинного ослабления, слой снега стандартной плотности толщиной 10 см будет давать пренебрежимо малое ослабление всего на 7%. Исходя из этого, в п. 3.12 требование к толщине снежного покрова оставлено только для измерений ППР с поверхности грунта.

Идентификация радиационных аномалий

Как и МУ 2.6.1.2838-11, новые МР 2.6.1.0333-23 предусматривают проведение поисковой гамма-съемки помещений зданий с целью выявления возможных радиационных аномалий, однако в процедуру их идентификации были внесены существенные изменения. В рамках МР 2.6.1.0333-23 различают локальные радиационные аномалии (ЛРА) и участки радиоактивного загрязнения (УРЗ). Причиной возникновения ЛРА является повышенное содержание ПРН в материалах строительных конструкций, тогда как УРЗ – присутствие в них техногенных радионуклидов, в том числе в виде открытых или закрытых источников ионизирующего излучения. Такое разграничение связано с разницей в установленных санитарными правилами подходах к дальнейшему обращению с образующимися производственными отходами, содержащими техногенные радионуклиды¹⁶ или только ПРН¹⁷.

В целом, на этапе поиска и выявления возможных радиационных аномалий под обоими этими терминами подразумевается ограниченная зона на поверхности ограждающих конструкций здания, в границах которой МАЭД гамма-излучения вплотную к поверхности конструкций превышает следующие значения:

– $H_{OM}^{\min} + U(H_{OM}^{\min}) + 0,3 \text{ мкЗв/ч}$ в помещениях жилых и общественных зданий (эксплуатируемых или вводимых в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта, реконструкции), где $H_{OM}^{\min}$ – наименьший из результатов измерений МАЭД гамма-излучения на открытой местности, а $U(H_{OM}^{\min})$ – его расширенная неопределенность;

– 0,6 мкЗв/ч во всех остальных случаях.

Классификация ЛРА на прилегающей территории осуществляется в соответствии с действующими методическими указаниями по радиационному контролю и санитарно-эпидемиологической оценке земельных участков под строительство зданий и сооружений в части обеспечения радиационной безопасности (в данный момент – МУ 2.6.1.2398-08).

Определение минимального объема контроля помещений

При разработке МР 2.6.1.0333-23 была проведена корректировка схемы расчета минимального объема контроля помещений, поскольку в схеме из МУ 2.6.1.2838-11 были математические изъяны: так, например, если в доме 10 квартир, то обследованию подлежали 4, а если 11 – то одна. Новая схема (рис.) обеспечивает ступенчатое безразрывное увеличение объема выборки помещений. При этом для случая контроля зданий (сооружений), вводимых в эксплуатацию после окончания строительства, капитального ремонта, реконструкции, и для случая контроля зданий (сооружений) перед капитальным ремонтом или реконструкцией выборка формируется по-разному: в первом случае доля и минимальное количество обследуемых квартир (помещений) зависят от общего количества квартир в многоквартирных жилых домах (помещений для постоянного пребывания людей в общественных зданиях и производственных зданиях и сооружениях), а во втором случае – от общего количества расположенных только на первом и цокольном (при его наличии) этаже квартир в многоквартирных жилых домах, помещений в многоквартирных жилых домах, общественных зданиях и производственных зданиях и сооружениях.

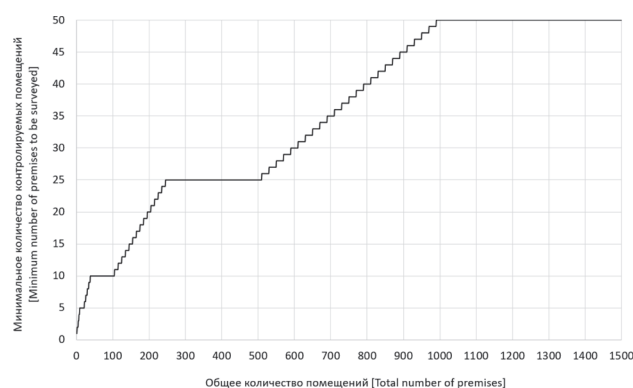


Рис. График зависимости минимального объема контроля помещений от общего их количества в здании (сооружении)
[Fig. Dependence of the minimum number of premises to be surveyed on their total number in the building (facility)]

¹⁵ ГОСТ Р ИСО 4355–2016 «Основы проектирования строительных конструкций. Определение снеговых нагрузок на покрытия». Утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 13.12.2016 № 2013-ст. [National Standard of the Russian Federation GOST R ISO 4355–2016 “Bases for design of structures – Determination of snow loads on roofs” (ISO 4355:2013, IDT). Approved and put into effect by the order of Rosstandart of 13.12.2016 No. 2013-st. (In Russ.)]

¹⁶ ОСПОРБ 99/2010, пп. 3.11, 1.8 [ОСПОРБ 99/2010, §3.11, §1.8. (In Russ.)]

¹⁷ ОСПОРБ 99/2010, пп. 5.2.9, 1.8; СанПиН 2.6.1.2800-10, Глава VI [ОСПОРБ 99/2010, §5.2.9, §1.8; SanPiN 2.6.1.2800-10, Section VI. (In Russ.)]

Контроль уровней поверхностного загрязнения

В соответствии с Главами VI и VII МР 2.6.1.0333-23 при обследовании перед проведением капитального ремонта, реконструкции или перед сносом здания или сооружения, которое ранее было отнесено в соответствии с п. 3.1 ОСПОРБ 99/2010 к радиационным объектам, радиационный контроль проводится с учетом характера предыдущей эксплуатации здания или сооружения и может включать дополнительные исследования (оценку уровней альфа- и бета-загрязнения поверхностей строительных конструкций в отдельных помещениях, где проводились работы с открытыми или закрытыми ИИИ, в контрольных точках, где по результатам гамма-съемки зафиксированы максимальные показания поисковых приборов).

В ходе работы над проектом МР 2.6.1.0333-23 в формуле для расчета снимаемого поверхностного загрязнения, заимствованной из методических указаний МУ 2.6.5.032-2017 (формула № 28), была обнаружена математическая ошибка, заключающаяся в следующем. Уровень снимаемого поверхностного загрязнения по результатам измерений приборным разностным методом предлагалось рассчитывать следующим образом:

$$Q_{\text{сн}} = Q_{\text{общ}} - \frac{1}{K_{\text{м}}} Q_{\text{нс}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{сн}}$, Бк/см² – уровень снимаемого поверхностного загрязнения;

$Q_{\text{общ}}$, Бк/см² – уровень общего поверхностного загрязнения;

$Q_{\text{нс}}$, Бк/см² – уровень неснимаемого поверхностного загрязнения;

$K_{\text{м}}$, отн. ед. – коэффициент снятия мазка, значение которого принимается по таблице 7.1 МУ 2.6.5.032-2017.

Согласно определению, приведенному в МУ 2.6.5.032-2017, коэффициент снятия мазка $K_{\text{м}}$ – это отношение [снятой] активности радиоактивного вещества, перешедшего с отбираемой площади поверхности на сорбент (тампон) контактным путем, к полной [снимаемой] активности протертой поверхности, т.е. если обеспечено полное снятие загрязнения, то $K_{\text{м}} = 1$, а чем лучше снятие – тем ближе значение $K_{\text{м}}$ к единице.

Уточним принятые ранее обозначения:

$Q_{\text{общ}}$, Бк/см² – результат первого измерения (уровень общего поверхностного загрязнения);

$Q_{\text{нс}}$, Бк/см² – результат второго измерения после протирки (уровень неснимаемого поверхностного загрязнения);

$Q_{\text{сн}}$, Бк/см² – искомый уровень снимаемого поверхностного загрязнения;

$Q_{\text{снятое}}$, Бк/см² – уровень поверхностного загрязнения, реально оказавшегося на тампоне (снятого).

Решим простое уравнение:

$$\begin{aligned} Q_{\text{снятое}} &= Q_{\text{сн}} \cdot K_{\text{м}} \\ Q_{\text{нс}} &= Q_{\text{общ}} - Q_{\text{снятое}} = Q_{\text{общ}} - Q_{\text{сн}} \cdot K_{\text{м}} \\ Q_{\text{сн}} \cdot K_{\text{м}} &= Q_{\text{общ}} - Q_{\text{нс}} \\ Q_{\text{сн}} &= \frac{Q_{\text{общ}} - Q_{\text{нс}}}{K_{\text{м}}} \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, очевидно, что для расчета снимаемого поверхностного загрязнения на основе результатов двух измерений (общего и неснимаемого загрязнения) необходимо использовать формулу (2).

Оценка неопределенности измерений

Анализ поступающих разработчикам МР 2.6.1.0333-23 многочисленных запросов позволил сделать вывод о том, что основную сложность представляет не организация обследований зданий по предложенным алгоритмам, а оценка неопределенности измерений физических величин, которые либо напрямую являются показателями радиационной безопасности, либо на основе которых этот показатель рассчитывается, т.е. речь идет о процедуре, которая должна выполняться в соответствии с аттестованными методиками (методами) измерений или эксплуатационной документацией на СИ. Однако приходится констатировать, что значительная часть методик (например, к Комплексу измерительному для мониторинга радона КАМЕРА-01, радиометру объемной активности радона-222 AlphaGUARD PQ2000) и руководств по эксплуатации (например, к альфа-радиометру РАА-20П2, альфа-радиометру радона аэрозольному РАА-3-01 «АльфаАЭРО», радиометру радона и его дочерних продуктов распада «РАМОН-02») разработана слишком давно и не учитывает современных требований к представлению результатов радиационного контроля, установленных п. 7.4 ГОСТ 8.638–2013, и подходов к выражению неопределенности измерений, установленных ГОСТ 34100.3–2017. Положительными примерами здесь могут служить методики к Комплексу измерительному для мониторинга радона, торона и их дочерних продуктов «Альфарад плюс» (Свидетельство об аттестации № 40090.2М334) и к Комплексу аппаратуры для измерения средней объемной активности радона в воздухе трековым методом ТРЕК-РЭИ-1М (Свидетельство об аттестации № 40090.2И385).

Если руководствоваться общими принципами оценки неопределенности измерений (ГОСТ 34100.3–2017), расчет суммарной стандартной относительной неопределенности u_c для однократного измерения будет производиться по формуле (3):

$$u_c = \sqrt{\frac{\left(\frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%\right)^2 + \theta_1^2 + \dots + \theta_m^2}{3}}, \% \quad (3)$$

где X , ед. изм. – результат измерения (например, отображаемый на экране СИ);

ΔX , ед. изм. – погрешность результата измерения (например, отображаемая на экране СИ);

$\theta_1 \dots \theta_m$, % – пределы допускаемых дополнительных относительных погрешностей согласно эксплуатационной документации на СИ.

Для многократных измерений отдельно оценивается стандартная относительная неопределенность по типу А u_A (обусловленная источниками неопределенности, имеющими случайный характер) по формуле (4) и стандартная относительная неопределенность по типу В u_B (обусловленная неисключенными остатками систематических погрешностей) по формуле (5):

$$u_A = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}} \cdot 100\%; \quad (4)$$

$$u_B = \sqrt{\frac{\theta^2 + \theta_1^2 + \dots + \theta_m^2}{3}}, \%, \quad (5)$$

где X_i , ед. изм. – i -й результат измерения (например, отображаемый на экране СИ);

$\bar{X}$, ед. изм. – среднее арифметическое значение из n результатов измерений, рассчитываемое по формуле (6):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \text{ ед. изм.}; \quad (6)$$

θ , % – предел допускаемой основной относительной погрешности согласно эксплуатационной документации на СИ.

Расчет суммарной стандартной относительной неопределенности u_C для многократных измерений будет производиться по формуле (7):

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \% \quad (7)$$

Если метрологическая характеристика «неопределенность измерения нуля U_0 » (см. п. 7.19 РМГ 29–2013) в эксплуатационной документации не представлена, то суммарная стандартная относительная неопределенность u_C измерения, результат которого не превысил нижней границы диапазона измерений СИ (которая принимается за X), может быть оценена как стандартная относительная неопределенность по типу В u_B по формуле (5).

Далее рассчитывается расширенная относительная неопределенность для коэффициента охвата $k=2$ ($P=95\%$) U по формуле (8):

$$U = 2 \cdot u_C, \% \quad (8)$$

И наконец абсолютная расширенная неопределенность измерения $\tilde{U}$ будет определяться по формуле (9):

$$\begin{aligned} \tilde{U} &= 0,01 \cdot U \cdot \bar{X}, \text{ ед. изм. (для многократных измерений)} \\ \tilde{U} &= 0,01 \cdot U \cdot X, \text{ ед. изм. (для однократных измерений)} \end{aligned} \quad (9)$$

$P=95\%$ – это значение уровня доверия (вероятность охвата) – доли распределения значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине, охватываемой интервалом значений под названием «Расширенная неопределенность» (см. пп. 2.3.5 ГОСТ 34100.3–2017). В соответствии с пп. 6.3.3 ГОСТ 34100.3–2017 значение коэффициента охвата (на который умножают суммарную стандартную неопреде-

ленность для получения расширенной неопределенности – см. пп. 2.3.6 ГОСТ 34100.3–2017) $k=2$ соответствует интервалу с уровнем доверия, близким к 95%.

Указывать результат измерения в виде $X \pm \tilde{U}$ (или $\bar{X} \pm \tilde{U}$ для многократных измерений) некорректно, т.к. неопределенность измерений характеризует рассеяние множества возможных значений результатов измерений в рассматриваемой измерительной ситуации, но не погрешность конкретного результата измерения (см. п. А.2.3 РМГ 91–2019).

Представление результатов измерений и оформление протоколов обследований

Рекомендуемая форма протокола обследования (радиационного контроля) в МР 2.6.1.0333-23 не приводится. Причин этому две: во-первых, она зависит от конкретных методик или эксплуатационных документов, внесенных в область аккредитации ИЛ, указанных в них определяемых характеристик (показателей) и диапазонов их определения, а во-вторых, протокол по своему оформлению и структуре должен отвечать только требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025–2019¹⁸ и ГОСТ Р 58973–2020¹⁹, а его типовая форма может быть приведена в документах системы менеджмента качества ИЛ. Однако если, согласно методике или эксплуатационным документам, результат измерения представляется в виде $X \pm \Delta X$, то для дальнейших расчетов суммарной неопределенности по формулам (4), (5), (9), (12) и (18) из МР 2.6.1.0333-23 погрешность ΔX непригодна. В них необходимо использовать значение $\tilde{U}$, алгоритм расчета которого описан выше. При этом результаты определения любых показателей радиационной безопасности (в первую очередь, рассчитываемых на основе прямо измеряемых физических величин) и их неопределенностей согласно МР 2.6.1.0333-23 в основной части протокола приведены быть не могут, если они не перечислены в области аккредитации ИЛ для соответствующих методик. Для этого в протоколе предназначена часть «Дополнительная информация» (см. пп. 7.8.3.1(е) ГОСТ ISO/IEC 17025–2019), отделенная от основной части; именно в ней приводятся таблицы с результатами расчетов показателей радиационной безопасности.

Заключение

Кардинальное отличие новых МР 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. Из документа были удалены все требования, относящиеся непосредственно к процессу выполнения измерений физических величин, и упо-

¹⁸ ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Введен в действие приказом Росстандарта от 15.07.2019 № 385-ст. [Interstate Standard GOST ISO/IEC 17025–2019 “General requirements for the competence of testing and calibration laboratories” (ISO/IEC 17025:2017, IDT). Put into effect by the order of Rosstandart of 15.07.2019 No. 385-st. (In Russ.)]

¹⁹ ГОСТ Р 58973–2020 «Оценка соответствия. Правила к оформлению протоколов испытаний». Утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 27.08.2020 № 563-ст. [National Standard of the Russian Federation GOST R 58973–2020 “Conformity assessment. Rules for registration of test reports”. Approved and put into effect by the order of Rosstandart of 27.08.2020 No. 563-st. (In Russ.)]

минания любых необязательных количественных и качественных показателей, не являющихся контролируемыми параметрами радиационной обстановки, определение которых требует от ИЛ наличия вспомогательных СИ или доступа к некой статистической информации, которые по тем или иным причинам могут оказаться невозможными. Все математические условия, использующиеся в МР 2.6.1.0333-23, были переработаны с учетом современных подходов к выражению неопределенности измерений. В совокупности внесенные изменения должны положительно сказаться на качестве измерительной информации, получаемой ИЛ и лежащей в основе принимаемых органами исполнительной власти решений, а также минимизировать сложности при прохождении ИЛ процедур аккредитации и подтверждения компетентности.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Кононенко Д.В. написал черновик рукописи, подготовил формулы, английский перевод и представил окончательный вариант рукописи для публикации в журнале.

Кормановская Т.А. подготовила рисунок, 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. 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.
2. Кормановская Т.А., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А. и др. Контроль показателей радиационной безопасности зданий и сооружений, подлежащих сносу // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 42–51. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-42-51.
3. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Утвержденные типы средств измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Дата обращения: 15.03.2024).
4. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. New York: United Nations, 2010. 249 p.
5. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.

Поступила: 15.03.2024 г.

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 1 // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 138–147. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147

New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 1

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 on 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 covers all stages of the life cycle of buildings and facilities: commissioning; operation period; overhaul and reconstruction; demolition. In the first part of the paper, the structure and legal status of the new guidelines are considered, as well as the main innovations in terms of measuring the ambient dose equivalent rate of gamma radiation, searching and identifying local radiation anomalies and sites of radioactive contamination, measuring surface contamination levels, and determining the minimum number of premises to be surveyed. The reasons for the introduction of certain changes are outlined. The issues of evaluation of measurement uncertainty, reporting of measurement results and registration of test reports are covered in detail. In the second part of the paper, numerous innovations will be considered in terms of estimating the indoor average annual equilibrium equivalent concentration of radon isotopes.

Key words: radiation survey, radiation safety indicators, buildings and facilities, commissioning, overhaul, reconstruction, demolition, radon concentration, density of radon flux, ambient dose equivalent rate, radionuclides activity concentration, local radiation anomaly.

Personal contribution of the authors

Kononenko D.V. wrote the draft of the manuscript, prepared equations, translated the manuscript, and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

Kormanovskaya T.A. prepared the figure, and edited the interim version of the manuscript.

Vasilyev A.S. conducted a search and analysis of literature data, and edited the interim version of the manuscript.

Saprykin K.A. edited the interim version of the manuscript.

Conflicts of interest

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. 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) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-3-29-40>.
2. Kormanovskaya TA, Kononenko DV, Saprykin KA, Vasilyev AS, Koroleva NA, Kokoulina ES, et al. Radiation survey of buildings and structures to be demolished. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022; 15(2): 42–51. (In Russian) <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2022-15-2-42-51>.
3. Federal Information Fund for ensuring the uniformity of measurements. Approved types of measuring instruments. Available from: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4> (Accessed 15 Mar 2024). (In Russian).
4. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume I. Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation. New York: United Nations; 2010. 249 p.
5. Mashkovich VP, Kudryavtseva AV. Protection from ionizing radiation: Handbook. 4th Ed. Moscow: Energoatomizdat; 1995. 496 p. (In Russian).

Received: March 15, 2024

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

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 – PhD, 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: New guidelines on radiation survey and sanitary assessment of residential, public and industrial buildings and facilities in terms of radiation safety indicators. Part 1 Kononenko D.V., Kormanovskaya T.A., Vasilyev A.S., Saprykin K.A. *Radiatsionnaya Gygiena* = *Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 138–147. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-138-147

Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the “Taiga” peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia)

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

Activities of gamma-emitting radionuclides were measured in glassy inclusions (particles) found in soil samples from the “Taiga” peaceful nuclear explosions site (the Perm region, Russia). The measurements were performed using a stationary semiconductor gamma spectrometer. Activity concentrations were determined for the following technogenic radionuclides: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , and ^{241}Am . The activity concentrations of ^{241}Am in the glassy inclusions were one to two orders of magnitude higher compared to the level of minimum significant activity concentration (1 Bq/g for ^{241}Am) established by the Russian Radiation Safety Standards “NRB-99/2009”. Earlier, exceeding this level for the ^{241}Am activity concentration in the native (unfractionated) soil samples from the “Taiga” site was reported by other researchers. In accordance with current Russian legislative and regulatory provisions regarding use of nuclear charges for peaceful purposes, the soil and radioactive glassy inclusions found in the soil correspond to the category of special radioactive waste. Considering the long half-life of ^{241}Am (432 years), radiologically significant contamination by this radionuclide will persist at the “Taiga” site for the foreseeable future.

Key words: peaceful underground nuclear explosion, “Taiga”, soil, glassy inclusions, technogenic radionuclides.

Радиоактивные стекловидные включения в почве, отобранной на месте проведения мирных подземных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия)

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

Измерена активность гамма-излучающих радионуклидов в стекловидных включениях (частицах), обнаруженных в почве, которая была отобрана в месте проведения мирных ядерных взрывов проекта «Тайга» (Пермский край, Россия). Измерения были проведены с помощью стационарного полупроводникового гамма-спектрометра. Была определена удельная активность следующих техногенных радионуклидов: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am . Значения удельной активности ^{241}Am в стекловидных включениях на 1–2 порядка величины превышали уровень минимально значимой удельной активности (1 Бк/г) по НРБ-99/2009. Превышение этого уровня удельной активности ^{241}Am было зарегистрировано ранее другими исследователями в нефракционированной (нативной) почве. В соответствии с действующими российскими законодательно-нормативными положениями, касающимися использования ядерных зарядов в мирных целях, почва и обнаруженные в ней радиоактивные стекловидные включения соответствуют категории особых радиоактивных отходов. Учитывая длительный период полураспада ^{241}Am (432 года), радиологически значимое загрязнение почвы этим радионуклидом на объекте «Тайга» будет сохраняться в обозримой временной перспективе.

Ключевые слова: мирный подземный ядерный взрыв, «Тайга», почва, стекловидные включения, техногенные радионуклиды.

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

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

Introduction

One of the consequences of an underground nuclear explosion is formation of a deep cavity where radioactive products of the explosion are concentrated. The underground cavity is partially filled with a glassy (vitreous) substance which is formed in the very initial phase of the explosion by melting, evaporation and condensation of the components contained in the explosion zone [1–3]. The long-lived technogenic radionuclides present in the components (including the glassy substance) of the underground cavity originate from nuclear fuel residues (for example, ^{235}U , ^{239}Pu), products of nuclear transformations of nuclear fuel components (^{241}Am from ^{241}Pu), fission products (^{137}Cs , ^{155}Eu), products of activation of non-radioactive components of explosive device (^{60}Co), and activation products of natural nuclides (^{152}Eu) [2]. The radioactive products that were captured by the glassy mass practically do not migrate into the environment [1]; the solidified rock melt itself can be considered as a place for a fairly reliable burial of the long-lived technogenic radionuclides at great depth underground [4].

When conducting peaceful nuclear explosions (PNE) at shallow depths with the aim of ejecting rock onto the surface of the earth (an excavation explosion to create a dam, canal or lake), conditions are also created for the release of glassy material (in the form of radioactive particles) from the explosion zone to the surface. For example, relatively small radioactive vitreous particles (size up to several millimeters) and pieces of radioactive slag were found on the crest of the soil pile at the site of the “Chagan” PNE (Semipalatinsk Test Site (STS), Kazakhstan, 15.01.1965). The slag fragments had irregularly shape and sizes up to several centimeters [4]. Studies of the physicochemical properties and radionuclides composition of such glassy and melted formations in comparison with native soil are of particular interest for predicting radioactive contamination of water bodies, because the rates of leaching of technogenic radionuclides from the glassy particles and from the soil can vary significantly [4, 5]. In addition, it is highly likely that the residual radioactive contamination of glassy particles and fragments may be very significant and even pose a danger from a radiological point of view, because in the camouflage explosions, up to 95–98% of the residual activity of long-lived technogenic radionuclides is contained precisely in the glassy material deposited at the bottom of the explosion cavity [4].

There are two sites of excavation PNEs on the territory of Russia: the “Crystal” site (thermonuclear explosion to create a dam, 02.10.1974) and the “Taiga” site (simultaneous detonation of three thermonuclear charges to create a section of a canal, 23.03.1971) [4, 6, 7]. Large-scale isolation works were carried out at the “Crystal” site; the most contaminated areas were covered with clean rock. No works on decontamination and physical isolation of radioactively contaminated places were performed at the “Taiga” PNE site.

In 2009 at the artificial lake on the “Taiga” site (61.30° N, 56.60° E; the Perm region) (Fig. 1), the expedition of the Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev (RIRH) collected soil samples [6]. Laboratory analysis of unfractionated native soil revealed presence of a number of long-lived anthropogenic radionuclides (^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{207}Bi , ^{241}Am) [8]. After the gamma spectrometric analysis, all soil samples

Введение

Последствиями ядерных взрывов, произведенных в мирных или оборонных целях под землей, являются глубинные радиоактивные захоронения, сосредоточенные в полости взрыва. Подземная полость частично заполнена стекловидной массой, которая образуется в самой начальной фазе взрыва путем расплава, испарения и конденсации содержащихся в зоне взрыва компонентов [1–3]. Структурные элементы подземной полости и, в частности, стекловидная масса содержат долгоживущие радионуклиды различного происхождения: из остатков ядерного горючего (например, ^{235}U , ^{239}Pu), продуктов ядерных превращений компонентов ядерного горючего (^{241}Am из ^{241}Pu), продуктов деления (^{137}Cs , ^{155}Eu), продуктов активации нерадиоактивных компонентов взрывного устройства (^{60}Co) и продуктов активации природных нуклидов (^{152}Eu) [2]. Содержащиеся в стекловидной массе радиоактивные продукты взрыва в дальнейшем практически не мигрируют в окружающую среду [1], а сам отвердевший расплав пород можно рассматривать в качестве объекта (места) достаточно надежного захоронения долгоживущих техногенных радионуклидов на большой глубине под землей [4].

При проведении мирных ядерных взрывов (МЯВ) на небольшой глубине с целью выброса грунта на поверхность земли (экскавационный взрыв для создания канала, озера или плотины) также создаются условия для выброса на поверхность и стекловидного материала (в форме радиоактивных частиц), образовавшегося в зоне взрыва. Например, на гребне навала грунта (почвы) в месте проведения экскавационного МЯВ «Чаган» (Семипалатинский испытательный полигон (СИП), Казахстан, 15 января 1965 г.), наряду с относительно мелкими радиоактивными частицами (размеры до нескольких миллиметров), можно было обнаружить радиоактивный шлак, имевший вид кусков (фрагментов) неправильной формы размерами до нескольких сантиметров [4]. Изучение физико-химических свойств и радионуклидного состава таких стекловидных и оплавленных образований в сравнении с почвой представляет определенный интерес для составления прогноза радиоактивного загрязнения водных объектов, т.к. скорости выщелачивания техногенных радионуклидов из стекловидных частиц и из почвы могут существенно различаться [4, 5]. Кроме того, вполне вероятно, что уровень остаточного радиоактивного загрязнения стекловидных частиц и фрагментов может оказаться весьма значительным и даже представлять опасность с радиологической точки зрения, т.к. при камуфлетных взрывах до 95–98% остаточной активности долгоживущих техногенных радионуклидов содержится именно в стекловидном материале, осевшем на дне взрывной полости [4].

На территории России имеется два места проведения экскавационных МЯВ: объект «Кристалл» (термоядерный взрыв с целью создания плотины, 02.10.1974 г.) и объект «Тайга» (одновременный подрыв трех термоядерных зарядов с целью создания отрезка канала, 23.03.1971 г.) [4, 6, 7]. На объекте «Кристалл» были проведены масштабные изоляционные работы, и наиболее загрязненные места были покрыты чистой горной породой. На месте проведения МЯВ «Тайга» каких-либо работ по дезактивации и физической изоляции мест радиоактивного загрязнения не выполнялось.

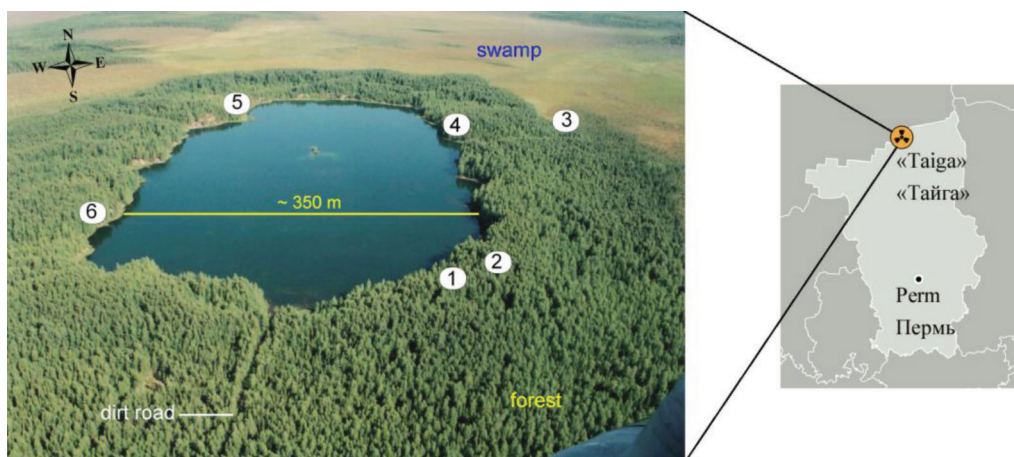


Fig. 1. Location of the «Taiga» PNE site in the Perm region and the soil sampling plots (denoted as 1 through 6) on the banks of the «Taiga» lake. The photo was taken from a helicopter in August 2009

[Рис. 1. Расположение места проведения МЯВ «Тайга» в Пермском крае и площадок отбора проб почвы (обозначены цифрами от 1 до 6) на берегах озера «Тайга». Фотография сделана с вертолета в августе 2009 г. Обозначения: swamp – болото; forest – лес; dirt road – грунтовая дорога]

were dried and sent for storage to the soil archive of the RIRH. When sorting through the soil samples collected on the southeastern shore of the lake «Taiga» (Fig. 1; Plot No. 2), we found several solid inclusions (particles) that in appearance resembled pieces of fused glass. The sizes of these items varied from a few millimeters to several centimeters. The shape of the inclusions was irregular. Figure 2 shows images of the largest glassy inclusion; Figure 3 shows a relatively small flat inclusion.

В 2009 г. на объекте «Тайга» (61.30° с.ш., 56.60° в.д., Пермский край), представлявшего собой искусственное озеро (рис. 1), участниками экспедиции НИИРГ им. П.В.Рамзаева [6] были отобраны пробы почвы. Лабораторный анализ нефракционированной нативной почвы выявил присутствие целого ряда долгоживущих антропогенных радионуклидов (^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu , ^{207}Bi , ^{241}Am) [8]. После проведения гамма-спектрометрического анализа все образцы почвы были высушены и

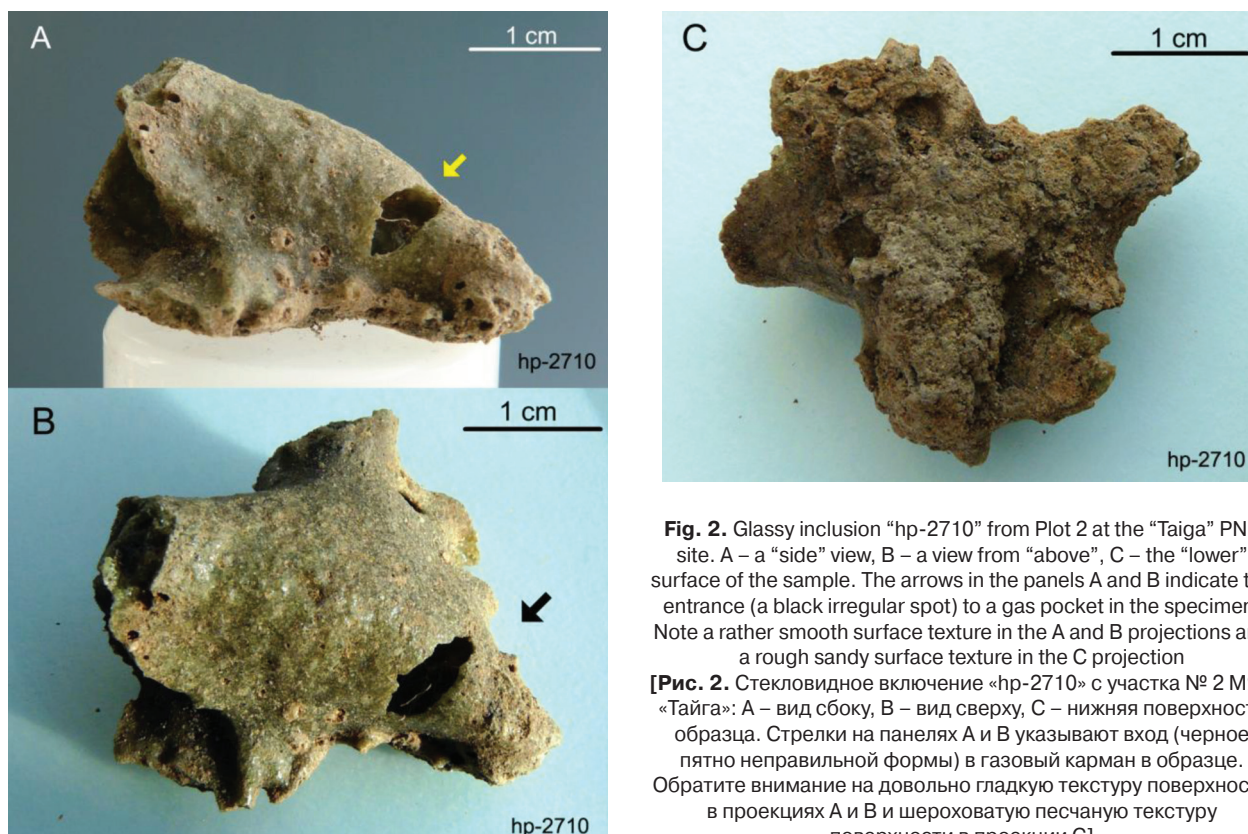


Fig. 2. Glassy inclusion «hp-2710» from Plot 2 at the «Taiga» PNE site. A – a «side» view, B – a view from «above», C – the «lower» surface of the sample. The arrows in the panels A and B indicate the entrance (a black irregular spot) to a gas pocket in the specimen. Note a rather smooth surface texture in the A and B projections and a rough sandy surface texture in the C projection

[Рис. 2. Стекловидное включение «hp-2710» с участка № 2 МЯВ «Тайга»: А – вид сбоку, В – вид сверху, С – нижняя поверхность образца. Стрелки на панелях А и В указывают вход (черное пятно неправильной формы) в газовый карман в образце. Обратите внимание на довольно гладкую текстуру поверхности в проекциях А и В и шероховатую песчаную текстуру поверхности в проекции С]

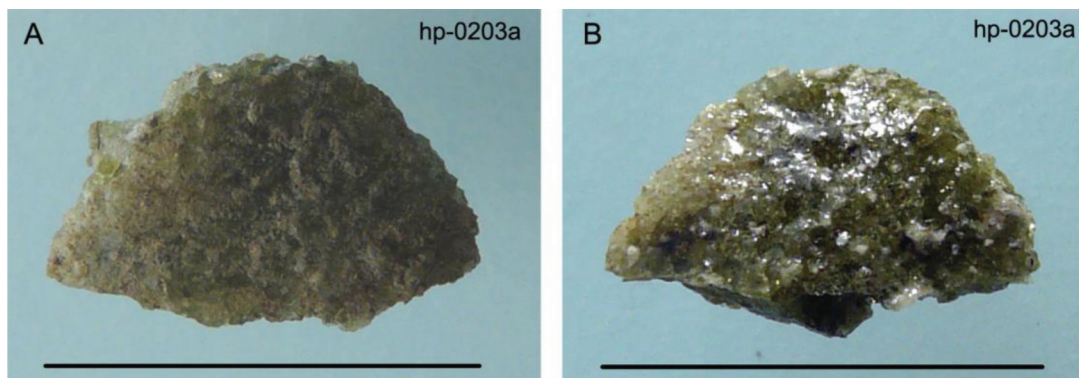


Fig. 3. Glassy inclusion hp-0203a before (A) and after (B) ultrasonic treatment for 600 s in distilled water. The length of the measuring segment is 1 cm

[Рис. 3. Стекловидное включение hp-0203a до (А) и после (В) ультразвуковой обработки в течение 600 с в дистиллированной воде. Длина мерного отрезка равна 1 см]

The objectives of the study were: 1) to measure the activity concentrations (AC) of gamma-emitting technogenic radionuclides in the glassy inclusions, and 2) to determine the ratio between AC values in the inclusions and in native non-fractionated soil.

Materials and methods

The material of each dry soil sample from Plot No. 2 (the depths of 0–2, 2–4, 4–6, 6–10, 10–12, 12–14, 14–16, 16–18 and 18–20 cm) was distributed over the bottom of individual flat plastic cuvette. Among the visually detected glassy inclusions, the seven largest samples were selected (size more than 5–6 mm). These could be reliably manipulated without use of special magnifying devices. The surface of the samples was cleaned of soil particles using a small paint brush. Bubble-like formations were visible inside some of the inclusions. Inside the sample hp-2710 there was a cavity, the entrance to which is indicated by an arrow in Figure 2 (panels A and B). Note that for some inclusions, it was not possible to clean the entire surface. For example, for the sample hp-2710 (Fig. 2, panel C), sand particles densely covered the “bottom” surface. After the cleaning, each inclusion was weighed on the AF-R220CE analytical electronic balance (Shinko Denshi Co., Ltd, Japan).

The activities of gamma-emitting technogenic radionuclides in the samples were measured using spectrometer setup that included a HPGe detector and the 8192-channel analyzer (ORTEC, USA). The detector and Dewar flask with liquid nitrogen were placed inside a stationary shield made of steel (20 cm thick). The detector was additionally surrounded by a 10 cm thick lead shield [9]. The energy resolution of the gamma spectrometer was 1.8 keV for the ^{60}Co 1332.5 keV line and 0.94 keV for the ^{152}Eu 122.8 keV line. The absolute efficiency of the detection system was determined using certified point sources of gamma radiation (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{207}Bi , and ^{241}Am). The point geometry was directly used to calculate activity in the six samples ranged in size within 1.2 cm (e.g., hp-0203a inclusion, see Fig. 3). The geometry of the large inclusion hp-2710 (Fig. 2) was approximated by a cylinder (diameter = 4 cm, height = 2 cm). In this case, the gamma quanta registration efficiency was calculated using the Nuclide Master Plus software [10]. The measurements were performed with a sample placed at a distance of 1 cm

направлены на хранение в архив НИИРГ им. П.В. Рамзаева. В последующем при ревизии архива в образцах почвы, отобранной на юго-восточном берегу озера (площадка 2 на рисунке 1), нами были обнаружены твердые включения (частицы), по внешнему виду напоминавшие оплавленное стекло. По размерам эти объекты варьировали от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. Форма включений была неправильной. Края включений были как обломанными, так и закругленными. На рисунке 2 приведено изображение самого крупного стекловидного включения; на рисунке 3 показана сравнительно небольшая уплощенная частица.

Цель исследования – определение удельной активности гамма-излучающих техногенных радионуклидов в стекловидных включениях.

Материалы и методы

Среди визуально обнаруженных включений было выбрано 7 наиболее крупных образцов (поперечник более 5–6 мм), с которыми можно было надежно проводить манипуляции без использования специальных увеличительных устройств. Поверхность образцов была очищена от частиц почвы с использованием кисточки для рисования. Внутри некоторых включений просматривались мелкие пузырько-видные образования, а внутри образца hp-2710 имелась полость, вход в которую показан стрелкой на рисунке 2 (панели А и В). Отметим, что на некоторых включениях удавалось очистить не всю поверхность. Например, для образца hp-2710 (см. рис. 2, панель С) частицы песка плотно покрывали всю «нижнюю» поверхность. После очистки каждое включение было взвешено на аналитических электронных весах AF-R220CE (Shinko Denshi Co., Ltd, Japan).

Активность гамма-излучающих техногенных радионуклидов в пробах измеряли с помощью детекторной установки, состоящей из HP Ge-детектора и 8192-канального анализатора (ORTEC, США). Детектор и сосуд Дьюара с жидким азотом были размещены внутри стационарной защиты из стали (20 см толщиной). Дополнительно сам детектор был защищен слоем свинца толщиной 10 см [9]. Энергетическое разрешение гамма-спектрометра составляло 1,8 кэВ для линии ^{60}Co 1332,5 кэВ и 0,94 кэВ для линии ^{152}Eu 121,8 кэВ. Абсолютную эффективность системы детектирования определяли с использованием сертифицирован-

from the upper surface of the detector cup. Measurement duration ranged from 20,000 to 60,000 s. The activities of radionuclides in the samples were decay corrected to the time of soil sampling at the "Taiga" PNE site (05 August 2009).

One of the samples (hp-0203a, see Fig. 3A) was subjected to ultrasonic cleaning after the gamma spectrometric measurement. The sample was placed in a plastic vial filled with distilled water. The vial was placed in a water bath and treated for 600 s at the operating frequency of 40 kHz and the constant ultrasound power of 40 W using the Citizen ultrasonic cleaner SW 1500 (CBM Corporation, Japan). After the treatment, the surface of the sample experienced a bright fused glass texture; the edges of the sample were sharp (Fig. 3B). Therefore, it can be assumed that this inclusion is part of a large formation that was damaged before or at the moment of soil sampling. After the sonication, the activities of radionuclides in the sample hp-0203a were re-measured using the gamma spectrometer.

Results and discussion

The gamma spectrum measured from the glassy specimen hp-2710 is provided in Figure 4. The spectrum is shown after subtracting the background spectrum without the sample. The spectrogram in Figure 4 clearly shows peaks of the technogenic radionuclides: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , and ^{241}Am . At higher magnification (Fig. 5), one can additionally see the peaks attributed to ^{94}Nb , ^{154}Eu and ^{155}Eu , which are also technogenic radionuclides. The AC values of the detected radionuclides as well as the ratios of the ACs in the glassy inclusion to the ACs in the native (unfractionated) soil from the 10–12 cm depth layer (the layer of deposition of the inclusion hp-2710) are provided in Table 1. The data on the ACs of the radionuclides in soil were taken from [8]. The ACs of all identified technogenic radionuclides in the sample hp-2710 were significantly higher than those in the native soil. The differences

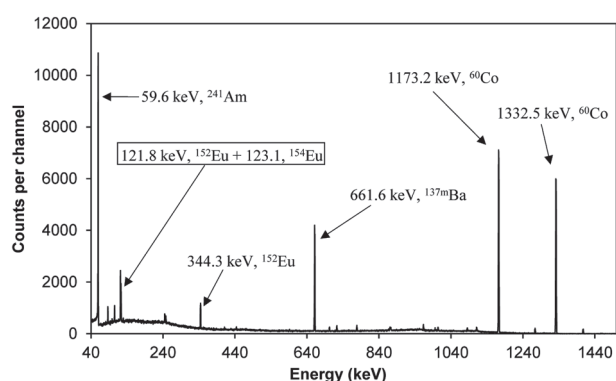


Fig. 4. Gamma-ray spectrum of the inclusion hp-2710 (see Fig. 1) found in the soil sample from Plot 2 at the "Taiga" PNE site.

The major peaks of the technogenic radionuclides ^{241}Am , ^{152}Eu , $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (the short-lived daughter of ^{137}Cs) and ^{60}Co are indicated. The counting time was 60,000 s. The spectrum of the specimen is shown after subtracting the background spectrum

[Рис. 4. Гамма-спектр от включения hp-2710 (см. рис. 1), обнаруженного в пробе почвы с площадки № 2 места проведения МЯВ «Тайга». Указаны основные пики техногенных радионуклидов ^{241}Am , ^{152}Eu , $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (короткоживущий дочерний нуклид ^{137}Cs) и ^{60}Co . Время набора составляло 60 000 с. Спектр от образца показан после вычитания фонового спектра. Обозначения: по оси x – энергия (кэВ); по оси y – число импульсов на канал]

ных точечных источников гамма-излучения (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{207}Bi , ^{241}Am). Точечную геометрию напрямую использовали для вычисления активности в 6 образцах, имеющих размеры в пределах 1,2 см (например, включение hp-0203a, см. рис. 3). Геометрия крупного включения hp-2710 (см. рис. 2) была аппроксимирована цилиндром (диаметр = 4 см, высота = 2 см). В этом случае эффективность регистрации гамма-квантов была вычислена с помощью компьютерной программы Nuclide Master Plus [10]. Все измерения проводили при размещении образца на расстоянии 1 см от верхней поверхности чашки детектора. Продолжительность набора гамма спектров варьировала от 20 000 до 60 000 с. Активности радионуклидов в счетных образцах были пересчитаны на время отбора проб почвы на объекте «Тайга» (05.08.2009) с учетом радиоактивного распада.

Для более явной визуальной демонстрации стекловидной сущности найденных включений, один из образцов (hp-0203a, см. рис. 3A) после выполнения гамма-спектрометрических измерений был подвергнут ультразвуковой очистке в водной среде. Образец помещали в пластиковую вialу, наполненную дистиллированной водой. Вialу размещали в водяной бане и обрабатывали в течение 600 с при рабочей частоте 40 кГц и постоянной мощности ультразвука 40 Вт с использованием установки Citizen ultrasonic cleaner SW 1500 (Japan CBM Corporation). После обработки в ультразвуковом аппарате поверхность образца имела яркую текстуру оплавленного стекла, а края были острыми (см. рис. 3B). Поэтому можно предположить, что данное включение является частью крупной формации, поврежденной до или в момент отбора проб почвы. После ультразвуковой обработки образец hp-0203a был взвешен и повторно прошел этап гамма-спектрометрических измерений.

Результаты и обсуждение

Гамма-спектр, измеренный от стекловидного образца hp-2710, показан на рисунке 4. Спектр приведен после вычитания фонового спектра. На спектрограмме отчетливо видны пики техногенных радионуклидов: ^{241}Am , ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{152}Eu . При большем увеличении (рис. 5) можно дополнительно видеть пики ^{94}Nb , ^{154}Eu и ^{155}Eu , которые также являются техногенными радионуклидами. Значения удельных активностей (УА) радионуклидов, обнаруженных в нативной (нефракционированной) почве из верхнего слоя 10–12 см и в стекловидном образце hp-2710 из этого же слоя, а также их отношения приведены в таблице 1. Данные по УА радионуклидов в почве взяты из работы [8]. Значения УА всех выявленных техногенных радионуклидов в образце hp-2710 были существенно выше таковых в нативной почве. Разница была особенно выраженной для изотопов тугоплавких и труднолетучих элементов Am, Co, Eu и Nb (значения температуры кипения равны 2011, 2927, 1527 и 4744 °C соответственно [11]). В остальных 6 стекловидных включениях УА удалось надежно количественно оценить только для радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{241}Am . Это связано с очень малой массой этих включений (табл. 2). Как видно из таблицы 2, для всех включений УА ^{241}Am и ^{60}Co была многократно больше, чем таковая в нативной почве. Для радионуклида ^{137}Cs со сравнительно низкой температурой кипения (671 °C [11]) это соотношение варьировало от 1,0 до 2,1, но в целом статистически значимо превышало 1 (непараметрический тест по критерию знаков, $P < 0,05$).

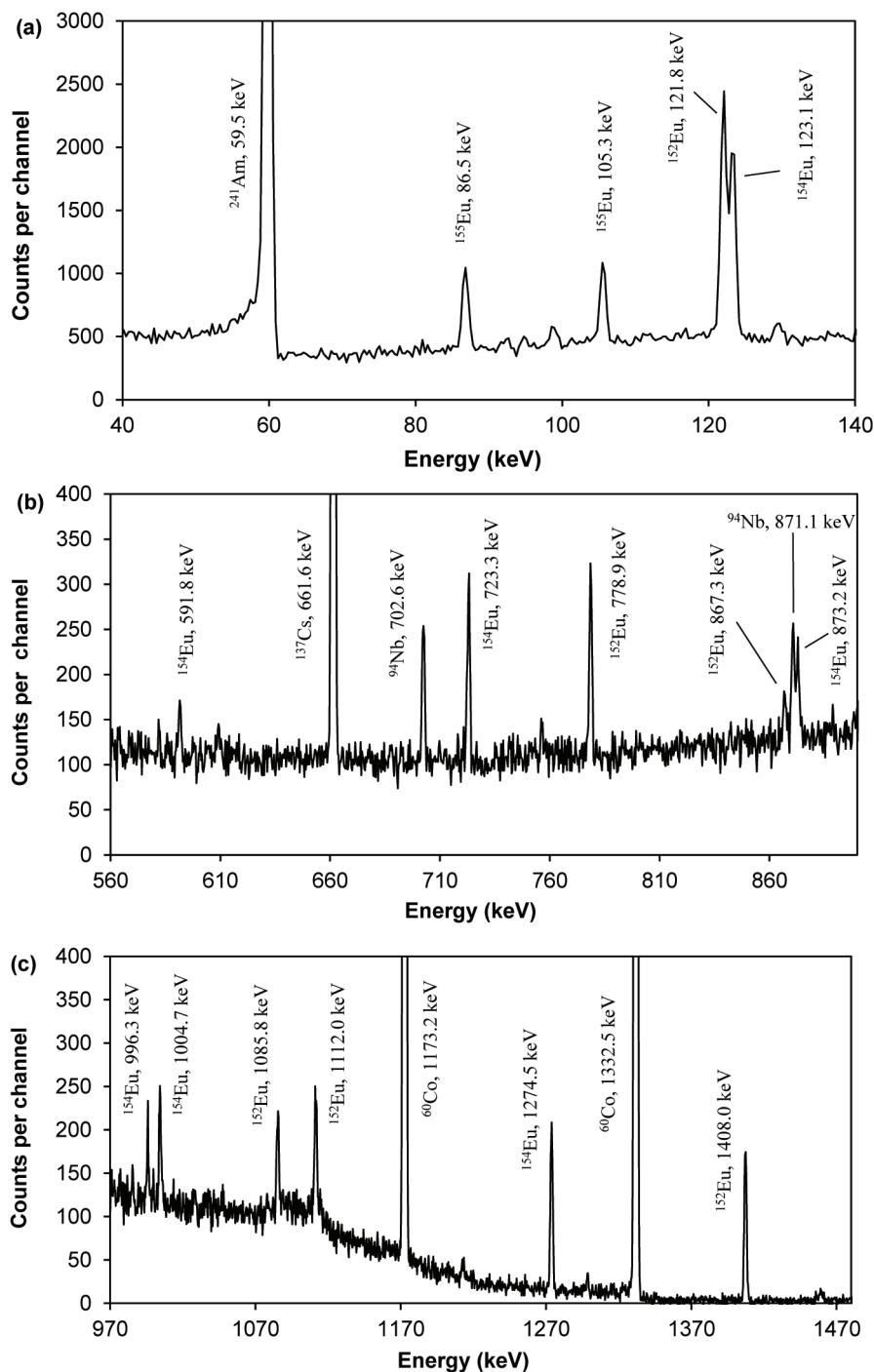


Fig. 5. Selected sections (a, b, c) of the gamma-ray spectrum, which is shown in Fig. 4. The main peaks of the technogenic radionuclides ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu and ^{241}Am are indicated

[Рис. 5. Отдельные секции (а, б, в) спектра гамма-излучения, представленного на рисунке 4. Указаны основные пики техногенных радионуклидов ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am . Обозначения: по оси х – энергия (кэВ); по оси у – число импульсов на канал]

Table 1

Activity concentrations (AC) of the gamma-ray emitting technogenic radionuclides in the glassy inclusion hp-2710 (Fig. 1) and in the native (unfractionated) soil (the depth layer 10–12 cm) from Plot 2 at the “Taiga” PNE site. Counting uncertainty (%) of the AC measurement is given in brackets at 1 sigma level. The reference date is August 5, 2009. The soil data are taken from [8]

[Таблица 1]

Удельная активность (УА) гамма-излучающих техногенных радионуклидов в стекловидном включении hp-2710 (см. рис. 1) и в нативной (нефракционированной) почве (глубина слоя 10–12 см) площадки № 2 на месте проведения МЯВ «Тайга». Статистическая неопределенность (%) измерения УА указана в скобках на уровне 1 сигмы.

Значения УА приведены на 5 августа 2009 г. Данные по УА в почве взяты из [8]]

Sample [Образец]	Radionuclide [Радионуклид]						
	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹⁵² Eu	¹⁵⁴ Eu	¹⁵⁵ Eu	⁹⁴ Nb
	AC (Bq/g, d.w.) [УА (Бк/г, с.в.)]						
Inclusion hp-2710 [Включение hp-2710]	5.35 (0.9)	61.2 (0.7)	14.2 (0.5)	2.19 (4.8)	1.23 (4.2)	1.60 (5.3)	0.215 (9.1)
Native soil [Нативная почва]	3.68 (0.2)	5.80 (1.5)	1.43 (0.5)	0.148 (4.0)	0.0796 (6.6)	0.0748 (14)	0.0146 (14)
	The inclusion AC to the soil AC ratio [Отношение УА во включении к УА в почв]						
Inclusion vs. soil [Включение vs. почва]	1.5	11	9.9	15	15	21	15

Table 2

Activity concentrations (AC) of ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am and ⁶⁰Co in the glassy inclusions and the ratio of AC in an inclusion to the AC in respective layer of native (unfractionated) soil from Plot 2 at the “Taiga” PNE site. Counting uncertainty (%) of the AC measurement is given in brackets at 1 sigma level. The reference date for activity calculation is August 5, 2009. Data on AC in soil are taken from [8]

[Таблица 2]

Удельная активность (УА) ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am и ⁶⁰Co в почвенных стекловидных включениях и отношение УА во включении к УА в соответствующем слое нативной (нефракционированной) почвы с площадки № 2 на месте проведения МЯВ «Тайга». Статистическая неопределенность (%) измерения УА указана в скобках на уровне 1 сигмы. Значения УА приведены на 5 августа 2009 г. Данные по УА в почве взяты из [8]]

Soil layer depth (cm) [Глубина слоя почвы (см)]	Code of inclusion [Код включения]	Mass (g, d.w.) [Масса (г, с.в.)]	AC in inclusion (Bq/g, d.w.) [УА во включении (Бк/г, с.в.)]			The inclusion AC to the soil AC ratio [Отношение УА во включении к УА в почве]		
			¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	⁶⁰ Co
6–8	hp-2002	0.281	4.02 (8.0)	31.2 (9.3)	8.70 (6.0)	1.0	9.8	8.6
10–12	hp-0102	0.385	5.14 (6.3)	54.2 (5.1)	11.6 (4.5)	1.4	9.3	8.1
10–12	hp-0901	0.263	7.89 (5.7)	107 (4.0)	21.9 (3.7)	2.1	18	15
10–12	hp-1301	0.289	5.39 (6.9)	97.2 (3.9)	17.9 (3.5)	1.5	17	13
10–12	hp-2710	6.66	5.35 (0.9)	61.2 (0.7)	14.2 (0.6)	1.5	11	9.9
12–14	hp-0203a	0.196	5.81 (4.2)	91.8 (2.8)	18.1 (2.4)	2.0	51	29
14–16	hp-0902	0.065	4.75 (17)	49.4 (20)	12.6 (10)	1.6	27	18
Median [Медиана]		0.28	5.35	61.2	14.2	1.5	17	13
Mean [Средняя]		1.16	5.48	70.2	15.0	1.6	20	15
SD [C.o.]		2.43	1.21	28.3	4.5	0.4	15	7

SD – standard deviation. [C.o. – стандартное отклонение.]

were especially pronounced for isotopes of the refractory and low-volatile elements Am, Co, Eu, and Nb (the boiling point values are 2011, 2927, 1527 and 4744 °C, respectively [11]).

УА ²⁴¹Am в стекловидных включениях на 1–2 порядка величины превышала минимально значимую удельную активность (МЗУА) (1 Бк/г) согласно НРБ-99/2009¹. Для ⁶⁰Co так-

¹ 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 by the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534 (hereinafter – NRB-99/2009). (In Russ.) [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 No 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный No 14534 (далее – НРБ-99/2009)].

For the remaining six glassy inclusions, the ACs could be reliably quantified only for ^{60}Co , ^{137}Cs , and ^{241}Am . It can be explained by very small mass of the inclusions (Table 2). As can be seen from Table 2, the ACs of ^{241}Am and ^{60}Co were much higher in the inclusions than in the native soil. For the radionuclide ^{137}Cs with a relatively low boiling point (671 °C) [11], the ratio values varied from 1.0 to 2.1; in general, the ratio significantly exceeded 1 (the nonparametric sign test, $P < 0.05$).

The ACs of ^{241}Am in the glassy inclusions were 1–2 orders of magnitude higher compared to the minimum significant activity concentration (MSAC) (1 Bq/g, for ^{241}Am) according to the Russian Standards of Radiation Safety (NRB-99/2009) ¹. For ^{60}Co , an approximately twofold excess of the corresponding MSAC value (10 Bq/g) was observed.

The ultrasound treatment of the hp-0203a inclusion led to removal of a certain amount of the matter from the surface of the specimen and, accordingly, to a slight decrease in the mass of the inclusion: by 2.0%. The activities of ^{137}Cs , ^{241}Am and ^{60}Co were 8.7%, 2.2% and 3.9% less in the sonicated inclusion than in the original specimen. These differences in activities between the original and treated sample were within the statistical uncertainties associated with the estimated net count rates in the full-energy peaks of interest: 661.6 keV, 59.6 keV, and 1332.5 keV. This experiment demonstrated the resistance of the glassy material to ultrasound exposure in water.

The radioactive glassy inclusions discovered in the surface layer of soil ejected by the “Taiga” thermonuclear explosions were called by us as “taiganite”. This matter has a certain similarity with the radioactive glassy material which may be formed on the soil surface in the event of near-surface nuclear explosions in the air. In particular, a glassy solid, called “trinitite”, was discovered at the site of detonation of the first world’s nuclear explosive device (the “Trinity” test, July 16 1945) at the military test site located near Alamogordo, New Mexico, USA [12]. Radioactive glassy particles with maximum sizes of up to 0.5–2 cm, as well as melted stones and sand similar to “trinitite”, could be found near the epicenter of the first nuclear test of the USSR (the product “RDS-1”, carried out on August 29, 1949 at the STS, Kazakhstan [13, 14]. The glassy particles received the common name “kharitons” (“kharitonchiki”) in honor of the outstanding Soviet nuclear physicist Yu.B. Khariton [14, 15]. Fission products (^{137}Cs , ^{155}Eu) and activation products (^{60}Co , ^{152}Eu , ^{154}Eu), as well as transuranium radionuclides (^{239}Pu , ^{241}Pu and ^{241}Am) were identified in “trinitite” and “kharitonchik” [12–14, 16–18]. Table 3 shows a comparison of these radioactive glassy materials and “taiganite” in relation to the AC of ^{137}Cs , ^{241}Am and ^{60}Co . In terms of the ^{137}Cs and ^{241}Am ACs, “taiganite” was close to “trinitite”. The ranges of the ^{60}Co AC values in “taiganite” and

же наблюдалось превышение соответствующей величины МЗУА (10 Бк/г) примерно в 2 раза.

Обработка включения hp-0203a ультразвуком в водной среде привела к удалению некоторого количества вещества с поверхности образца и, соответственно, небольшому уменьшению массы включения: на 2,0%. Активность ^{137}Cs , ^{241}Am и ^{60}Co в обработанном ультразвуком включении была на 8,7%, 2,2% и 3,9% ниже, чем таковая в исходном материале. Эти различия в активностях между исходным и обработанным образцом находились в пределах статистической неопределенности, связанной с оценкой площади фотопиков 661,6 кэВ, 59,6 кэВ и 1332,5 кэВ. Этот опыт продемонстрировал устойчивость стекловидного материала к воздействию ультразвука.

Радиоактивные стекловидные включения, обнаруженные нами в поверхностном слое грунта в месте проведения подземных экскавационных МЯВ «Тайга» и поименованные нами как «тайганиты», имеют определенное сходство с радиоактивным стекловидным материалом, который формируется на поверхности почвы в случае проведения приповерхностных ядерных взрывов в воздухе. В частности, стекловидное твердое вещество, исторически получившее название «тринитит», было обнаружено на месте подрыва первого в мире ядерного взрывного устройства (испытание «Trinity», 16 июля 1945 г.) на военном полигоне, расположенном около Аламогордо, Нью-Мексико, США [12]. Радиоактивные стекловидные частицы с максимальными размерами до 0,5–2 см, а также оплавленные камни и песок, подобные «тринититу», можно найти вблизи эпицентра первого ядерного испытания СССР (изделие РДС-1), проведенного 29 августа 1949 г. на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП, Казахстан) [13, 14]. Стекловидные частицы получили бытовое название «харитоны» («харитончики») в честь выдающегося советского физика-ядерщика Ю.Б. Харитона [14, 15]. В «тринитите» и «харитончиках» были выявлены продукты деления (^{137}Cs , ^{155}Eu) и активации (^{60}Co , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{154}Eu), а также трансурановые радионуклиды (^{239}Pu , ^{241}Pu и ^{241}Am) [12–14, 16–18]. В таблице 3 приведено сравнение этих радиоактивных стекловидных материалов и «тайганитов» в отношении УА ^{137}Cs , ^{241}Am и ^{60}Co . По показателям УА ^{137}Cs и ^{241}Am «тайганиты» были близки к «тринититу». Диапазоны значений УА ^{60}Co в «тайганитах» и в «харитончиках» перекрывались и весьма существенно превышали таковые в «тринитите».

Исследованные на объекте «Тайга» радиоактивные отвалы грунта и стекловидные включения можно рассматривать как отходы, образовавшиеся при использовании ядерных зарядов в мирных целях, которые, в свою очередь, относятся к категории особых радиоактивных отходов^{2,3}.

² Federal Law No. 190-FZ dated 07/11/2011 (as amended on July 02, 2013) “On the management of radioactive waste and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation” (as amended and additionally entered into force on July 16, 2013). Moscow. 2013. 22 p. (In Russ.) [Федеральный закон от 11.07.2011 №190-ФЗ (ред. От 02.07.2013) «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп., вступающими в силу с 16.07.2013). М., 2013. 22 с.]

³ Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 N 1069 “On the criteria for classifying solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for classifying radioactive waste as special radioactive waste and as disposed radioactive waste and the criteria for classifying disposed radioactive waste.” Moscow. 2012. 21 p. (In Russ.) [Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. N 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». М., 2012. 21 с.]

Table 3

Activity concentration (AC) of technogenic radionuclides in glassy and melted materials found at sites of nuclear explosions: "taiganite" ("Taiga", the Perm region, Russia), "trinitite" ("Trinity", Alamogordo, USA), "kharitonchik" ("RDS - 1", STS, Kazakhstan)

[Таблица 3]

Удельная активность (УА) техногенных радионуклидов в стекловидных и оплавленных материалах, обнаруженных в местах проведения ядерных взрывов: «тайганит» («Тайга», Пермский край, Россия), «тринитит» («Тринити», Аламагордо, США), «харитончик» («РДС-1», СИП, Казахстан)]

Radionuclide [Радионуклид]	Activity concentration (Bq/g) [Удельная активность (Бк/г)]*		
	taiganite [тайганит]**	trinitite [тринитит]	kharitonchik [харитончик]
⁶⁰ Co	1350–3400	44–151 [12, 13, 17, 18]	~(180–2000) [14]***; 2260±70 [18]
¹³⁷ Cs	9.7–19.0	10–121 [12, 13, 16, 17, 18]	~(12–1500) [14]***; 621±18 [18]
²⁴¹ Am	31.2–107	1–37 [12, 13, 16, 17, 18]	~(4–150) [14]***; 2.4±0.2 [18]

* – AC for ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs are provided on the date of detonation after decay correction; activities for ²⁴¹Am are reported per measurement day [УА ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs указана на дату взрыва после поправки на распад; УА ²⁴¹Am дана на день измерений].

** – this work [эта работа].

*** – the approximate values of AC are given based on Figure 2 from [14] [приблизительные значения УА приведены на основе рисунка 2 из [14]].

"kharitonchik" overlapped each other, and the both exceeded that in "trinitite" significantly.

The dumps of radioactive soil at the "Taiga" PNE site [8] and the radioactive glassy inclusions in the soil should be considered as special radioactive waste generated from the use of nuclear charges for peaceful purposes^{2,3}. The basis for classifying the soil and the inclusions as radioactive waste at the "Taiga" site is the exceeding the ²⁴¹Am AC in the samples of the MSAC value for this radionuclide of 1 Bq/g (NRB-99/2009). The research of 2009 [8] showed that the ²⁴¹Am ACs in the upper 20 cm of soil at Plot No. 2 ranged from 1.8 to 5.8 Bq/g. The ²⁴¹Am AC greater than 1 Bq/g were also measured by Ramzaev et al. [8] in the soil samples from the northeastern and northwestern shores of the lake "Taiga" (Plots No. 3, 4 and 5 in Fig. 1).

By now (i.e. 15 years since the 2009 survey), the situation with the americium contamination could hardly have fundamentally changed because the half-life ($T_{1/2}$) of this radionuclide is 432 years. In addition, the pool of ²⁴¹Am can, to some extent, be replenished due to the beta decay of ²⁴¹Pu ($T_{1/2}$ = 14.4 year), the presence of which (for the general case) in a nuclear charge is quite likely [19]. Note that, in addition to ²⁴¹Am, the radioactive contamination of environmental media at the "Taiga" site includes other long-lived technogenic radionuclides, such as ⁶⁰Co ($T_{1/2}$ = 5.27 year) and ¹³⁷Cs ($T_{1/2}$ = 30.17 year). These should also be considered when assessing radiation environment in the areas of PNE [8, 20].

Considering the pronounced difference between native soil and glassy inclusions with respect to AC values for the detected technogenic radionuclides (with the exception of ¹³⁷Cs), it cannot be ruled out that the radioactive contamination of the ground at Plot No. 2 is mainly associated precisely with the inclusions in soil and not with the soil itself. This hypothesis needs to be tested using physical separation (sieving) of the native soil into size fractions and subsequent gamma spectrometric analysis of the fractions. The results of such research can be useful in understanding the radionuclides transfer processes in the soil-plant system and in making a forecast of the dynamics of the radiation environment at the "Taiga" PNE site.

Of additional interest is the radiation-hygienic assessment of small fractions of the glassy radioactive particles which may pose a hazard if inhaled.

Основанием для отнесения отвалов объекта «Тайга» к радиоактивным отходам является превышение УА ²⁴¹Am величины МЗУА данного радионуклида 1 Бк/г (НРБ-99/2009). Исследования 2009 г. показали, что нефракционированный грунт на юго-восточной части навала (берега) вокруг озера соответствует этой категории отходов: УА ²⁴¹Am в верхних 20 см почвы на площадке № 2 варьировала от 1,8 до 5,8 Бк/г [8]. Пробы почвы с УА ²⁴¹Am больше, чем 1 Бк/г, были обнаружены в 2009 г. [8] также на северо-восточном и северо-западном берегах озера «Тайга» (площадки № 3, 4 и 5 на рисунке 1). К настоящему времени (т.е. через 15 лет после обследований 2009 г.) ситуация с загрязнением ²⁴¹Am принципиально вряд ли могла измениться, т.к. период полураспада ($T_{1/2}$) этого радионуклида составляет 432 года. Кроме того, не исключено накопление активности ²⁴¹Am в навале за счет бета-распада ²⁴¹Pu ($T_{1/2}$ = 14,4 года), присутствие которого (для общего случая) в ядерном заряде вполне вероятно [19]. Отметим, что, помимо ²⁴¹Am, в состав радиоактивного загрязнения окружающей среды на объекте «Тайга» входят и другие долгоживущие техногенные радионуклиды, такие как ⁶⁰Co ($T_{1/2}$ = 5,27 года) и ¹³⁷Cs ($T_{1/2}$ = 30,17 года). Их тоже следует учитывать при оценке радиационной обстановки в местах проведения МЯВ [8, 20].

Принимая во внимание большую разницу между значениями УА большинства обнаруженных техногенных радионуклидов (за исключением ¹³⁷Cs) в нативной почве и таковыми в радиоактивных включениях, нельзя исключить, что радиоактивное загрязнение грунта на участке № 2 в значительной мере обусловлено стекловидными включениями. Эта гипотеза нуждается в проверке с использованием механического разделения (просеивания) нативной почвы на фракции по размеру и последующего гамма-спектрометрического анализа фракций. Данные, полученные в результате такого анализа, могут быть весьма полезны при изучении миграции радионуклидов в системе почва – растение и построении прогноза динамики радиационной обстановки на объекте «Тайга».

Дополнительный интерес представляет также радиационно-гигиеническая оценка мелких фракций стекловидных включений (частиц), которых могут представлять опасность при ингаляционном поступлении.

Conclusions

When sorting through the archive of the soil samples collected in 2009 at the "Taiga" PNE site, we found glassy inclusions ranging in size from several millimeters to 4 cm. The inclusions were present in soil samples from the southeastern shore of the "Taiga" lake. The high-resolution gamma spectrometry revealed the presence of the technogenic radionuclides ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu and ^{241}Am in the inclusions. The ACs of ^{241}Am and ^{60}Co in the inclusions were many times greater compared to those in the native soil. The ACs of ^{241}Am in the soil and inclusions were much higher than the level of minimum significant activity concentration (1 Bq/g) according to the Russian Standards of Radiation Safety (NRB-99/2009). In accordance with current Russian legislative and regulatory provisions regarding the use of nuclear charges for peaceful purposes, the soil and glassy inclusions in the soil at the "Taiga" site must be classified as special radioactive waste. Considering the long half-life of ^{241}Am (432 years), radiologically significant contamination by this radionuclide will persist at the "Taiga" site for the foreseeable future. In general, the "Taiga" site is that rare case of PNEs where special radioactive wastes are present directly on the earth surface. This circumstance should be taken into account during monitoring surveys of the site, including collection of samples of environmental media and their analysis in laboratory conditions.

Authors' personal contribution

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

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

Acknowledgements

The authors thank the anonymous reviewers for their helpful comments that improved the quality of the manuscript.

Conflicts of interest

Authors declare the absence of conflicts of interest.

Sources of funding

The study was performed 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

1. Nifontov BI, Protopopov DD, Sitnikov IE, Kulikov AV. Underground nuclear explosions. Atomizdat, Moscow; 1965. 160 p. Available from: http://elib.biblioatom.ru/text/nifontov_podzemnye-yadernye-vzryvy_1965/go,0/ (Accessed 12.10.2023). (In Russian).
2. Smith DK, Bourcier WL. The production and dissolution of nuclear explosive melt glasses at underground test sites in the Pacific region. In: Proceedings of International Symposium on Marine Pollution. 5–9 October, 1998; Monaco. Available from: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/046/30046718.pdf (Accessed 08.11.2023).
3. Carrigan CR, Sun Y, Pili E, Neuville DR, Antoun T. Cavity-melt partitioning of refractory radionuclides and implications

Закключение

При ревизии архива проб окружающей среды, отобранных в 2009 г. в месте проведения МЯВ «Тайга», в некоторых пробах почвы нами были обнаружены стекловидные включения размером от нескольких миллиметров до 4 см. С помощью стационарного полупроводникового гамма-спектрометра в этих включениях были определены такие техногенные радионуклиды: ^{60}Co , ^{94}Nb , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{155}Eu и ^{241}Am . Удельная активность ^{241}Am во включениях на 1–2 порядка величины превышала уровень минимально значимой удельной активности (1 Бк/г) согласно НРБ-99/2009. В соответствии с действующими российскими законодательно нормативными положениями, которые касаются использования ядерных зарядов в мирных целях, радиоактивный отвал грунта и обнаруженные стекловидные включения следует отнести к категории особых радиоактивных отходов. Учитывая длительный период полураспада ^{241}Am (432 года), радиологически значимое загрязнение почвы этим радионуклидом будет сохраняться в обозримой временной перспективе. В целом, объект «Тайга» является тем редким местом проведения МЯВ, где особые радиоактивных отходы присутствуют непосредственно на поверхности земли. Это обстоятельство следует учитывать на данном объекте при мониторинговых обследованиях, включающих отбор проб окружающей среды и их анализ в лабораторных условиях.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Репин В.С. – концептуализация, редактирование рукописи.

Благодарности

Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за полезные комментарии, которые позволили улучшить качество рукописи.

Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликта интересов, которые следует раскрывать.

Сведения об источнике финансирования

Работа 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

1. Нифонтов Б.И., Протопопов Д.Д., Ситников И.Е., Куликов А.В. Подземные ядерные взрывы. Атомиздат: Москва, 1965. 160 с. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/nifontov_podzemnye-yadernye-vzryvy_1965/go,0/ (Дата обращения: 12.10.2023).
2. Smith D.K., Bourcier W.L. The production and dissolution of nuclear explosive melt glasses at underground test sites in the Pacific region. In: Proceedings of International Symposium

- for detecting underground nuclear explosions. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;219: 106269.
4. Peaceful Nuclear Explosions: Guarantees of General and Radiation Safety / Ed. Prof. VA Logachev. Moscow, Izd.AT; 2001. 519 p. Available from: http://elbib.biblioatom.ru/text/mirnye-yadernye-vzryvy_2001 (Accessed 12.10.2023). (In Russian).
 5. Borg IG, Stone R, Levy HB, Ramspott LD. Information pertinent to the migration of radionuclides in ground water at the Nevada test site. Part 1: Review and analysis of existing information. Lawrence Livermore Laboratory, USA. 1976; 216 p.
 6. 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.
 7. Ramzaev VP, Repin VS, Khramtsov EV. Peaceful underground nuclear explosions: current issues on radiation safety for general public. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(2): 27–33. (In Russian).
 8. 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.
 9. Ramzaev V, Barkovsky A, Goncharova Yu, Gromov A, Kaduka M, Romanovich I. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;118: 128–142.
 10. Laboratory of Spectrometry and Radiometry. Available from: http://www.lsrn.ru/en/products/detail.php?ELEMENT_CODE=nuclidemasterplus (Accessed 04.11.2023).
 11. Boiling Point of the elements. Available from: <https://periodictable.com/Properties/A/BoilingPoint.al.html> (Accessed: 02.12.2023).
 12. Parekh PP, Semkow TM, Torres MA, Haines DK, Cooper JM, Rosenberg PM, et al. Radioactivity in Trinitite six decades later. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 103–120.
 13. Pittauerova D, Kolb WM, Rosenstiel JC, Fisher HW. Radioactivity in Trinitite – a review and new measurements. Proceedings of Third European IRPA Congress, 14–18 June, 2010; Helsinki, Finland. P16–31. Available from: <http://www.irpa2010europe.com/proceedings.htm> (Accessed 08.11.2023).
 14. Vlasova IE, Yapaskurt VO, Averin AA, Melnik OE, Zolotov DA, Senin RA, et al. Nuclear melt glass from Experimental Field, Semipalatinsk Test Site. *Energies*. 2022;15: 9121.
 15. Davidchuk LYa. The story of the discovery of "kharitonchiki". In: About People and their Achievements. Ed.: SL Davydov. Ministry of Defense of the Russian Federation. 1997. pp. 205–207. Available from: https://elbib.biblioatom.ru/text/o-lyudyah-i-sversheniyah_ch1_1997/ (Accessed 10.04.2024). (In Russian).
 16. Belloni F, Himbert J, Marzocchi O, Romanello V. Investigating incorporation and distribution of radionuclides in trinitite. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102(9): 852–862.
 17. Bellucci JJ, Wallace C, Koeman EC, Simonetti A, Burns PC, Kieser J, et al. Distribution and behavior of some radionuclides associated with the Trinity nuclear test. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013;295: 2049–2057.
 18. Mercer DJ, Koehler KE, Croce MP, Hoover AS, Hypes PA, Kozimor SA, et al. Gamma and decay energy spectroscopy measurements of Trinitite. *Nuclear Technology*. 2021;207(SUP1): S309–S320.
 - on Marine Pollution. 5–9 October, 1998; Monaco. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/046/30046718.pdf (Дата обращения: 08.11.2023).
 3. Carrigan C.R., Sun Y., Pili E. et al. Cavity-melt partitioning of refractory radionuclides and implications for detecting underground nuclear explosions // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 219. P. 106269.
 4. 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. URL: http://elbib.biblioatom.ru/text/mirnye-yadernye-vzryvy_2001 (Дата обращения: 12.10.2023).
 5. Borg I.G., Stone R., Levy H.B., Ramspott L.D. Information pertinent to the migration of radionuclides in ground water at the Nevada test site. Part 1: Review and analysis of existing information. Lawrence Livermore Laboratory, USA. 1976. 216 p.
 6. 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.
 7. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // *Радиационная гигиена*. 2009. Т. 2, № 2. С. 27–33.
 8. 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.
 9. Ramzaev V., Barkovsky A., Goncharova Yu. et al. Radiocesium fallout at the grasslands on Sakhalin, Kunashir and Shikotan Islands due to the Fukushima accident: the radioactive contamination of soil and plants in 2011 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 118. P. 128–142.
 10. Лаборатория спектрометрии и радиометрии. URL: http://www.lsrn.ru/en/products/detail.php?ELEMENT_CODE=nuclidemasterplus (Дата обращения: 04.11.2023).
 11. Boiling Point of the elements. URL: <https://periodictable.com/Properties/A/BoilingPoint.al.html> (Дата обращения: 02.12.2023).
 12. Parekh P.P., Semkow T.M., Torres M.A. et al. Radioactivity in Trinitite six decades later // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006. Vol. 85. P. 103–120.
 13. Pittauerova D., Kolb W.M., Rosenstiel J.C., Fisher H.W. Radioactivity in Trinitite – a review and new measurements. Proceedings of Third European IRPA Congress. 14–18 June, 2010; Helsinki, Finland. P. 16–31. URL: <http://www.irpa2010europe.com/proceedings.htm> (Дата обращения: 04.11.2023).
 14. Vlasova I.E., Yapaskurt V.O., Averin A.A. et al. Nuclear melt glass from Experimental Field, Semipalatinsk Test Site // *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 9121.
 15. Давидчук Л.Я. История с находкой «харитончиков». В кн.: О людях и их свершениях. Ред. С.Л. Давыдов. МО РФ. 1997. С. 205–207. URL: https://elbib.biblioatom.ru/text/o-lyudyah-i-sversheniyah_ch1_1997/ (Дата обращения 10.04.2024).
 16. Belloni F., Himbert J., Marzocchi O., Romanello V. Investigating incorporation and distribution of radionuclides in trinitite // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011. Vol. 102, No. 9. P. 852–862.
 17. Bellucci J.J., Wallace C., Koeman E.C. et al. Distribution and behavior of some radionuclides associated with the Trinity nuclear test // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. Vol. 295. P. 2049–2057.
 18. Mercer D.J., Koehler K.E., Croce M.P. et al. Gamma and decay energy spectroscopy measurements of Trinitite // *Nuclear Technology*. 2021. Vol. 207(SUP1). P. S309–S320.

19. Mark O.C. Explosive properties of reactor-grade plutonium // *Science and Global Security*. 2010. Vol. 17, No. 2–3. P. 170–185.
20. Рамзаев В.П., Медведев А.Ю., Репин В.С. и др. Радиационно-гигиенический мониторинг в местах применения ядерно-взрывных технологий в мирных целях и расчет доз облучения критических групп населения // *Радиационная гигиена*. 2010. Т. 3, № 1. С. 33–39.
19. Mark OC. Explosive properties of reactor-grade plutonium. *Science and Global Security*. 2010;17(2–3): 170–185.
20. Ramzaev VP, Medvedev AYu, Repin VS, Timofeeva MA, Khramtsov EV. Radiation monitoring the industrial nuclear explosion sites and evaluation of the doses to the critical groups of population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(1): 33–39. (In Russian).

Поступила: 26.01.2024 г.

Received: January 26, 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, Saint-Petersburg, Russia (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

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, 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.

For citation: Ramzaev V.P., Repin V.S. Radioactive glassy inclusions in the soil sampled at the “Taiga” peaceful underground nuclear explosions site (the Perm region, Russia). *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 148–159. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-148-159

Для цитирования: 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-148-159

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:

- 1) Введение (Introduction): ставится научная проблема и цель статьи.

- 2) Материалы и методы (Materials and Methods): даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

- 3) Результаты исследования и обсуждение (Results and Discussion): приводятся конкретные авторские результаты исследования.

- 4) Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion): указываются практическая значимость и перспективы исследования.

Все пишется сплошным текстом, без выделения абзацев. Для остальных статей (обзор, лекция, дискуссия) резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, по сути краткое изложение самой статьи. **Резюме не должно содержать аббревиатур и сокращений, кроме общепринятых в мировой научной литературе.** Резюме является независимым от статьи источником информа-

ции для размещения в различных научных базах данных. **Обращаем особое внимание на качество английской версии резюме!** Оно будет опубликовано отдельно от основного текста статьи и должно быть понятным без ссылки на саму публикацию.

В конце приводятся **ключевые слова или словосочетания на русском и английском языках** (не более 12) в порядке значимости. **Ключевые слова также не должны содержать аббревиатур и сокращений.** Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

Текст статьи

Текст оригинального научного исследования должен состоять из выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты исследования», «Обсуждение и заключение», «Литература».

Введение (Introduction) – постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности. Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье. При его написании автор прежде всего должен заявить общую тему исследования, обозначить проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме того, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы. Обзор литературы. Необходимо описать основные современные исследования и публикации, на которые опирается автор; современные взгляды на проблему; трудности при разработке данной темы; выделение нерешенных вопросов в пределах общей проблемы, которым посвящена статья. Желательно рассмотреть 20–40 источников и сравнить взгляды авторов; часть источников должна быть англоязычной. Важно провести сравнительный анализ с зарубежными публикациями по заявленной проблематике.

В разделе «Материалы и методы» (*Materials and Methods*) должны быть четко описаны методы и объекты исследования, источники и вид ионизирующего излучения, дозы, мощность дозы, условия облучения и т.д.

Если в статье имеется описание наблюдений на человеке, не используйте фамилии, инициалы больных или номера историй болезни, особенно на рисунках или фотографиях. При изложении экспериментов на животных укажите, соответствовало ли содержание и использование лабораторных животных правилам, принятым в учреждении, рекомендациям национального совета по исследованиям, национальным законам.

Все радиационные единицы следует приводить в международной системе единиц измерения (СИ) (см.: ГОСТ – 8.417 – 81 ГСИ. Единицы физических величин»; В.И. Иванов В.П. Машкович, Э.М. Центр. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике: Справочное руководство. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.). Все результаты измерений, приводимых в статье, должны быть выражены только в системе СИ.

При описании методики исследования можно ограничиться указанием на существо применяемого метода со ссылкой на источник заимствования, в случае модификации – указать, в чем конкретно она заключается. Оригинальный метод должен быть описан полностью.

Результаты 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 вариативности оценивались, например, стандартное отклонение или стандартная ошибка среднего. Не следует дублировать данные, содержащиеся в таблице, в тексте статьи, в графиках или диаграммах.

Рисунки

Иллюстрации должны быть четкие, контрастные. Цифровые версии иллюстраций должны быть сохранены в отдельных файлах в формате Tiff, с разрешением 300 dpi и последовательно пронумерованы. Подписи 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.

Заключение (Conclusion). Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде приводятся главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

В конце статьи должны быть размещены следующие данные:

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей. Наш журнал придерживается следующих критериев авторства, разработанных ICMJE и COPE:

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 ГОСТа Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Необходимо правильно оформить ссылку на источник. Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки. Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи, должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В списке литературы не следует указывать постановления, законы, санитарные нормы и правила, другие нормативно-методические документы. Указания на них следует размещать в сносках или внутритекстовых ссылках. Сноски и внутритекстовые ссылки следует представить и на английском языке, написав после английского описания язык текста (In Russ.).

Примеры внутритекстовых ссылок:

.....согласно Норм радиационной безопасности (НРБ 99/2009): (СанПиН 2.6.1.2523 – 09) [перевод на английский язык (In Russ.)]. Илисогласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

Подстрочные ссылки (сноски):

¹ СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» [Sanitary Regulations and Standards 2.2.4.3359-16 «Sanitary and epidemiological requirements for physical factors in the workplace» (In Russ.)]

¹ МУ 2.6.1.2944-11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях. М.: Роспотребнадзор, 2011. 40 с. [Methodical guidelines 2.6.1.2944-11 "Control of the patient effective doses from medical X-ray examinations". Moscow, Rospotrebnadzor, 2011, 40 p. (In Russ.)]

ПРИМЕРЫ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

Если имеется 3–4 автора, то указываются все. Если от 5 и больше – первые 3 автора, затем ставится «и др.».

Если в **монографии** на обложке указаны основные авторы, их всех следует указать, далее поставив «и др.».

Книги и брошюры:

Сергеев И.В., Смирнова Т.П., Исаков М.Н. Лучевая диагностика в России. СПб.: НИИРГ, 2007. 123 с.

Jenkins P.F. Making sense of the chest xray: a handson guide. New York: Oxford University Press; 2005. 194 p.

Iverson C., Flanagan A., Fontanarosa P.B. et al. American Medical Association manual of style. 9th ed. Baltimore (MD): Williams & Wilkins; 1998. 660 p.

Многотомные издания или на часть книги:

Пивинский Ю.Е. Общие вопросы технологии // Неформальные огнеупоры. М., 2003. Т. 1, кн. 1. С. 430-447.

Глава или раздел из книги:

Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Основы общей патофизиологии // Основы общей патологии: учеб. пособие для студентов медвузов. СПб.: ЭЛБИ, 1999. Ч. 1., гл. 2. С. 124-169.

Riffenburgh R.H. Statistics in medicine. 2nd ed. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Academic Press; 2006. Chapter 24, Regression and correlation methods; p. 447-86.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders; 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems; p. 553-98.

Статьи из журнала, сборника:

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. P. 859-863.

Из сборника конференций (тезисы):

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

Ссылки на Интернет-ресурсы:

Официальный сайт Медицинского радиологического научно-го центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия/ URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (дата обращения: 16.06.2019)

Ссылки на статьи с DOI:

Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Зеликман М.И. и др. Основные направления снижения дозы облучения пациентов при компьютерной томографии. REJR. 2018. Т.8, №3. С. 60-73. DOI:10.21569/2222-7415-2018-8-3-60-73.

Статьи, принятые к печати, но еще не вышедшие:

Горский Г.А., Еремин А.В., Стамат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции. Радиационная гигиена, 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

Патенты:

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Союкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубли. 20.01.2006, БИ № 02.

Из газеты:

Фомин Н.Ф., Иванович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // Воен. врач, 1996. № 8 (1332) С. 5.

Диссертация и автореферат диссертации:

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис.... канд. полит. наук: защищена 22.01.02: утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

Второй список литературы (References) полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования

При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

Примеры:

Статья 1-6 авторов

Petitti DB, Crooks VC, Buckwalter JG, Chiu V. Blood pressure levels before dementia. Arch Neurol. 2005 Jan;62(1):112-6.

Статья 7 и более авторов (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Hallal AH, Amortegui JD, Jeroukhimov IM, Casillas J, Schulman CI, Manning RJ, et al. Magnetic resonance cholangiopancreatography accurately detects common bile duct stones in resolving gallstone pancreatitis. J Am Coll Surg. 2005 Jun;200(6): 869-75.

Статья в электронном журнале

Errami M, Garner H. A tale of two citations. Nature. 2008;451(7177): 397-399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. Chronicle of Higher Education. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

Статья в электронном журнале с DOI:

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanagan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. Am J Sports Med [Internet]. 2012 Dec;40(12): 2872-8. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013]

Книга (печатная)

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

Книга (электронная)

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach [Internet]. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://ezproxy.lib.monash.edu.au/login?url=http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1647-00363546512458223> [Accessed 2 Nov 2012]

Отчет официальной организации (государственный, ведомственный, пр.).

Rowe IL, Carson NE. Medical manpower in Victoria. East Bentleigh (AU): Monash University, Department of Community Practice; 1981. 35 p. Report No.: 4.

Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63, 2001.

Веб-страница

Diabetes Australia. Diabetes globally [Internet]. Canberra: ACT: Diabetes Australia; Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed Nov 5 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

Из сборника конференций (тезисы)

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liège, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

Стандарт

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural fire design. London: BSI; 2005.

Методические рекомендации/руководство

National Institute for Health and Care Excellence (NICE). Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

После списков литературы указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью) на русском языке и в транслитерации; ученая степень, ученое звание, должность в учреждении/учреждениях, рабочий адрес с почтовым индексом на русском и английском языках, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов, идентификационный номер ORCID. Сокращения не допускаются.

ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В РЕДАКЦИЮ

Все статьи печатаются в журнале бесплатно.

Направляя статью для публикации в данном журнале, авторы соглашаются со следующим:

- Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0), которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.
- Все авторы внимательно прочитали Этику научных публикаций журнала и с пониманием воспримут санкции за его нарушение.
- Авторы статьи принимают положения: «Авторское соглашение (публичная оферта) о публикации статьи в научном журнале «Радиационная гигиена»».
- Согласно вступившей в действие IV части Гражданского кодекса РФ, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения издателя.**

ПОЛНЫЙ ТЕКСТ АВТОРСКОГО ДОГОВОРА (ОФЕРТЫ) — СКАЧАТЬ

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка по электронной почте журнала в форме присоединенных файлов: journal@niirg.ru

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титальный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая информация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте www.translit.ru, название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно указывайте номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, 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)233-42-83 и (812)233-50-16 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812)233-53-63, 233-42-83.