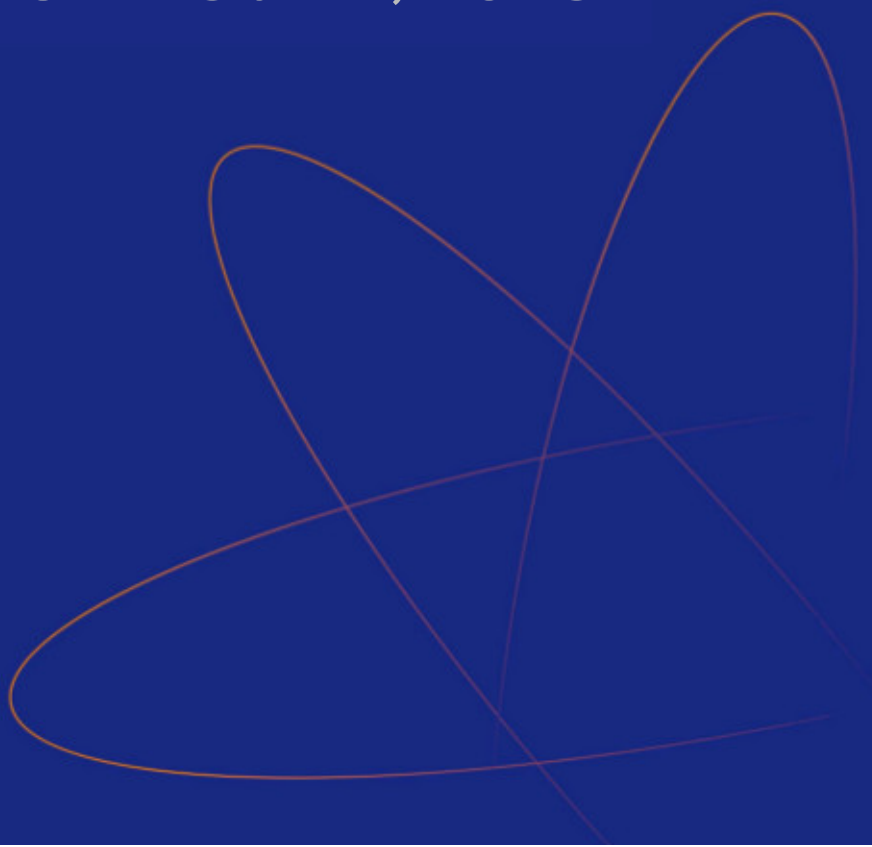


ISSN 1998-426X (print)  
ISSN 2409-9082 (online)

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

# РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА

ТОМ 18 № 2, 2025



**УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ:**

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

Издание зарегистрировано Федеральной  
службой по надзору за соблюдением  
законодательства в сфере массовых  
коммуникаций и охране культурного  
наследия. Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-28716 от 6 июля 2007 г.

В 2015 году журнал был зарегистрирован  
как сетевое издание Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС77-  
63702 от 10 ноября 2015 г.

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

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

**Задачи журнала:**

- привлекать внимание к наиболее акту-  
альному, перспективному и интересным на-  
правлениям научных исследований по те-  
матике журнала;
- вовлекать в журнал авторитетных оте-  
чественных и зарубежных авторов, явля-  
ющихся специалистами высочайшего уровня;
- расширять деятельность путем повышения  
географического охвата публикуемых мате-  
риалов, редакционного совета и редакционной  
коллегии, в том числе из зарубежных стран.

Ответственный секретарь редакции  
О.О. Пантина  
Компьютерная верстка  
О.С. Кравцовой

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

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

Журнал распространяется по подписке  
Индекс для подписки в агентстве  
«Книга-Сервис» - **Ф57988**  
Стоимость годовой подписки – 3920 руб.  
Подписано в печать 30.06.2025  
Формат 60x84/8. Печать офсетная. 18 печл.

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

**Алексанин Сергей Сергеевич** — ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никитина» МЧС России, член-корреспондент РАН, д.м.н., профессор (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)

**Зарединов Дамир Арифович** — Министерство здравоохранения Республики Узбекистан, д.м.н., профессор (Ташкент, Республика Узбекистан)

**Иванов Виктор Константинович** — Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба — филиал ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр имени П.А. Герцена» Минздрава России, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор (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, академик АН РТ, д.х.н., профессор (Душанбе, Республика Таджикистан)

**Попов Валерий Иванович** — ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации, член-корреспондент РАН, д.м.н., профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (Воронеж, Российская Федерация)

**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», академик РАН, д.м.н., профессор (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

**Ушаков Игорь Борисович** — ФГБУ ГНЦ «Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» ФМБА России, академик РАН, д.м.н., профессор (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)

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

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

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

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

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

**Ермолина Елена Павловна** — ФГБОУ ДПО Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования Минздрава России, к.м.н., доцент (Москва, Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

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

## FOUNDER & PUBLISHER

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

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

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

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

### Objectives:

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

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

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

### Editorial office address:

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

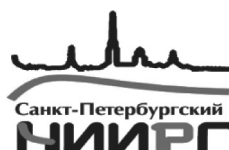
# RADIATION HYGIENE

## 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, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

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

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

**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", Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Obninsk, Russian Federation)

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

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

**Valeriy I. Popov** — Federal State-Financed Educational Institution of Graduate Education "Voronezh N.N. Burdenko State Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, M.D., Professor, Honoured Worker of Higher Education of the Russian Federation (Voronezh, Russian Federation)

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

**Genrikh A. Sofronov** — Federal State Scientific Organization "Institute of Experimental Medicine", Academician of the Russian Academy of Sciences, M.D., Professor (Saint Petersburg, Russian Federation)

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

### Editorial Board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



## НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А.

**Риск смерти от злокачественных новообразований легких в Уральской когорте аварийно-облученного населения ..... 7**

Маткевич Е.И., Сивенков А.Г., Башков А.Н., Самойлов А.С.

**Анализ методов статистической оценки стандартных доз облучения пациентов при компьютерной томографии в Федеральном медицинском биофизическом центре им. А.И. Бурназяна ..... 16**

Косарлукова Е.А., Репин Л.В., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р.

**Анализ влияния медико-демографических показателей российской популяции на значения радиационного риска по модели МКРЗ ..... 29**

Тряпицына С.В., Кравцова О.С.

**Определение фактических сроков вынужденного переселения представителей Уральской когорты аварийно-облученного населения с радиоактивно загрязненных территорий ..... 37**

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

**Оценка адекватности действующих подходов к проведению индивидуального дозиметрического контроля персонала ..... 47**

Попова А.А., Чипига Л.А., Майстренко Д.Н., Станжевский А.А., Молчанов О.Е., Николаев Д.Н., Понежа Т.Е., Виноградова Ю.Н., Иоффе Е.Б.

**Моделирование острой лучевой болезни в эксперименте ..... 56**

Солдатов И.В., Водоватов А.В., Лантух З.А., Соловьёв А.В., Сморгчова А.К., Артюкова З.Р., Дружинина П.С.

**Выбор оборудования для флюорографии и рентгенографии органов грудной клетки на основе оценки качества изображения и уровней облучения пациентов ..... 66**

## ОБЗОРЫ

Соснина С.Ф.

**Прекоцептивное облучение матерей: Обзор эпидемиологических исследований ..... 77**

Фесенко С.В., Емлютина Е.С., Исамов Н.Н., Карпенко Е.И., Горяинов В.А.

**Динамика содержания <sup>137</sup>Cs в мясе сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС ..... 87**

## ЕСКИД И РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ

Чипига Л.А., Козлова К.Н., Звонова И.А., Водоватов А.В., Библин А.М., Станжевский А.А.

**География и структура центров ядерной медицины на территории Российской Федерации по состоянию на 2025 год ..... 98**

## РАДИАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

**Измерение эффективной удельной активности природных радионуклидов *in situ* для оценки мощности амбиентного эквивалента дозы в городской среде ..... 109**

## RESEARCH ARTICLES

Mikryukova L.D., Zavyalov D.A.

**Lung cancer mortality risk in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort ..... 14**

Matkevich E.I., Sivenkov A.G., Bashkov A.N., Samoylov A.S.

**Analysis of statistical methods for estimating standard radiation doses for patients undergoing computed tomography at the A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center ..... 27**

Kosarlukova E.A., Repin L.V., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R.

**Analysis of the impact of medical and demographic indicators of the Russian population on radiation risk estimates based on the ICRP model ..... 35**

Tryapitsyna S.V., Kravtsova O.S.

**Determination of the actual term of relocation of representatives of the Ural cohort of accidentally irradiated population from radioactively contaminated territories ..... 45**

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

**Assessment of the adequacy of current approaches to individual dosimetric monitoring for personnel ..... 54**

Popova A.A., Chipiga L.A., Maystrenko D.N., Stanzhevskiy A.A., Molchanov O.E., Nikolaev D.N., Ponezha T.E., Vinogradova Yu.N., Ioffe E.B.

**Modeling of acute radiation disease in experiment ..... 63**

Soldatov I.V., Vodovатов A.V., Lantukh Z.A., Solov'ev A.V., Smorchkova A.K., Artyukova Z.R., Druzhinina P.S.

**Selection of equipment for fluorography and chest radiography based on assessment of image quality and patient exposure levels ..... 75**

## REVIEWS

Sosnina S.F.

**Preconception exposure of mothers: The review of epidemiological research ..... 84**

Fesenko S.V., Emlyutina E.S., N.N. Isamov, Karpenko E.I., Goryainov V.A.

**Dynamics of <sup>137</sup>Cs concentrations in meat of farm animals in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident ..... 95**

## ISDCR AND RUSSIAN FEDERATION RADIATION-HYGIENIC PASSPORTIZATION

Chipiga L.A., Kozlova K.N., Zvonova I.A., Vodovатов A.V., Biblin A.M., Stanzhevsky A.A.

**The geography and structure of nuclear medicine centres in the Russian Federation in 2025 ..... 107**

## RADIATION MEASUREMENTS

Ramzaev V.P., Barkovsky A.N.

**Measurement of effective activity concentration of natural radionuclides *in situ* for assessment of ambient dose equivalent rate in urban environments ..... 109**

## СОДЕРЖАНИЕ

Том 18 № 2, 2025

### САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЙ НАДЗОР

*Лихачева А.В., Водоватов А.В., Чипига Л.А.*

**Оптимизация радиационной защиты  
в радионуклидной терапии: предложения  
по разработке программ обеспечения качества ..... 122**

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

*Дружинина П.С.*

**Накопленные дозы пациентов при проведении КТ-  
исследований в российской клинической  
практике ..... 131**

**ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА  
«РАДИАЦИОННАЯ ГИГИЕНА» ..... 141**

## CONTENTS

Vol. 18 № 2, 2025

### SANITARY AND EPIDEMIOLOGICAL SURVEILLANCE

*Likhacheva A.V., Vodovатов A.V., Chipiga L.A.*

**Optimization of radiation protection in radionuclide  
therapy: Proposals for developing quality  
assurance programs ..... 129**

### BRIEF REPORTS

*Druzhinina P.S.*

**Patients` cumulative doses during CT-examinations  
in Russian clinical practice ..... 139**

**JOURNAL OF RADIATION HYGIENE –  
INSTRUCTIONS FOR AUTHORS ..... 141**

## Риск смерти от злокачественных новообразований легких в Уральской когорте аварийно-облученного населения

Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А.

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

*Целью работы является оценка риска смертности от рака легкого у членов Уральской когорты аварийно-облученного населения. Материалы и методы: Когорта, объединяющая лиц, подвергшихся хроническому облучению на Южном Урале на реке Тече и на Восточно-Уральском радиоактивном следе, состоит из 62592 человек. В исследовании применен регрессионный анализ с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска. Результаты исследования и обсуждение: За период наблюдения с 1950 по 2020 гг. установлено 925 случаев смерти от рака легких. Число человеко-лет наблюдения под риском составило 1964140. Средняя накопленная доза на легкие, рассчитанная по дозиметрической системе TRDS-2016, составила 0,038 Гр, максимальная – 0,995 Гр. В результате анализа получена статистически значимая линейная зависимость показателей смерти злокачественных новообразований легких от полученной дозы. Величина ИОР/Гр смерти для рака легких с 2-летним минимальным латентным периодом составила 0,94/Гр, 95 % доверительный интервал: 0,01–2,19;  $p < 0,05$ . За 71-летний период наблюдения когорты 3,5 % случаев смерти от рака легких могут быть вызваны облучением. Анализ базовых уровней смертности от рака легких показал, что у курящих показатели смертности выше в 4 раза ( $p < 0,001$ ). При анализе возможной модификации дозового эффекта статистически значимая связь риска с дозой была получена: у женщин; в группе татар и башкир; у городских жителей; у тех, у кого есть родственники со злокачественными новообразованиями в первой линии родства; у облучившихся на Восточно-Уральском радиоактивном следе. Заключение: В проведенном исследовании установлен статистически значимый риск смертности рака легких в расчете на 1 Гр в когорте лиц, подвергавшихся длительному радиационному воздействию в диапазоне малых и средних доз. Результаты могут служить основанием для разработки программ профилактической помощи пострадавшему населению.*

**Ключевые слова:** злокачественные новообразования легких, хроническое облучение, радиационный риск, аварийно-облученное население.

### Введение

В результате аварий на производственном объединении «Маяк» (ПО «Маяк») в Челябинской области в середине прошлого века хроническому радиационному воздействию подверглись жители трех областей: Челябинской, Свердловской и Курганской. Уральский научно-практический Центр радиационной медицины оказывает медицинскую помощь облученному населению, а также занимается изучением последствий хронического радиационного воздействия [1–2]. Анализ риска смерти от злокачественных новообразований (ЗНО) легких проводился в Уральской когорте аварийно-облученного населения (УКАОН), состоящей из лиц пострадавших на загрязненных территориях [3–4].

Рак легкого относится к числу ЗНО с высоким уровнем смертности, особенно у мужчин [5–6]. По данным государственной медицинской статистики в России за 2023 год ЗНО легких занимают первое место в структуре смертности от ЗНО как для мужского населения (25 % от всех смертей от ЗНО), так и для населения в целом (17 % от всех смертей от ЗНО) [5]. При этом они составляют 14,5 % от впервые выявленных случаев у мужчин (2 место) и 8,7 % новых случаев у всего населения (3 место). По сведениям Международного агентства по

изучению рака (International Agency for Research on Cancer, подчиняется ВОЗ) в 2022 году ЗНО легких занимало первые места как по новым случаям рака (2,5 млн новых случаев или 12 % от всех ЗНО), так и по смертности (1,8 млн смертей или 19 % от смертей от всех ЗНО) [6]. Это делает ЗНО легких одной из значимых проблем как на глобальном уровне, так и для системы здравоохранения нашей страны.

Наряду с влиянием неблагоприятных экологических факторов, курения, неправильного питания, возрастных изменений, генотипических особенностей организма на развитие ЗНО легких, остается много нерешенных вопросов о воздействии низких доз ионизирующего излучения на эту патологию [7–13]. Так, в Японской когорте переживших атомную бомбардировку (LSS) рак легкого занимает второе место по смертности (14,3 %) среди всех случаев смерти от ЗНО [5]. Также по данным литературы высокие уровни заболеваемости и смертности от ЗНО легких регистрируются у работников атомной промышленности, таких как работники ПО «Маяк» в РФ и работники атомного комплекса «Селлафилд» в Великобритании, вследствие вдыхания пыли, содержащей соединения плутония-239 [7–9].

В общей структуре смертности от новообразований в Уральской когорте аварийно-облученного населения (УКАОН) в период 1950–2019 гг. первое место также занимают ЗНО легкого – 19 % от всех ЗНО, а если рассматривать только

Микрюкова Людмила Дмитриевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: mikludm@mail.ru



мужчин, смертность от рака легкого возрастает до 31 % от всех ЗНО [14]. После создания УКАОН в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины (УНПЦ РМ), появилась возможность оценки прямых органических рисков ЗНО для аварийно-облученного населения Южного Урала, в том числе рака легкого.

**Цель исследования** – оценка риска смертности ЗНО легких в УКАОН при хроническом облучении в диапазоне до 1 Гр.

## Материалы и методы

### Когорта

В УКАОН входят лица, облученные с 1950 по 1960 гг. на реке Тече и на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). В настоящем исследовании для населения, проживавшего в Челябинской и Курганской областях (эта территория определена как территория наблюдения за смертностью (ТНС)) и включенного в состав УКАОН, была использована информация о причинах смерти за период наблюдения с 1950 по 2020 гг.

Численность когорты на 2024 г. составляет 62592 чел. Женщин в изучаемой когорте больше, чем мужчин, – 34803 (56 %) и 27789 (44 %) соответственно. Преобладает славянское население (преимущественно русские) – 72 % от всей когорты, татар и башкир значительно меньше – 28 %.

В рамках данного исследования случаем смерти от ЗНО легких считали летальный исход с кодом причины смерти 162 по МКБ-9 – «злокачественное новообразование трахеи, бронхов, легкого». Всего на ТНС за период наблюдения было зарегистрировано 925 случаев смерти от ЗНО легких. В таблице 1 приведены данные о случаях смерти от ЗНО легких в когорте, зарегистрированные за весь период наблюдения.

Таблица 1

**Случаи смерти от ЗНО легких в зависимости от пола, этнической принадлежности и возраста начала облучения**

[Table 1]

### Deaths from lung cancer depending on gender, ethnicity and age of exposure initiation]

| Параметры<br>[Parameters]                              | Мужчины<br>[Male] |    | Женщины<br>[Female] |    | Всего<br>[Total] |     |
|--------------------------------------------------------|-------------------|----|---------------------|----|------------------|-----|
|                                                        | n                 | %  | n                   | %  | n                | %   |
| Этническая принадлежность [Ethnicity]                  |                   |    |                     |    |                  |     |
| Славяне [Slavs]                                        | 589               | 72 | 78                  | 70 | 667              | 72  |
| Татары и башкиры<br>[Tatars and Bashkirs]              | 224               | 28 | 34                  | 30 | 258              | 28  |
| Всего [Total]                                          | 813               | 88 | 112                 | 12 | 925              | 100 |
| Возраст начала облучения, лет [Age at exposure, years] |                   |    |                     |    |                  |     |
| 0-19                                                   | 384               | 47 | 45                  | 40 | 429              | 46  |
| 20-59                                                  | 411               | 51 | 58                  | 52 | 469              | 51  |
| 60+                                                    | 18                | 2  | 9                   | 8  | 27               | 3   |
| Всего [Total]                                          | 813               | 88 | 112                 | 12 | 925              | 100 |

Среди случаев ЗНО легких в когорте преобладают мужчины – 88 % случаев. По этническому составу количество случаев ЗНО легких соответствует доле населения в группе (72 % – славяне, 28 % – татары и башкиры). По возрасту

на начало облучения более 50 % случаев зарегистрировано в диапазоне от 20 до 59 лет.

### Дозиметрические характеристики

Индивидуальные дозы облучения на легкие для членов УКАОН были рассчитаны с использованием системы TRDS-2016, разработанной сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ [15]. При расчете доз учитываются: история проживания человека на ТНС, пол, возраст, биокинетические характеристики человека (метаболические характеристики в зависимости от возраста облучения и конституции человека, пищевое поведение) и окружающей среды. Расчеты проводятся для восьми радионуклидов:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  [15].

Средняя доза облучения на легкие в УКАОН составила – 36 мГр, медианная – 7 мГр, максимальная – 995 мГр. Дозы у мужчин и женщин отличаются незначительно: у мужчин – 34 мГр средняя, 6 мГр медианная; у женщин – 37 мГр средняя, 8 мГр медианная. Дозовые различия между этническими группами более выражены: у славян средняя и медианная доза ниже, чем у татар и башкир (средняя доза у славян – 29 мГр, медианная – 7 мГр, у татар и башкир средняя доза 50 мГр, медианная – 17 мГр).

В таблице 2 показано распределение членов УКАОН по дозовым группам и распределение представителей УКАОН, умерших от ЗНО легких.

Дозовые характеристики во всей УКАОН и у умерших от ЗНО легких отличаются незначительно: первая дозовая группа больше остальных в процентном соотношении, в остальных группах различий меньше. Дозу до 100 мГр во всей когорте получили 94 % облученных, среди умерших от ЗНО легких – 91 %.

Таблица 2

**Распределение по дозовым группам в УКАОН и умерших от ЗНО легких**

[Table 2]

### Distribution by dose groups in the SUPER and deaths from lung cancer]

| Дозовые группы, Гр<br>[Dose groups, Gy] | УКАОН<br>[SUPER] |     | Умершие<br>от ЗНО легких<br>[Died<br>from lung cancer] |     |
|-----------------------------------------|------------------|-----|--------------------------------------------------------|-----|
|                                         | n                | %   | n                                                      | %   |
| 0 < 0,010                               | 35391            | 57  | 440                                                    | 48  |
| 0,010 < 0,050                           | 17465            | 28  | 284                                                    | 31  |
| 0,050 < 0,100                           | 5489             | 9   | 113                                                    | 12  |
| 0,100 < 0,200                           | 2001             | 3   | 36                                                     | 4   |
| 0,200 < 0,300                           | 817              | 1   | 13                                                     | 1   |
| 0,300 < 0,500                           | 979              | 2   | 26                                                     | 3   |
| 0,500 >                                 | 450              | 1   | 13                                                     | 1   |
| Всего [Total]                           | 62592            | 100 | 925                                                    | 100 |

### Статистические методы

Для расчета риска смерти от ЗНО легких использовался статистический пакет EPICURE (программы DATAB и AMFIT).

Показатели ИОР рассчитывали с использованием регрессионного анализа и простой параметрической модели ИОР. Распределение случаев смерти от ЗНО легких во времени считали Пуассоновским. Статистическая значимость и доверительные интервалы оценены методом максимального правдоподобия с 95 % значимостью. Статистические методы, используемые для анализа рисков в УКАОН, более подробно описаны в данной работе [16]. Модель имеет вид:

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

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

$z_0$  – другие факторы, которые могут влиять на базовые уровни ( $\lambda_0$ );

$z_1$  – факторы, которые могут модифицировать ИОР. Избыточный риск описывается как произведение функции дозового ответа  $p(d)$  на функцию модификации эффекта ( $\varepsilon(z_1)$ ).

Многофакторный анализ зависимости показателей смертности от ЗНО легких позволяет оценить дозовый эффект с одновременным учетом зависимости базовых показателей от нерадиационных факторов риска, то есть не требует использования данных национальной статистики о заболеваемости ЗНО. Таким образом, анализ включает два этапа: 1) выявление факторов, существенно влияющих на базовые уровни смерти от ЗНО без учета дозы, и получение базовых уровней заболеваемости; 2) непосредственно оценка дозовой зависимости и возможной модификации эффекта.

Чтобы оценить влияние на заболеваемость ЗНО нерадиационных факторов, все данные с помощью программы DATAB были организованы в сложные 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 лет и старше), 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, неизвестно), территория проживания (сельская местность или город), достигнутый возраст (категории по 5 лет до 80 лет и старше), календарный период (до 1986 года или после), год рождения когорты (родившиеся до 1937 года 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 нерадиационных факторов на смертность от ЗНО легких было протестировано как отдельно, так и в различных сочетаниях с помощью программы AMFIT. Факторы, оказывающие статистически значимое влияние на смертность от ЗНО легких в УКАОН при одновременном включении их в модель, были выбраны для расчета базовых уровней заболеваемости.

## Результаты и обсуждение

### Оценка базовых уровней смерти от нерадиационных факторов

Для расчета базовых уровней смертности была проведена оценка значимости влияния ряда факторов на уровень смертности от ЗНО легких при включении их в модель. Программа AMFIT позволяет количественно оценить одновременное влияние различных факторов на показатели смертности ЗНО легких независимо от дозы и оценить их статистическую значимость. По результатам проведенного тестирования статистически значимые факторы были включены в анализ: пол (у женщин в 10 раз меньше ( $p < 0,001$ )), этническая принадлежность (у славян показатели смертности выше в 1,4 раза ( $p < 0,01$ )), область проживания на момент облучения (выше у жителей Челябинской области ( $p < 0,001$ )), наличие ЗНО у родственников (смертность выше на 24 %, если такие установлены ( $p < 0,001$ )), курение (у курящих показатели смертности выше в 4 раза ( $p < 0,001$ )), городской/сельский житель (у жителей села выше ( $p < 0,001$ )), факт эвакуации (у эвакуированных выше на 16 % ( $p < 0,001$ )). Показатели смертности увеличиваются с возрастом ( $p < 0,001$ ): у родившихся до 1935 года показатели смертности ниже, чем у родившихся после 1935 года.

Таким образом, расчет базовых уровней в модели ИОР был проведен с учетом корректировки влияния каждого из указанных факторов на уровень смертности от ЗНО легких.

### Дозовая зависимость смертности от ЗНО легких

Для уточнения минимального латентного периода при оценке риска развития ЗНО легких в УКАОН в анализе дозовой зависимости протестировано влияние различных величин минимального латентного периода (МЛП) – 0, 2, 5, 10 лет (табл. 3). Значимые величины ИОР были получены при 0- и 2-летнем минимальном латентном периоде. Поскольку для реализации рака легких требуется период, был выбран МЛП, равный двум годам.

Величина ИОР/Гр смерти для ЗНО легких с 2-летним МЛП в когорте УКАОН составила 0,94/Гр, 95 % доверительный интервал (ДИ): 0,01–2,19;  $p < 0,05$ . При тестировании модели с увеличением латентного периода в 5 лет и больше увеличивается неопределенность оценок (табл. 3).

При анализе дозовой зависимости в программе AMFIT были протестированы три модели: линейная, линейно-квадратичная и квадратичная.

В таблице 4 представлены показатели риска смерти от ЗНО легких при применении линейной, квадратичной и линейно-квадратичной моделей с латентным периодом 2 года.

Значимые величины риска получены для линейной и квадратичной моделей, но при этом различия статистически не значимы. Величина вероятной ошибки ( $p$ ) и параметр отклонения линейной модели меньше аналогичных показателей квадратичной модели (табл. 4). В результате тестирования было определено, что зависимость ИОР от поглощенной дозы наилучшим образом описывалась линейной моделью, которая была статистически значимой.

Таблица 3

## Величины ИОР при различных минимальных латентных периодах

[Table 3]

## ERR values for various minimum latency periods]

| Минимальный латентный период, лет<br>[Minimal latency period, years] | ИОР/Гр,<br>95 % ДИ<br>[ERR/ Gy,<br>95 % CI] | P     | Избыточные ЗНО<br>[Excess cancers] | Отклонение<br>модели<br>[Deviance] | Относительная<br>ширина ДИ<br>[Relative width of the CI] |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 0                                                                    | 0,98<br>(0,04; 2,74)                        | 0,04  | 33,8                               | 6665,128                           | 2,76                                                     |
| 2                                                                    | 0,94<br>(0,01; 2,19)                        | 0,047 | 32,2                               | 6665,444                           | 2,32                                                     |
| 5                                                                    | 0,92<br>(-0,01; 2,17)                       | 0,05  | 30,8                               | 6665,679                           | 2,36                                                     |
| 10                                                                   | 0,84<br>(-0,07; 2,07)                       | 0,08  | 27,2                               | 6666,243                           | 2,55                                                     |
| 15                                                                   | 0,88<br>(-0,04; 2,12)                       | 0,06  | 27,2                               | 6665,928                           | 2,45                                                     |

Таблица 4

## Показатели риска ЗНО легких при тестировании разных моделей с латентным периодом 2 года

[Table 4]

## Risk values of lung cancer when testing different models with a 2-year latency period]

| Модель<br>[Model]                               | ИОР/Гр<br>[ERR/ Gy] | 95 % ДИ<br>[95 % CI] | P     | Избыточные ЗНО<br>[Excess cancers] | Атрибутивный<br>риск<br>[Attributable risk] | Параметр модели:<br>Отклонение<br>[Model parameter:<br>Deviation] |
|-------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------|------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Линейная<br>[Linear]                            | 0,94                | 0,01; 2,19           | 0,047 | 32,2                               | 3,7 %                                       | 6665,444                                                          |
| Квадратичная<br>[Quadratic]                     | 1,44                | 0,01; 3,29           | 0,096 | 12,3                               | 13,3 %                                      | 6666,622                                                          |
| Линейно-квадратичная [Linear-quadratic]         |                     |                      |       |                                    |                                             |                                                                   |
| Линейный компонент<br>[Linear component]        | 1,56                | -1,0; 4,14           | 0,31  | 42,5                               | 4,6 %                                       | 6665,191                                                          |
| Квадратичный компонент<br>[Quadratic component] | -1,26               | -6,0; 3,49           | >0,15 |                                    |                                             |                                                                   |

Распределение случаев смерти от ЗНО легких в когорте УКАОН, человеко-лет и атрибутивного риска по дозовым группам, рассчитанное на основе линейной модели с 2-летним латентным периодом, представлено в таблице 5. Атрибутивный риск рассчитывался как доля избыточных случаев смерти, рассчитанных по линейной модели, от наблюдаемого числа случаев смерти от ЗНО легких в дозовой группе членов УКАОН.

Как видно из таблицы 5, исходя из величины атрибутивного риска, у членов УКАОН в наибольшей дозовой группе (более 0,5 Гр) дополнительные случаи смерти от ЗНО, связанные с облучением, могут составить до 39 %. За 71-летний период наблюдения в УКАОН всего 3,5 % случаев смерти от ЗНО легких могут быть вызваны облучением.

Таблица 5

**Распределение случаев смерти от ЗНО легких, человеко-лет, атрибутивного риска по дозовым группам в УКАОН**

[Table 5]

**Distribution of deaths from lung cancer, person-years, attributable risk by dose groups in the SUPER**

| Дозовые группы, Гр<br>[Dose groups, Gy] | Случаи смерти от ЗНО легких в когорте<br>[Deaths from lung cancer in the cohort] | Человеко-годы<br>[Person-years] | Случаи по линейной модели<br>[Cases according to the linear model] |                                     |                                             |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                         |                                                                                  |                                 | Избыточные ЗНО<br>[Excess of cancers]                              | Базовые ЗНО<br>[Background cancers] | Атрибутивный риск, %<br>[Attributable risk] |
| 0–0,002                                 | 217                                                                              | 652377                          | 0,2                                                                | 249,5                               | 0,1                                         |
| 0,002–0,01                              | 227                                                                              | 449517                          | 1,1                                                                | 209,6                               | 0,5                                         |
| 0,01–0,02                               | 174                                                                              | 334522                          | 2,1                                                                | 161,5                               | 1,2                                         |
| 0,02–0,05                               | 107                                                                              | 190976                          | 3                                                                  | 102,9                               | 2,8                                         |
| 0,05–0,1                                | 113                                                                              | 191966                          | 6,6                                                                | 92,8                                | 5,8                                         |
| 0,1–0,2                                 | 38                                                                               | 68617,1                         | 4,6                                                                | 36,3                                | 12,1                                        |
| 0,2–0,5                                 | 36                                                                               | 62730,9                         | 9,5                                                                | 31,3                                | 26,4                                        |
| > 0,5                                   | 13                                                                               | 13430,8                         | 5,1                                                                | 8,9                                 | 39,2                                        |
| Вся когорта<br>[Total cohort]           | 925                                                                              | 1964137                         | 32,2                                                               | 892,8                               | 3,5                                         |

*Модификация эффекта*

У членов УКАОН была проведена оценка возможной модификации дозового ответа различными нерадиационными факторами с использованием программы Amfit. Модификация дозового ответа проводилась путем расчета дозовой за-

висимости в разных группах, объединенных каким-либо общим признаком. В таблице 6 представлены оценки ИОР смертности ЗНО легких у разных групп членов когорты по линейной модели с двухлетним МЛП. Достаточная численность когорты и длительный период наблюдения позволили получить статистически значимые значения ИОР для отдельных групп и провести их корректное сравнение.

Таблица 6

**Модификация ИОР смертности ЗНО легких нерадиационными факторами в УКАОН**

[Table 6]

**Modification of the ERR of mortality in lung cancer by non-radiation factors in the SUPER**

| Параметры<br>[Parameters]               | n   | ИОР/Гр<br>[ERR/Gy] | 95 % ДИ [95 % CI]               |                                  | P     |
|-----------------------------------------|-----|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------|
|                                         |     |                    | Нижняя граница<br>[Lower limit] | Верхняя граница<br>[Upper limit] |       |
| Вся когорта [Whole cohort]              | 925 | 0,94               | 0,01                            | 2,19                             | 0,047 |
| Мужчины [Male]                          | 813 | 0,61               | -0,41                           | 12,86                            | 0,24  |
| Женщины [Female]                        | 112 | 5,58               | 1,29                            | 7,05                             | 0,03  |
| Татары/башкиры<br>[Tatars and Bashkirs] | 258 | 3,37               | 0,86                            | 1,53                             | 0,02  |
| Славяне [Slavs]                         | 667 | 0,49               | -0,56                           | 2,16                             | 0,36  |
| Переселенные [Resettled]                | 365 | 0,91               | nf < 0*                         | 1,54                             | 0,09  |
| Непереселенные [Non-resettled]          | 560 | 2,02               | nf < 0*                         | 7,00                             | 0,43  |

| Параметры<br>[Parameters]                                                               | n   | ИОР/Гр<br>[ERR/Gy] | 95 % ДИ [95 % CI]               |                                  | P      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------|
|                                                                                         |     |                    | Нижняя граница<br>[Lower limit] | Верхняя граница<br>[Upper limit] |        |
| Область облучения [Exposure area]                                                       |     |                    |                                 |                                  |        |
| Челябинская [Chelyabinsk region]                                                        | 766 | 0,94               | -0,11                           | 2,00                             | 0,08   |
| Курганская [Kurgan region]                                                              | 149 | 25,82              | -18,67                          | 70,3                             | 0,26   |
| Жители города/села [Urban/rural]                                                        |     |                    |                                 |                                  |        |
| Сельские жители [Rural]                                                                 | 706 | 0,68               | -0,38                           | 1,74                             | 0,21   |
| Городские жители [Urban]                                                                | 219 | 2,35               | 0,05                            | 6,07                             | < 0,05 |
| ЗНО у родственников первой линии родства [Malignant neoplasm in first-degree relatives] |     |                    |                                 |                                  |        |
| Нет ЗНО [No cancer]                                                                     | 440 | 0,12               | -1,17                           | 1,40                             | > 0,5  |
| Есть ЗНО [There is cancer]                                                              | 413 | 1,21               | 0,02                            | 2,87                             | < 0,05 |
| Неизвестно [Unknown]                                                                    | 72  | 5,21               | -1,93                           | 12,35                            | 0,15   |
| Курение [Smoking]                                                                       |     |                    |                                 |                                  |        |
| Курит [Smokes]                                                                          | 292 | 0,89               | -0,3902                         | 2,166                            | 0,173  |
| Не курит [Doesn't smoke]                                                                | 47  | 4,66               | -1,467                          | 10,79                            | 0,136  |
| Неизвестно [Unknown]                                                                    | 586 | 0,51               | -1,098                          | 2,111                            | > 0,5  |
| Возраст начала облучения, лет [Age at the beginning of exposure, years]                 |     |                    |                                 |                                  |        |
| 10                                                                                      | -   | 1,19               | 0,04                            | 2,68                             | 0,004  |
| 40                                                                                      | -   | 0,78               | -0,67                           | 2,23                             | > 0,05 |
| Достигнутый возраст, лет [Attained age, years]                                          |     |                    |                                 |                                  |        |
| 30                                                                                      | -   | 0,90               | -2,28                           | 4,08                             | > 0,5  |
| 60                                                                                      | -   | 0,94               | 0,01                            | 2,21                             | 0,09   |
| Причина/авария облучения [Cause/accident of exposure]                                   |     |                    |                                 |                                  |        |
| Только река Теча [Only Techa River]                                                     | 637 | 0,97               | 0,03                            | 2,24                             | < 0,05 |
| Только ВУРС [Only EURT]                                                                 | 288 | 6,09               | 0,40                            | 13,77                            | < 0,05 |

\*nf- граница 95 % ДИ не может быть вычислена в связи с большой неопределенностью [The 95 % confidence interval limit cannot be calculated due to large uncertainty].

При анализе возможной модификации дозового эффекта статистически значимая связь риска с дозой была получена у женщин (ИОР/Гр=5,58; 95 %ДИ: 1,29;7,05),  $p < 0,05$ ; в группе татар и башкир (ИОР/Гр = 3,37; 95 % ДИ: 0,86;1,53),  $p < 0,05$ ; у городских жителей (ИОР/Гр = 2,35; 95 % ДИ:0,05; 6,07),  $p < 0,05$ ; у тех, у кого есть родственники с ЗНО в первой линии родства (ИОР/Гр = 1,21; 95 % ДИ:0,02; 2,87),  $p < 0,05$ ; у облученных в населенных пунктах ВУРСа (ИОР/Гр = 6,09; 95 % ДИ: 0,40; 13,77),  $p < 0,05$  (табл. 6). Была выявлена тенденция к более высоким величинам ИОР у женщин относительно мужчин, в группе татар и башкир – относительно русского населения, у городских жителей – относительно сельского населения, у лиц с родственниками, имею-

щими ЗНО, у облученных на ВУРСе – относительно облученных на реке Теча. Была выявлена тенденция к увеличению ИОР с увеличением достигнутого возраста, но сами показатели ИОР в возрасте 30 и 60 лет не были статистически значимыми. После коррекции значимой зависимости исходных показателей смертности от курения, различий величины риска от дозы у курящих и некурящих не наблюдалось.

### Заключение

Ранее в облученных популяциях уже был показан статистически значимый риск смертности от ЗНО легких. Так, в Японской когорте переживших атомную бомбардировку (LSS) общий ИОР смерти от ЗНО легких на 1 Гр дозы внеш-



него облучения на легкие составил 0,63 (0,42; 0,88), для мужчин – 0,40 (0,17; 0,67), для женщин – 1,1 (0,68; 1,60), что примерно в 2 раза выше, чем у мужчин [10]. В когорте профес-сионалов ПО «Маяк» расчетный ИОР/Гр для внешнего гамма-облучения составил 0,19 (95 % ДИ: 0,07–0,31) для обоих полов вместе взятых, в то время как ИОР/Гр для внут-реннего облучения, рассчитанный на основе средних доз плутония, составил 3,5 (95 % ДИ: 2,3 – 4,6) и 8,9 (95 % ДИ: 3,4 – 14) для мужчин и женщин в возрасте 60 лет [9]. В тоже время, в когорте ликвидаторов последствий аварии на Чер-нобыльской АЭС статистически значимого увеличения ИОР смерти на 1 Зв для доз, полученных при ликвидации послед-ствий аварии на Чернобыльской АЭС, не обнаружено [12].

В текущем исследовании проведенный анализ риска смерти от ЗНО легких показал наличие статистически значи-мого и положительного дозового ответа за 71-летний пе-риод наблюдения за когортой облученного населения на Южном Урале. Дозовая зависимость имела линейный ха-рактер. Величина ИОР/Гр смерти для ЗНО легких с двухлет-ним МЛП в когорте УКАОН составила 0,94/Гр, 95 % ДИ: 0,01 – 2,19;  $p < 0,05$ . Данные величины ИОР имеют широкий доверительный интервал и не противоречат результатам аналогичных исследований в Японской когорте, выживших после атомной бомбардировки, а также согласуются с дан-ными в когорте работников ПО «Маяк» (для внешнего облу-чения). При анализе возможной модификации дозового эф-фекта получены статистически значимые оценки ИОР в от-дельных группах УКАОН по полу, факту переселения, обла-сти проживания, в которой получено облучение, принадлеж-ности к сельской/городской местности, наличию ЗНО у род-ственников первой линии родства, возрасту начала облуче-ния, принадлежности к аварии (река Теча или ВУРС). При этом, различия внутри групп и между всеми показате-лями не являлись статистически значимыми.

По данным литературы курение является доказанным фактором риска развития рака легких [6,17–19]. При ана-лизе базовых уровней смертности от рака легких было пока-зано, что у курящих показатели смертности выше в 4 раза ( $p < 0,001$ ). При исследовании дозовой зависимости после коррекции базовых уровней в зависимости от курения, в нашем исследовании не было выявлено статистически значимой модификации ИОР фактором курения. Сбор дан-ных с уточнением длительности и интенсивности курения, количества выкуренных сигарет продолжается и в дальней-шем в исследованиях риска радиационного воздействия бу-дет проведен уточненный анализ. Таким образом, эпиде-миологическая когорта достаточной численности, объеди-няющая лиц, облученных в двух авариях, является хорошим потенциалом для будущих исследований.

#### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Микрюкова Л.Д. – дизайн исследования, анализ риска, интерпретация данных, дизайн статьи, написание статьи.

Завьялов Д.А. – анализ риска, обсуждение результатов, подготовка разделов статьи.

#### Благодарности

Выражаем благодарность коллективу биофизической лаборатории УНПЦ РМ под руководством Е.А. Шишкиной за предоставленные оценки индивидуальных доз и коллективу отдела Базы данных «Человек»

под руководством С.В. Тряпицыной за обновленные данные регистров медико-дозиметрической базы данных УНПЦ РМ, а также коллективу эпидемиологической лаборатории за подготовку данных к анализу.

#### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках реализации федеральной це-левой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года».

#### Литература

1. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.
2. Akleyev A.V., Degteva M.O., Krestinina L.Yu. Overall results and prospects of the cancer risk assessment in the Urals population affected by chronic low dose-rate exposure // Radiation Medicine and Protection. 2022. Vol. 3, No 4. P. 159-166. DOI: 10.1016/j.radmp.2022.08.002.
3. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Акеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393-402.
4. Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., Старцев Н.В. Уральская когорта потомков облученного населения // Вопросы радиационной безопасности. 2022, № 4(108). С. 86-94.
5. Злокачественные новообразования в России в 2023 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна и др. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «МНИЦ радиологии» Минздрава России. 2024. 276 с.
6. Bray F., Laversanne M., Sung H. et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. // CA: A Cancer Journal for Clinicians. 2024. Vol.74, No 3. P. 229-263. DOI: 10.3322/caac.21834
7. Gilbert E.S., Koshurnikova N.A., Sokolnikov M.E. et al. Lung cancer in Mayak workers // Radiation Research. 2004. Vol. 162, No 5. P. 505-516. DOI: 10.1667/rr3259.
8. Gillies M., Kuznetsova I., Sokolnikov M. et al. Lung Cancer Risk from Plutonium: A Pooled Analysis of the Mayak and Sellafield Worker Cohorts // Radiation Research. 2017. Vol. 188, No 6. P. 645-660. DOI: 10.1667/RR14719.1.
9. Stram D.O., Sokolnikov M., Napier B.A. et al. Lung Cancer in the Mayak Workers Cohort: Risk Estimation and Uncertainty Analysis // Radiation Research. 2021. Vol. 1, No 95(4). P. 334-346. DOI: 10.1667/RADE-20-00094.1.
10. Ozasa K., Shimizu Y., Suyama A. et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases // Radiation Research. 2012 Vol. 177, No 3. P. 229-243. DOI: 10.1667/rr2629.1.
11. Микрюкова Л.Д. Эпидемиологические особенности злокачественных новообразований дыхательной системы в когорте лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию // Эпидемиология и вакцинопрофилактика. 2024. Т. 23, № 6. С. 47-53. DOI: 10.31631/2073-3046-2024-23-6-47-53.
12. Туков А.Р., Шафранский И.Л., Бирюков А.П. и др. Риск смерти от рака легких среди ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС, работников предприятий атомной промышленности. Онкология // Журнал им. П.А. Герцена. 2022. Т. 11, № 5. С. 25-30. DOI: 10.17116/onkolog20221105125.
13. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С., Микрюкова Л.Д. и др. Сравнительный анализ риска смерти от солидных злокачественных новообразований у населения, облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 1. С. 100-114.

14. Крестинина Л.Ю., Силкин С.С. 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.
15. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures // Health Physics. 2019. Vol. 117, No 4. P. 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
16. Preston D.L., Lubin J., Pierce D., McConney. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Company, 1993.
17. Cahoon E.K., Preston D.L., Pierce D.A. et al. Lung, Laryngeal and Other Respiratory Cancer Incidence among Japanese Atomic Bomb Survivors: An Updated Analysis from 1958 through 2009 // Radiation Research. 2017. Vol. 187, No 5. P. 538-548. DOI: 10.1667/RR14583.1.
18. Hori M., Tanaka H., Wakai K. et al. Secondhand smoke exposure and risk of lung cancer in Japan: a systematic review and meta-analysis of epidemiologic studies // Japanese Journal of Clinical Oncology. 2016. Vol. 46, No 10. P. 942-951. DOI: 10.1093/jjco/hyw091.
19. Furukawa K., Preston D.L., Lönn S. et al. Radiation and smoking effects on lung cancer incidence among atomic bomb survivors // Radiation Research. 2010. Vol. 174, No 1. P. 72-82. DOI: 10.1667/RR2083.1.

Поступила: 17.03.2025

**Микрюкова Людмила Дмитриевна** – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 454141, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, д. 68-А.; E-mail: mikludm@mail.ru  
ORCID: 0000-0002-6269-5114

**Завьялов Данила Александрович** – младший научный сотрудник эпидемиологической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия  
ORCID: 0009-0005-8754-1655

**Для цитирования:** Микрюкова Л.Д., Завьялов Д.А. Риск смерти от злокачественных новообразований легких в Уральской когорте аварийно-облученного населения // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 7–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-7-15

## Lung cancer mortality risk in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort

Lyudmila D. Mikryukova, Danila A. Zavyalov

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

*The objective of the study is to obtain risk estimates of lung cancer mortality for members of the Southern Urals Populations Exposed to Radiation Cohort. Materials and methods: The cohort, which unites individuals who were chronically exposed to radiation in the South Urals on the Techa River and in the East Urals Radioactive Trace, consists of 62,592 people. A regression analysis with a simple parametric model of the excess relative risk was used in the study. Results: Over the follow-up period from 1950 to 2020, 925 deaths from lung cancer were identified. The number of person-years at risk was 1964140. Mean accumulated lung dose calculated using the TRDS-2016 dosimetry system was 0.038 Gy and the maximum dose was 0.995 Gy. As a result of the analysis a statistically significant linear dose-dependence of the lung cancer mortality rate was obtained. The ERR/Gy for lung cancers with 2-year minimal latency period was 0.94/Gy, 95 % CI: 0.01–2.19;  $p < 0.05$ . Over the 71-year follow up period 3.5 % of lung cancer cases could be associated with radiation exposure in cohort. Analysis of baseline lung cancer mortality rates showed that smokers had 4 times higher mortality rates ( $p < 0.001$ ). When analyzing the possible modification of the dose effect, a statistically significant relationship between risk and dose was obtained in women; in the group of Tatars and Bashkirs; in urban residents; in those who have cancers in first-degree relatives; in those exposed to radiation in the East Ural radioactive trace. Conclusion: Based on the findings of the accomplished study a statistically significant lung cancer mortality risk per 1 Gy has been established in the cohort of people affected by long-term radiation exposure in the low-to-medium dose range. The obtained results could serve as the basis to develop the program of preventive care for the population aggrieved.*

**Key words:** lung cancers, chronic exposure, radiation risk, accidentally exposed population.

**Lyudmila D. Mikryukova**

Urals Research Center for Radiation Medicine

**Address for correspondence:** Vorovsky Str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: mikludm@mail.ru

### Authors' personal contribution

Mikryukova L.D. – study design, risk analysis, data interpretation, article design, article writing.

Zavyalov D.A. – risk analysis, discussion of results, preparation of sections of the article.

### Acknowledgments

We express our gratitude to the team of the biophysical laboratory of the Ural Research Center for Radiation Medicine under the leadership of E.A. Shishkina for providing estimates of individual doses, and to the team of the Human Database department under the leadership of S.V. Tryapitsyna 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 for preparing the data for analysis.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The work was carried out within the framework of the Federal target program 'Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the period up to 2030'.

### References

- Aleksakhin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, Drozhko EG, Ilin LA, Kryshev II, et al. Large-scale radiation accidents: consequences and protective measures. Moscow: IzdAT; 2001. 752 p. (in Russian).
- Akleyev AV, Degteva MO, Krestinina LYU. Overall results and prospects of the cancer risk assessment in the Urals population affected by chronic low dose-rate exposure. *Radiation Medicine and Protection*. 2022;3(4): 159-166. DOI: 10.1016/j.radmp.2022.08.002.
- 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).
- Krestinina LYU, Shalaginov SA, Startsev NV. Urals Cohort of Exposed Population Offspring. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Issues of Radiation Safety*. 2022;4(108): 86-94 (In Russian).
- Malignant neoplasms in Russia in 2023 (morbidity and mortality) / ed. by AD Kaprin et al. Moscow: P.A. Herzen Moscow Oncology Research Institute – branch of the Federal State Budgetary Institution "National Institute of Radiology" of the Ministry of Health of the Russian Federation; 2024. 276 p. (In Russian).
- Bray F, Laversanne M, Sung H, Ferlay J, Siegel RL, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2024;74(3): 229-263. DOI: 10.3322/caac.21834.
- Gilbert ES, Koshurnikova NA, Sokolnikov ME, Shilnikova NS, Preston DL, Ron E, et al. Lung cancer in Mayak workers. *Radiation Research*. 2004;162(5): 505-516. DOI: 10.1667/rr3259.
- Gillies M, Kuznetsova I, Sokolnikov M, Haylock R, O'Hagan J, Tsareva Y, et al. Lung Cancer Risk from Plutonium: A Pooled Analysis of the Mayak and Sellafield Worker Cohorts. *Radiation Research*. 2017;188(6): 645-660. DOI: 10.1667/RR14719.1.
- Stram DO, Sokolnikov M, Napier BA, Vostrotnin VV, Efimov A, Preston DL. Lung Cancer in the Mayak Workers Cohort: Risk Estimation and Uncertainty Analysis. *Radiation Research*. 2021;195(4): 334-346. DOI: 10.1667/RADE-20-00094.1.
- Ozasa K, Shimizu Y, Suyama A, Kasagi F, Soda M, Grant EJ, et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. *Radiation Research*. 2012;177(3): 229-243. DOI: 10.1667/rr2629.1.
- Mikryukova LD. Epidemiological Studies of the Respiratory System in a Cohort of People Exposed to Chronic Radiation Exposure. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2024;23(6): 47-53. (In Russian). DOI: 10.31631/2073-3046-2024-23-6-47-53.
- Tukov AR, Shafranskii IL, Biryukov AP, Prokhorova ON, Orlov YuV. Risk of death from lung cancer among the liquidators of the consequences of the Chernobyl accident, employees of the enterprises of the nuclear industry. *P.A. Herzen Journal of Oncology = Onkologiya. Zhurnal imeni P.A. Gertsena*. 2022;11(5): 25-30. (In Russian.). DOI: 10.17116/onkolog20221105125.
- Krestinina LYU, Silkin SS, Mikryukova LD, Epifanova SB, Akleyev AV. Risk of death from solid cancer among residents of the Techa Riverside and the East Urals Radioactive Trace areas exposed to radiation: Comparative analysis. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2017. T. 26, № 1. С. 100-114. (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-100-114.
- Krestinina LYU, Silkin SS. Solid cancer mortality risk in the Southern Urals populations exposed to radiation cohort: 1950-2019. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 19-31. (In Russian.) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-19-31.
- Degteva MO, Napier BA, Tolstykh EI, Shishkina EA, Shagina NB, Volchkova AYU, et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D code for reconstruction of deterministic estimates of dose from environmental exposures. *Health Physics*. 2019;117(4): 378-387. DOI: 10.1097/HP.0000000000001067.
- Preston DL, Lubin J, Pierce D, McConney. *Epicure Users Guide*. Seattle, Washington: Hirosoft International Company; 1993.
- Cahoon EK, Preston DL, Pierce DA, Grant E, Brenner AV, Mabuchi K, et al. Lung, Laryngeal and Other Respiratory Cancer Incidence among Japanese Atomic Bomb Survivors: An Updated Analysis from 1958 through 2009. *Radiation Research*. 2017;187(5): 538-548. DOI: 10.1667/RR14583.1.
- Hori M, Tanaka H, Wakai K, Sasazuki S, Katanoda K. Secondhand smoke exposure and risk of lung cancer in Japan: a systematic review and meta-analysis of epidemiologic studies. *Japanese Journal of Clinical Oncology*. 2016;46(10): 942-951. DOI: 10.1093/jjco/hyw091.
- Furukawa K, Preston DL, Lönn S, Funamoto S, Yonehara S, Matsuo T, et al. Radiation and smoking effects on lung cancer incidence among atomic bomb survivors. *Radiation Research*. 2010;174(1): 72-82. DOI: 10.1667/RR2083.1.

Received: March 17, 2025

**For correspondence: Lyudmila D. Mikryukova** – Candidate of Medical Sciences, Senior Researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (68A Vorovsky Str., Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: mikludm@mail.ru )

ORCID: 0000-0002-6269-5114

**Danila A. Zavyalov** – Researcher of Epidemiological Laboratory, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0009-0005-8754-1655

**For citation: Mikryukova L.D., Zavyalov D.A. Lung cancer mortality risk in the South Urals Population Exposed to Radiation Cohort. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 7–15. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-7-15**

## Анализ методов статистической оценки стандартных доз облучения пациентов при компьютерной томографии в Федеральном медицинском биофизическом центре им. А.И. Бурназяна

Маткевич Е.И., Сивенков А.Г., Башков А.Н., Самойлов А.С.

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна  
Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

*Сопоставлены результаты оценки стандартных доз облучения пациентов при компьютерной томографии основных анатомических областей в Федеральном медицинском биофизическом центре им. А.И. Бурназяна при применении трёх статистических методов. Использованы данные по 4854 исследованиям за 2024 г. Для большинства анатомических областей стандартная доза, рассчитанная по методу 1 (пациенты из всей выборки, средняя масса тела 76–85 кг) была выше, чем по методу 2 (отобранные из всей выборки пациенты с массой 70 ± 5 кг), различия были статистически значимыми ( $p < 0,001$ ). Сравнение стандартных доз, вычисленных по методу 1 и методу 3 (расчёт по модели линейной аппроксимации для всей выборки и установление по этой модели дозы для «стандартного» пациента массой тела 70 кг) показало, что они близки — при использовании обоих методов стандартная доза отражает сходный характер распределения массы тела пациентов. При сравнении между собой методов 2 и 3, использующих критерий «стандартного» пациента, установлено, что стандартные дозы, рассчитанные по методу 2, ниже, чем рассчитанные по методу 3 в 1,1 – 1,5 раза. За одно исследование для наиболее протяжённых смежных областей они составили: органы грудной клетки, брюшной полости и забрюшинного пространства и таза без контраста — 6,3 мЗв (метод 2) и 9,34 мЗв (метод 3); органы брюшной полости и забрюшинного пространства с контрастом — 18,8 мЗв (метод 2) и 20,11 мЗв (метод 3). Заключение: Проанализированы результаты применения трёх статистических методов оценки стандартных доз облучения пациентов при компьютерной томографии. Корректность оценок и сопоставления стандартных доз в целях контроля за условиями облучения пациентов определяется единообразием методических подходов для принятия решения о необходимости оптимизации этих условий.*

**Ключевые слова:** ионизирующие излучения, лучевая диагностика, компьютерная томография, стандартные дозы облучения, статистические методы оценки, малые выборки.

### Введение

При медицинских обследованиях как населения, так и персонала предприятий, работающих с техногенными источниками ионизирующего излучения, в последние годы увеличивается количество лучевых методов диагностики, при этом большая их доля приходится на компьютерную томографию (КТ). Одним из направлений по снижению медицинского облучения является принцип оптимизации, кото-

рый осуществляется путем внедрения в практику референтных диагностических уровней (РДУ) [1–3]. В настоящее время действует ряд нормативно-методических документов<sup>1,2,3</sup>, в которых приводятся рекомендации и/или методики по определению доз облучения пациента. Цель РДУ заключается в том, чтобы помочь избежать такой дозы облучения пациента, которая не способствует клинической цели медицинской задачи визуализации (избыточна) [4], то есть для контроля доз облучения пациентов РДУ – как индикатор си-

<sup>1</sup> МР 2.6.1.0296-22. Оптимизация радиационной защиты пациентов в лучевой диагностике посредством применения референтных диагностических уровней: 2.6.1. Радиационная гигиена. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. М.: Роспотребнадзор, 2022. 57 с. [MR 2.6.1.0296-22 Optimization of radiation protection of patients in radiodiagnostics by using reference diagnostic levels: 2.6.1. Radiation hygiene. Ionizing radiation, radiation safety. Moscow: Rosпотребнадзор, 2022. 57 p. (In Russ.)].

<sup>2</sup> МУ 2.6.1.2944-11. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований. Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2011. 32 с. (в ред. МУ 2.6.1.3584-19, М.: Роспотребнадзор, 2019) [MU 2.6.1.2944-11 Methodical guidelines Ionizing radiation, radiation safety. Control of effective doses of radiation to patients during medical X-ray examinations. Moscow: Rosпотребнадзор, 2011. 32 p. (as amended by MU 2.6.1.3584-19, Moscow: Rosпотребнадзор, 2019. 32 p.) (In Russ.)].

<sup>3</sup> МУ 2.6.7.3652-20. Методы контроля в КТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты. М.: Роспотребнадзор, 2020. 28 с. [MU 2.6.7.3652-20. Methodical guidelines. Control methods in CT diagnostics for optimization of radiation protection. Moscow: Rosпотребнадзор, 2020. 28 p. (In Russ.)].

**Маткевич Елена Ивановна**

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна

Адрес для переписки: 123098, Россия, Москва, ул. Маршала Новикова, д.23; E-mail: ei.matkevich@yandex.ru



туаций аномально высокого облучения (переоблучения пациентов)<sup>4</sup>. Это достигается сравнением численного значения РДУ (региональных или национальных) и среднего или другого соответствующего значения, наблюдаемого на практике у подходящей референтной группы пациентов или подходящего референтного фантома [5–7].

Для расчета РДУ используют стандартные дозы (СД) облучения пациентов в медицинских учреждениях региона или страны. Для вычисления СД формируют референтную группу из пациентов с близкими физическими параметрами по массе и размерам тела, поскольку от них зависит доза облучения [3, 8–10]. Для сопоставимости данных рекомендуется ориентироваться на пациентов со стандартной массой тела. Однако, в то же время, как указано в МКРЗ 135 [3], РДУ должны определяться на основе данных, полученных в реальной клинической практике.

Как указывается в нормативном документе<sup>5</sup>, в медицинских организациях следует регулярно проводить анализ дозовых нагрузок при типичных КТ-исследованиях и сравнивать их с установленными РДУ. Это необходимо для внутреннего контроля качества и своевременной оптимизации протоколов исследований.

Однако при расчетах СД могут использоваться различные статистические методы, и эти методы могут обуславливать значительные различия при определении СД. Сравнительная оценка разных методов вычисления СД на одном и том же представителем контингента пациентов до настоящего времени не проводилась, однако имеет важное практическое значение. Это определяет актуальность данного исследования.

**Цель исследования** – сравнить результаты применения различных методов статистической оценки стандартных доз облучения пациентов при компьютерной томографии основных анатомических областей в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

## Материалы и методы

Проведен анализ эффективных доз облучения пациентов, направляемых на КТ-диагностику в Центр лучевой диагностики из отделений многопрофильной клиники ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в 2024 году. Для этого из архивной системы Центра лучевой диагностики ФГБУ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России выбраны и систематизированы дозы облучения пациентов при 4854 КТ-исследованиях, из них: без внутривенного контрастного усиления (КТ без КУ) (нативных) – 1932 и с внутривенным контрастным усилением (КТ с КУ) – 2922 по основным анатомическим областям.

Все исследования распределены согласно форме № 30, утвержденной приказом Росстата от 29 ноября 2024 г. № 594, по следующим анатомическим областям<sup>6</sup>: 1 – голова, 2 – шея, 3 – органы грудной клетки (ОГК), 4 – сердце и сосуды, 5 – органы брюшной полости (ОБП) и забрюшинного пространства (ЗБП), 6 – органы малого таза (ОМТ), 7 – позвоночник и спинной мозг, 8 – кости, суставы, мягкие ткани конечностей, 9 – органы грудной клетки, брюшной полости и забрюшинного пространства и таза. При этом под КТ-исследованием подразумевали полный цикл обследования органа (части тела) пациента, который может включать несколько КТ-сканирований<sup>7</sup>.

Общие сведения о пациентах, проходивших КТ-исследования в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна в 2024 г, представлены в таблицах 1 и 2. По результатам оценки характера распределения этих показателей по критерию Колмогорова-Смирнова установлено, что они близки к нормальному. Для возраста и массы тела приведены средние арифметические значения и стандартные ошибки среднего арифметического значения ( $M \pm m$ ).

Таблица 1

**Общие сведения о пациентах, проходивших исследования на КТ-томографе Canon Aquilion One 320 в 2024 г.**

[Table 1]

**General information about patients undergoing CT-examination on the Canon Aquilion One 320 CT-scanner in 2024]**

| Показатели<br>[Indicators]                                                                 | Значения показателей<br>[Values of indicators] |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                                            | КТ без КУ<br>[non-contrast CT]*                | КТ с КУ<br>[contrast-enhanced CT]* |
| Возраст по всей выборке, $M \pm m$ , лет<br>[Age for the entire sample, $M \pm m$ , years] | 58,9 $\pm$ 0,21                                |                                    |

<sup>4</sup> СанПиН 2.6.4115-25 «Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения», 2025. 144 с. [SanPiN 2.6.4115-25 "Sanitary and epidemiological requirements in the field of radiation safety of the population when handling ionizing radiation sources", 2025. 144 p. (In Russ.)].

<sup>5</sup> Методические рекомендации № 121. Применение референтных диагностических уровней для взрослых пациентов в лучевой диагностике. М.: ДЗМ, 2020. 35 с. [Methodological recommendations No. 121. Application of diagnostic reference levels to adult patients in diagnostic radiology. Moscow: DZM, 2020. 35 p. (In Russ.)].

<sup>6</sup> Приказ Росстата от 29.11.2024 N 594 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения № 30 «Сведения о медицинской организации» и указаний по ее заполнению». М., 2024. 134 с. [Order of Rosstat dated 29.11.2024 N 594 «On approval of federal statistical observation form N 30 "Information about a medical organization" and instructions for filling it out". Moscow, 2024. 134 p. (In Russ.)].

<sup>7</sup> Методические рекомендации по обеспечению радиационной безопасности. Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения N 3-ДОЗ от 16.02.2007 №0100/1659-07-26. М., 2007. 23 с. [Methodological recommendations for ensuring radiation safety. Filling out forms of federal state statistical observation No. 3-DOZ dated 16.02.2007 No. 0100/1659-07-26. Moscow, 2007. 23p. (In Russ.)].



| Показатели<br>[Indicators]                                                                        | Значения показателей<br>[Values of indicators] |                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
|                                                                                                   | КТ без КУ<br>[non-contrast CT]*                | КТ с КУ<br>[contrast-enhanced CT]* |
| Возраст мужчин, $M \pm m$ , лет<br>[Age of men, $M \pm m$ , years]                                | $56,5 \pm 0,38$                                | $60,9 \pm 0,32$                    |
| Возраст женщин, $M \pm m$ , лет<br>[Age of women, $M \pm m$ , years]                              | $57,9 \pm 0,36$                                | $60,2 \pm 0,25$                    |
| Масса тела по всей выборке, $M \pm m$ , кг<br>[Body weight for the entire sample, $M \pm m$ , kg] | $78,0 \pm 0,31$                                |                                    |
| Масса тела мужчин, $M \pm m$ , кг<br>[Men's body weight, $M \pm m$ , kg]                          | $86,9 \pm 0,61$                                | $83,5 \pm 0,4$                     |
| Масса тела женщин, $M \pm m$ , кг<br>[Body weight of women, $M \pm m$ , kg]                       | $72,0 \pm 0,35$                                | $72,5 \pm 0,4$                     |

\* М – среднее арифметическое значение; m – стандартная ошибка среднего арифметического значения [M is the arithmetic mean; m is the standard error of the arithmetic mean].

Таблица 2

**Распределение по полу пациентов при исследованиях на КТ-томографе Canon Aquilion One 320 в 2024 г.**

[Table 2]

**Gender distribution of patients in CT-examination on the Canon Aquilion One 320 CT-scanner in 2024]**

| Анатомические области<br>[Anatomical areas]                                                               | Количество КТ-исследований [Number of CT-scans]   |                   |                  |                                                      |                   |                  | Итого<br>[Finally] |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------|------------------|------------------------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|
|                                                                                                           | КТ без контрастного усиления<br>[non-contrast CT] |                   |                  | КТ с контрастным усилением<br>[contrast-enhanced CT] |                   |                  |                    |
|                                                                                                           | мужчин<br>[men]                                   | женщин<br>[women] | всего<br>[total] | мужчин<br>[men]                                      | женщин<br>[women] | всего<br>[total] |                    |
| 1. Голова<br>[Head]                                                                                       | 266                                               | 297               | 563              | 44                                                   | 45                | 89               | 652                |
| 2. Шея<br>[Neck]                                                                                          | 2                                                 | 3                 | 5                | 8                                                    | 5                 | 13               | 18                 |
| 3. ОГК<br>[Thorax]                                                                                        | 299                                               | 292               | 591              | 27                                                   | 35                | 62               | 653                |
| 4. Сердце и сосуды<br>[Heart and blood vessels]                                                           | 44                                                | 32                | 76               | 138                                                  | 129               | 267              | 343                |
| 5. ОБП и ЗБП<br>[Abdomen and retroperitoneal space]                                                       | 159                                               | 121               | 280              | 183                                                  | 248               | 431              | 711                |
| 6. ОМТ<br>[Pelvis]                                                                                        | 3                                                 | 5                 | 8                | 2                                                    | 1                 | 3                | 11                 |
| 7. Позвоночник и спинной мозг<br>[Spine and spinal cord]                                                  | 62                                                | 82                | 144              | 1                                                    | 0                 | 1                | 145                |
| 8. Кости, суставы<br>и мягкие ткани конечностей<br>[Bones, joints<br>and soft tissues of the extremities] | 51                                                | 52                | 103              | 0                                                    | 0                 | 0                | 103                |
| 9. ОГК, ОБП, ЗБП и ОМТ<br>[Thorax, abdomen and retroperito-<br>neal space, and pelvic organs]             | 85                                                | 77                | 162              | 845                                                  | 1211              | 2056             | 2218               |
| Всего<br>[Total]                                                                                          | 971                                               | 961               | 1932             | 1248                                                 | 1674              | 2922             | 4854               |

Как видно из таблицы 1, у мужчин и женщин средний возраст был сопоставим, а средняя масса тела у мужчин и женщин имела значительные различия – при КТ БК и КТ КУ, соответственно, у мужчин –  $86,9 \pm 0,61$  кг и  $83,5 \pm 0,4$  кг, у женщин –  $72,0 \pm 0,35$  кг и  $72,5 \pm 0,4$  кг. Количество пациентов в каждой группе в зависимости от пола не имело существенных отличий (табл. 2).

В соответствии с МУК 2.6.7.3652-20 для контроля доз облучения пациентов при проведении КТ-исследований определяли DLP, на основании значения DLP рассчитывалась индивидуальная эффективная доза ( $D_{\text{eff}}$ , мЗв), в соответствии с утвержденными методиками МУ 2.6.1.2944-11 по стандартной формуле:

$$D_{\text{eff}} = \sum_i DLP_i * e^i_{DLP}, \text{ мЗв},$$

где  $DLP_i$  – значение, регистрируемое с консоли КТ-томографа Canon Aquilion One 320, мГр·см;

$e^i_{DLP}$  – дозовый коэффициент для  $i$ -ой анатомической области, мЗв/(мГр·см).

Согласно методическим рекомендациям МУ 2.6.1.0296-22, стандартная доза (СД) при рентгенорадиологических исследованиях определяется как среднее значение дозовой характеристики в репрезентативной выборке пациентов, обследованных в типовом режиме с использованием типового протокола. Для компьютерной томографии дозовой характеристикой может выступать  $CTD_{\text{vol}}$ , DLP или оценка эффективной дозы, полученная расчетным путём. При этом указано, что формирование выборки должно отражать типичную клиническую практику, а не ограничиваться только пациентами со стандартной массой тела.

В проведенном исследовании выполнены расчеты и сопоставление стандартной эффективной дозы ( $СД_{\text{эф}}$ ) пациентов при использовании трех статистических методов:

– метод 1 – по всей выборке из 4854 КТ-исследований пациентов с массой тела от 40 до 160 кг вычисляли медианы [25- и 75-% квартили] эффективной дозы облучения по основным анатомическим областям тела (Me [25th, 75th], мЗв);

– метод 2 – по выборке из 1203 отобранных «Стандартных» пациентов [11] с массой тела  $70 \pm 5$  кг вычисляли медианы [25- и 75-% квартили] эффективной дозы облучения по основным анатомическим областям тела (Me [25th, 75th], мЗв)<sup>8</sup>,

– метод 3 – по выборке из 4234 КТ-исследований пациентов с массой тела от 40 до 160 кг для каждой из наиболее часто исследуемых в нашем лечебном учреждении областей (голова; ОГК; ОБП и ЗБП; ОГК, ОБП, ЗБП и ОМТ) методом линейной аппроксимации набора данных об индивидуальных эффективных дозах облучения пациентов с разной массой тела рассчитывали коэффициенты модели, затем для соответствующей анатомической области определяли

стандартные эффективные дозы облучения для «стандартного» пациента массой 70 кг, вычисления проводили по уравнению:

$$Y_n = a_n + b_n \cdot X,$$

где  $Y_n$  – стандартная эффективная доза облучения пациента массой тела 70 кг при КТ исследовании анатомической области  $n$ , мЗв;

$a_n, b_n$  – коэффициенты уравнения регрессии, рассчитанные для основных анатомических областей;

$X$  – масса тела «стандартного» пациента 70 кг.

Основная информация о КТ-томографе и параметрах протоколов сканирования представлена в таблице 3. Все анатомические области были отсканированы с использованием указанных параметров, коллимация и питч выставлялись в зависимости от области сканирования. Использовалась автоматическая настройка силы тока (мА) в рентгеновской трубке в зависимости от толщины и плотности тканей пациента.

Таблица 3

**Характеристика КТ-томографа и параметры использованных протоколов**

[Table 3]

**Characteristics of the CT-scanner and parameters of the protocols used]**

| Параметры [Parameters]                                  | КТ-томографе [CT-scanner]<br>Canon Aquilion One 320     |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Количество рядов детекторов<br>Number of detector rows] | 320                                                     |
| Год установки<br>[Year of installation]                 | 2020                                                    |
| Питч [Pitch]                                            | 0,641 – 1,5                                             |
| Время ротации трубки, с<br>[Tube rotation time, s]      | 0,5                                                     |
| Напряжение, кВ<br>[Voltage, kV]                         | 120                                                     |
| Толщина среза, мм<br>[Slice thickness, mm]              | 1                                                       |
| Сила тока на трубке, мАс<br>[Amperage on the tube, mAs] | Automatic Exposure Control system (AEC) (SURE Exposure) |

Этапы проведенного исследования включали:

– сбор данных о DLP и расчет индивидуальных эффективных доз облучения по каждому из всех КТ-исследований пациентов;

– формирование подвыборок по каждой анатомической области и в зависимости от использования КУ или без использования КУ;

– для каждой из сформированных подвыборок применение трех вышеописанных статистических методов для оценки СД.

<sup>8</sup> МУ 2.6.1.0066-12. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Применение референтных диагностических уровней для оптимизации радиационной защиты пациента в рентгенологических исследованиях общего назначения. Методические рекомендации (утв. Роспотребнадзором 23.07.2012). М., 2012. 12 с. [MR 2.6.1.0066-12. 2.6.1. Ionizing radiation, radiation safety. The use of reference diagnostic levels to optimize patient radiation protection in general-purpose X-ray examinations. Methodological recommendations (approved by Rosпотребнадзор on 07/23/2012). Moscow, 2012. 12 p. (In Russ.)].

При оценке стандартной эффективной дозы облучения ( $СД_{\text{eff}}$ ) за одно КТ-исследование для каждой анатомической области для однофазных и многофазных КТ при использовании методов 1 и 2 вычисляли медиану ( $Me[25\text{th}, 75\text{th}]$ , мЗв), при использовании метода 3 рассчитывали стандартную эффективную дозу для «стандартного» пациента с массой тела 70 кг с использованием программного обеспечения STATISTICA. Формирование групп и статистическая обработка данных проводились с помощью электронных таблиц редактора Excel Microsoft Office 10.

## Результаты

В таблице 4 сопоставлены стандартные дозы облучения ( $Me[25\text{th}, 75\text{th}]$ , мЗв), рассчитанные по методу 1 (по всей выборке – 4854 КТ-исследования) и по методу 2 (в группе пациентов с массой тела  $70 \pm 5$  кг – 1203 КТ-исследования) за одно КТ-исследование по всем анатомическим областям на КТ-томографе Canon Aquilion One 320 в 2024 г.

Таблица 4

**Стандартные дозы облучения пациентов ( $Me[25\text{th}, 75\text{th}]$ , мЗв) в группе по всей выборке (метод 1) и в группе пациентов с массой тела  $70 \pm 5$  кг (метод 2) за одно КТ-исследование по анатомическим областям в 2024 г. (на КТ-томографе Canon Aquilion One 320)**

[Table 4]

**Standard doses of radiation to patients ( $Me[25\text{th}, 75\text{th}]$ , mSv) in the group for the entire sample (method 1) and in the group of patients with body weight  $70 \pm 5$  kg (method 2) for one CT-study by anatomical regions in 2024 (on a Canon Aquilion One 320 CT-scanner)]**

| Анатомические области<br>[Anatomical areas]                                                         | Показатели<br>[Indicators]* | КТ без контрастного усиления<br>[non-contrast CT] |                       | КТ с контрастным усилением<br>[contrast-enhanced CT] |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                                                                     |                             | метод 1<br>[method 1]                             | метод 2<br>[method 2] | метод 1<br>[method 1]                                | метод 2<br>[method 2] |
|                                                                                                     |                             |                                                   |                       |                                                      |                       |
| 1. Голова<br>[Head]                                                                                 | $СД_{\text{eff}}$           | 1,6 [1,4; 2,3]                                    | 1,5 [1,4; 2,0]        | 3,3 [2,5; 4,4]                                       | 3,85 [2,8; 4,4]       |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $79,2 \pm 1,47$                                   | 70                    | $77,5 \pm 1,78$                                      | 70                    |
|                                                                                                     | N                           | 563                                               | 130                   | 89                                                   | 18                    |
| 2. Шея<br>[Neck]                                                                                    | $СД_{\text{eff}}$           | 1,95 [1,0; 4,0]                                   | 2,0                   | 6,36 [4,7; 10,6]                                     | 10,6 [8,6; 10,6]      |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $85,0 \pm 9,14$                                   | 70                    | $75,0 \pm 4,64$                                      | 70                    |
|                                                                                                     | N                           | 5                                                 | 1                     | 13                                                   | 3                     |
| 3. Органы грудной клетки<br>[Thorax]                                                                | $СД_{\text{eff}}$           | 3,3 [2,2; 5,2]                                    | 2,0 [1,7; 3,3]        | 10,7 [6,9; 14,5]                                     | 8,8 [5,3; 11,4]       |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $76,6 \pm 0,8$                                    | 70                    | $79,8 \pm 3,09$                                      | 70                    |
|                                                                                                     | N                           | 591                                               | 139                   | 62                                                   | 17                    |
| 4. Сердце и сосуды<br>[Heart and blood vessels]                                                     | $СД_{\text{eff}}$           | 4,0 [2,2; 5,0]                                    | 1,7 [1,1; 2,7]        | 8,0 [5,3; 12,7]                                      | 3,9 [3,1; 6,9]        |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $84,8 \pm 1,9$                                    | 70                    | $83,9 \pm 1,25$                                      | 70                    |
|                                                                                                     | N                           | 76                                                | 17                    | 267                                                  | 65                    |
| 5. Органы брюшной полости и забрюшинного пространства<br>[Abdomen and retroperitoneal space]        | $СД_{\text{eff}}$           | 7,8 [5,4; 12,8]                                   | 5,05 [4,3; 6,2]       | 21,7 [15,5; 32,0]                                    | 18,8 [15,0; 24,0]     |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $78,9 \pm 1,17$                                   | 70                    | $77,1 \pm 0,93$                                      | 70                    |
|                                                                                                     | N                           | 280                                               | 58                    | 431                                                  | 103                   |
| 7. Позвоночник и спинной мозг<br>[Spine and spinal cord]                                            | $СД_{\text{eff}}$           | 7,0 [4,1; 10,1]                                   | 5,3 [4,8; 7,2]        | 11,25                                                | –                     |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $78,4 \pm 1,4$                                    | 70                    | 60                                                   | –                     |
|                                                                                                     | N                           | 144                                               | 37                    | 1                                                    | –                     |
| 8. Кости, суставы и мягкие ткани конечностей<br>[Bones, joints and soft tissues of the extremities] | $СД_{\text{eff}}$           | 2,2 [0,4; 4,3]                                    | 2,65 [1,0; 3,7]       | –                                                    | –                     |
|                                                                                                     | $M \pm m$                   | $79,3 \pm 1,72$                                   | 70                    | –                                                    | –                     |
|                                                                                                     | N                           | 103                                               | 24                    | –                                                    | –                     |

| Анатомические области<br>[Anatomical areas]                                                                                              | Показатели<br>[Indicators]* | КТ без контрастного усиления<br>[non-contrast CT] |                | КТ с контрастным усилением<br>[contrast-enhanced CT] |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------|-------------------|
|                                                                                                                                          |                             | метод 1                                           | метод 2        | метод 1                                              | метод 2           |
|                                                                                                                                          |                             | [method 1]                                        | [method 2]     | [method 1]                                           | [method 2]        |
| 9. Органы грудной клетки, брюшной полости и забрюшинного пространства и таза<br>[Thorax, abdomen and retro-peritoneal space, and pelvis] | СД <sub>эфф</sub>           | 10,3 [7,0; 16,7]                                  | 6,3 [5,7; 7,3] | 23,0 [15,2; 28,6]                                    | 17,6 [12,9; 23,2] |
|                                                                                                                                          | M ± m                       | 77,8 ± 1,56                                       | 70             | 75,7 ± 0,34                                          | 70                |
|                                                                                                                                          | N                           | 162                                               | 38             | 2065                                                 | 551               |
| Всего [Total]                                                                                                                            | N                           | 1932                                              | 445            | 2922                                                 | 758               |

\* СД<sub>эфф</sub> – стандартная эффективная доза облучения (Me [25th, 75th], мЗв, метод 1 – оценка по всей выборке пациентов (4854 КТ-исследования), метод 2 – оценка по выборке пациентов с массой тела 70 ± 5 кг (1203 КТ-исследования)). М – среднее арифметическое значение массы тела пациентов; m – стандартная ошибка среднего арифметического значения, N – количество пациентов в группе. [SDeff – standard effective dose of radiation (Me [25th, 75th], mSv, method 1 – assessment for the entire sample of patients (4854 CT studies), method 2 – assessment for a sample of patients with body weight 70 ± 5 kg (1203 CT studies)). M is the arithmetic mean of the patients' body weight; m is the standard error of the arithmetic mean, N – is the number of patients in the group].

Для большинства анатомических областей (ОГК, ОБП, смежные области) стандартная доза, рассчитанная по методу 1 (пациенты из всей выборки, средняя масса тела от 75 до 85 кг), была выше, чем по методу 2 (отобранные из всей выборки пациенты с массой 70 ± 5 кг); различия между медианами стандартной дозы были статистически значимыми ( $p < 0,001$ ). Это может быть связано с тем, что в общей выборке средняя масса тела пациентов в 1,1 – 1,2 раза превышала стандартную. Для СД головы различия оказались на границе статистической значимости ( $p = 0,045$ ). Для областей Шея и Кости, суставы и мягкие ткани конечностей зависимости дозы облучения от массы тела пациента не выявлено.

С использованием статистического метода 3 были выполнены расчеты стандартных доз облучения пациентов, которым выполнялись КТ-исследования в 1, 3, 5 и 9 анатомических областях. Полученные модели линейной аппроксимации зависимости дозы облучения от массы тела пациентов для этих анатомических областей при КТ без КУ и КТ с КУ представлены на рисунке 1.

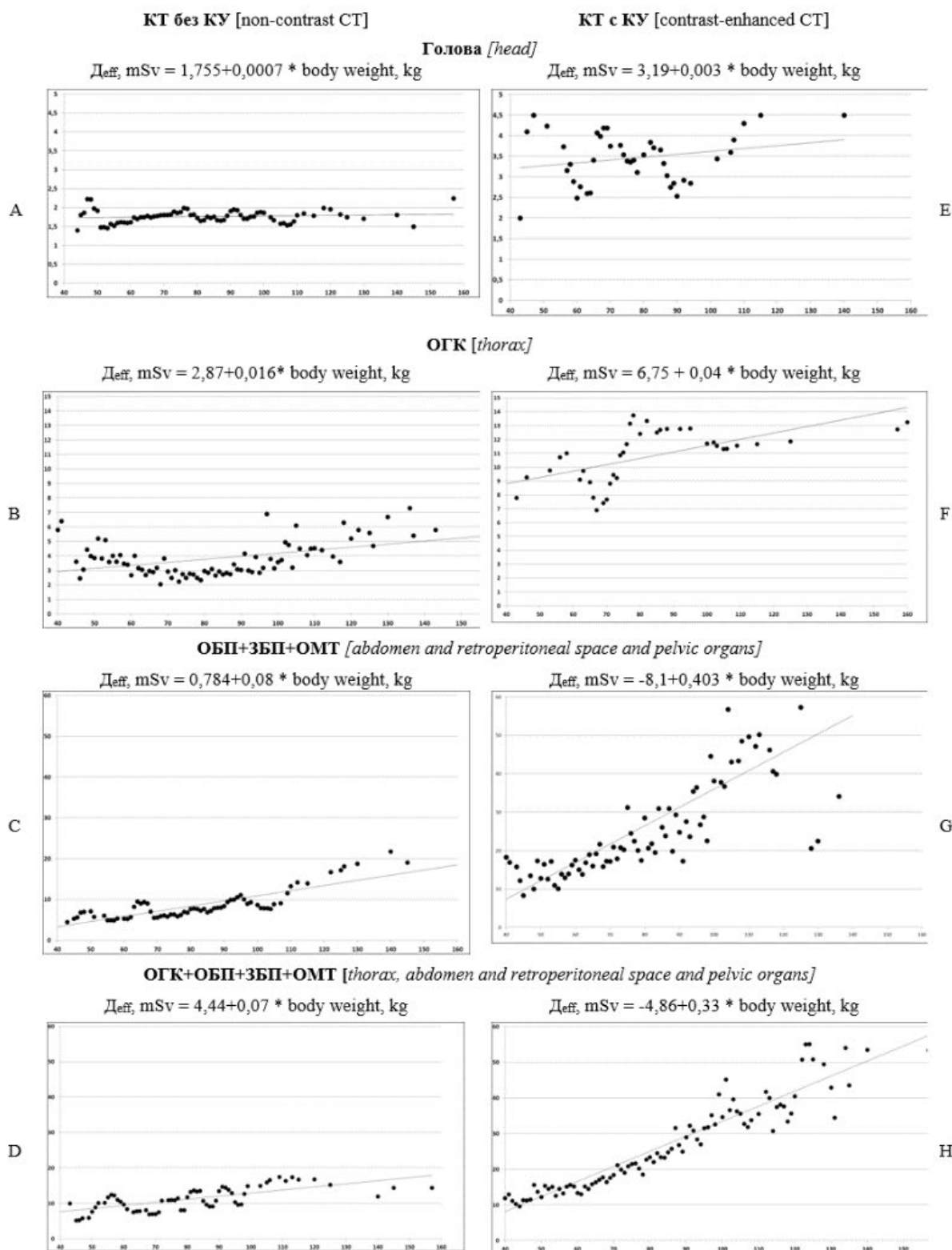
В таблице 5 представлены результаты, полученные при использовании трёх методов статистической оценки СД облучения пациентов за одно КТ-исследование по основным анатомическим областям. Как видно, при использовании метода 1 и метода 3 значения СД близки. Это обусловлено численным преобладанием в этих группах пациентов с массой тела выше 70 кг по сравнению с группой, в которой проводили оценку по методу 2. Как показано на рисунке 2, в общей выборке (метод 1) преобладали пациенты с массой тела от 75 до 85 кг. В связи с этим, медиана доз облучения, рассчитанная по методу 1, приближается к значениям, рассчитанным по методу 3 (по модели линейной аппроксимации).

Следует отметить, что при сравнении статистических методов 2 и 3, при которых, в отличие от метода 1, для оценки СД используется критерий «стандартного» пациента, установлено, что результаты оценок по методу 2 (с отбором пациентов с массой тела 70 ± 5 кг)

в 1,1–1,5 раза ниже, чем по методу 3 (с расчётом по модели линейной аппроксимации для пациента массой тела 70 кг). Так, значения СД при использовании методов 2 и 3 для наиболее протяженных смежных областей составили: при КТ без КУ для области 9 (ОГК, ОБП, ОМТ и таза) – 6,3 мЗв (метод 2) и 9,34 мЗв (метод 3), при КТ с КУ для области 5 (ОБП и ЗБП) – 18,8 мЗв (метод 2) и 20,11 мЗв (метод 3).

В связи с этим, при сравнениях СД в разных выборках пациентов целесообразно использовать один и тот же статистический метод: по отобранным пациентам с массой тела 70 ± 5 кг, если имеется не менее 20 пациентов с массой тела 70 ± 5 кг (метод 2), в противном случае – по всей выборке из не менее 50 пациентов (метод 1). Оценка СД с использованием линейной аппроксимации зависимости дозы от массы тела (метод 3) была выполнена, но из новых методических рекомендаций этот метод исключен.

При анализе данных таблицы 5, касающихся КТ с контрастным усилением, следует обратить внимание на следующий момент. В повседневной практике при первичных КТ используют 3–4 фазы, а при повторных сканированиях в целях снижения лучевой нагрузки на пациента иногда используют 2–3 фазы. В связи с этим, даже при более протяженной анатомической области сканирования 9 (органы грудной клетки, брюшной полости и забрюшинного пространства и таза) при среднем количестве фаз 2,8 доза облучения была несколько меньше (17,6 – 18,24 мЗв), чем при КТ менее протяженной анатомической области 5 (органы брюшной полости и забрюшинного пространства) (18,8 – 20,11 мЗв), так как для области 5 среднее количество фаз сканирования составляло 3,7. Это подтверждает положение о том, что оценку доз при КТ с контрастированием важно проводить за одну фазу, так как это позволяет устранить влияние вариабельности протоколов. Однако, к сожалению, в нашем лечебном учреждении до настоящего времени для КТ с КУ сохранялся дозовый отчет только за полное исследование.



**Рис. 1.** Модели линейной аппроксимации для зависимости эффективной дозы облучения ( $D_{eff}$ , mSv) от массы тела пациента при КТ без КУ (A,B,C,D) и при КТ с КУ (E,F,G,H) в 2024 г.; по оси абсцисс – масса тела пациента (кг); по оси ординат – эффективная доза (мЗв) за одно КТ-исследование

**[Fig. 1.** Linear approximation models for the dependence of the effective radiation dose ( $D_{eff}$ , mSv) on the patient's body weight for CT without CE (A, B, C, D) and for CT with CE (E, F, G, H) in 2024; the abscissa axis is the patient's body weight (kg); ordinate axis is effective dose (mSv) for one CT-examination]



Таблица 5

Сравнение методов оценки стандартной дозы облучения пациентов за одно КТ-исследование по анатомическим областям на КТ-томографе Canon Aquilion One 320

[Table 5]

Comparison of methods for assessing the effective dose of radiation to patients in a single CT-scan of anatomical areas on the Canon Aquilion One 320 CT-scanner]

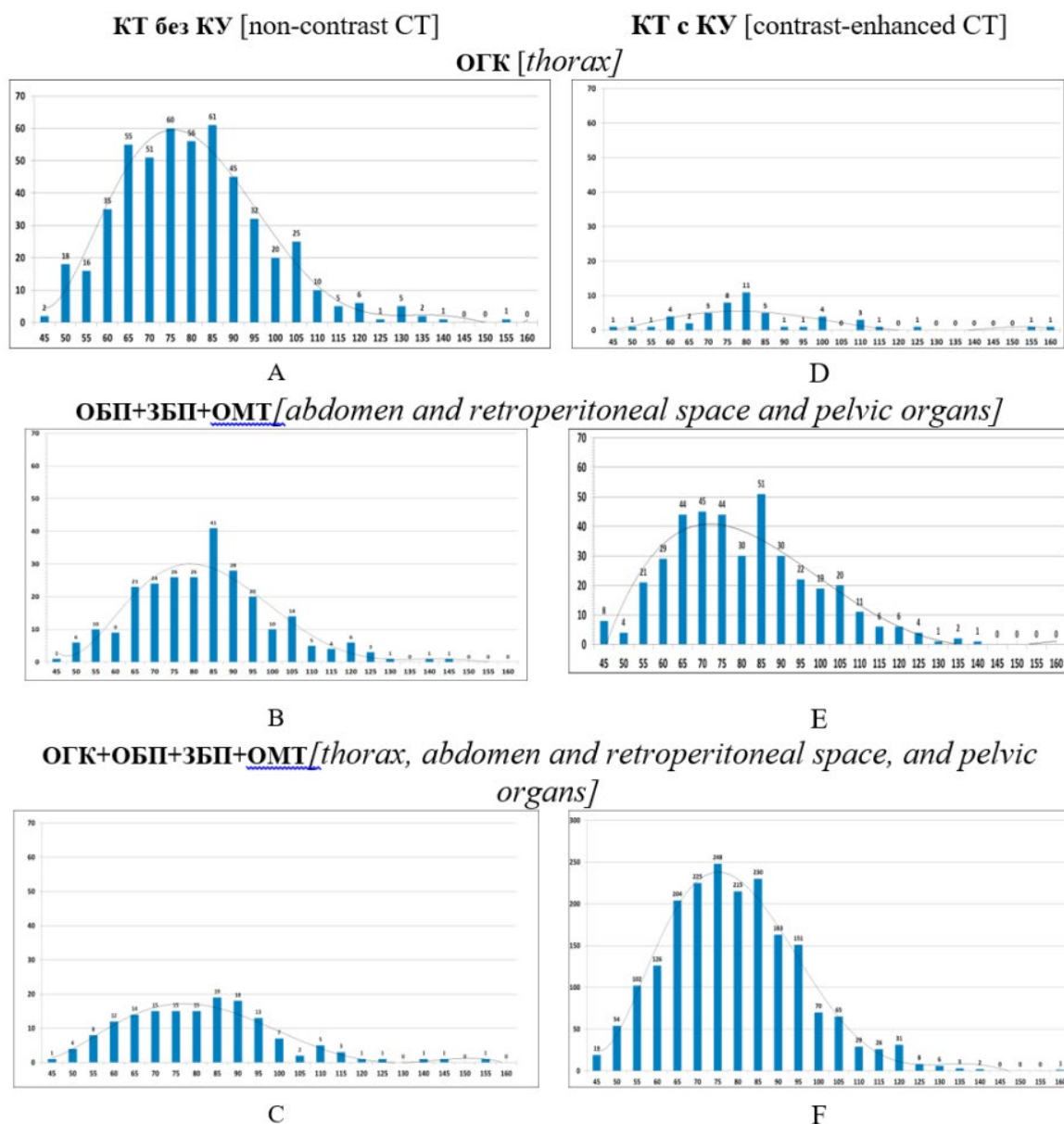
| Анатомические области<br>[Anatomical areas]                                                                                             | Показатели<br>[Indicators]* | КТ без контрастного усиления<br>[non-contrast CT] |                                                |                                                                      |                                     | КТ с контрастным усилением<br>[contrast-enhanced CT] |                                                |                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                         |                             | Метод 1<br>(Медиана по всей выборке)**            | Метод 2<br>(Медиана по выборке 70 ± 5 кг)***   | Метод 3<br>(по всей выборке по модели аппроксимации для 70 кг)****   | Среднее количество фаз сканирования | Метод 1<br>(Медиана по всей выборке)**               | Метод 2<br>(Медиана по выборке 70 ± 5 кг)***   | Метод 3<br>(по всей выборке для 70 кг)****                          |
|                                                                                                                                         |                             | [Method 1 (Median for the entire sample)**]       | [Method 2 (Median of the sample 70 ± 5 kg)***] | [Method 3 (for the entire approximation model sample for 70 kg)****] |                                     | [Method 1 (Median for the entire sample)**]          | [Method 2 (Median of the sample 70 ± 5 kg)***] | Method 3 (for the entire approximation model sample for 70 kg)****] |
| 1. Голова<br>[Head]                                                                                                                     | СД <sub>eff</sub>           | 1,6<br>[1,4; 2,3]                                 | 1,5<br>[1,4; 2,0]                              | 1,81                                                                 | 2,1                                 | 3,3<br>[2,5; 4,4]                                    | 3,85<br>[2,8; 4,4]                             | 3,4                                                                 |
|                                                                                                                                         | M ± m                       | 79,2 ± 1,47                                       | 70                                             | 79,2 ± 1,47                                                          |                                     | 77,5 ± 1,78                                          | 70                                             | 77,5 ± 1,78                                                         |
|                                                                                                                                         | N                           | 563                                               | 130                                            | 563                                                                  |                                     | 89                                                   | 18                                             | 89                                                                  |
| 3. Органы грудной клетки<br>[Thorax]                                                                                                    | СД <sub>eff</sub>           | 3,3<br>[2,2; 5,2]                                 | 2,0<br>[1,7; 3,3]                              | 3,99                                                                 | 2,3                                 | 10,7<br>[6,9; 14,5]                                  | 8,8<br>[5,3; 11,4]                             | 9,55                                                                |
|                                                                                                                                         | M ± m                       | 76,6 ± 0,8                                        | 70                                             | 76,6 ± 0,8                                                           |                                     | 79,8 ± 3,09                                          | 70                                             | 79,8 ± 3,09                                                         |
|                                                                                                                                         | N                           | 591                                               | 139                                            | 591                                                                  |                                     | 62                                                   | 17                                             | 62                                                                  |
| 5. Органы брюшной полости и забрюшинного пространства<br>[Abdomen and retroperitoneal space]                                            | СД <sub>eff</sub>           | 7,8<br>[5,4; 12,8]                                | 5,05<br>[4,3; 6,2]                             | 6,38                                                                 | 3,7                                 | 21,7<br>[15,5; 32,0]                                 | 18,8<br>[15,0; 24,0]                           | 20,11                                                               |
|                                                                                                                                         | M ± m                       | 78,9 ± 1,17                                       | 70                                             | 78,9 ± 1,17                                                          |                                     | 77,1 ± 0,93                                          | 70                                             | 77,1 ± 0,93                                                         |
|                                                                                                                                         | N                           | 280                                               | 58                                             | 280                                                                  |                                     | 431                                                  | 103                                            | 431                                                                 |
| 9. Органы грудной клетки, брюшной полости и забрюшинного пространства и таза<br>[Thorax, abdomen and retroperitoneal space, and pelvis] | СД <sub>eff</sub>           | 10,3<br>[7,0; 16,7]                               | 6,3<br>[5,7; 7,3]                              | 9,34                                                                 | 2,8                                 | 23,0<br>[15,2; 28,6]                                 | 17,6<br>[12,9; 23,2]                           | 18,24                                                               |
|                                                                                                                                         | M ± m                       | 77,8 ± 1,56                                       | 70                                             | 77,8 ± 1,56                                                          |                                     | 75,7 ± 0,34                                          | 70                                             | 75,7 ± 0,34                                                         |
|                                                                                                                                         | N                           | 162                                               | 38                                             | 162                                                                  |                                     | 2056                                                 | 551                                            | 2056                                                                |

\* М – среднее арифметическое значение массы тела пациентов; m – стандартная ошибка среднего арифметического значения [M is the arithmetic mean of the patients' body weight; m is the standard error of the arithmetic mean]; N – количество пациентов в группе [N – is the number of patients in the group].

\*\* метод 1 – оценка стандартной эффективной дозы облучения пациентов Me [25th, 75th], мЗв, по всей выборке пациентов для данной анатомической области; [\* – method 1 – estimation of the standard effective radiation dose of patients Me [25th, 75th], mSv, for the entire patient sample for a given anatomical area].

\*\*\*метод 2 – оценка стандартной эффективной дозы облучения пациентов Me [25th, 75th] (мЗв) по выборке пациентов массой 70 ± 5 кг для данной анатомической области; [method 2 – estimation of the standard effective radiation dose in patients with Me [25th, 75th], mSv, from a sample of patients weighing 70 ± 5 kg for a given anatomical area].

\*\*\*\* метод 3 – оценка стандартной эффективной дозы облучения пациентов, мЗв по всей выборке пациентов данной анатомической области, вычисленной по модели аппроксимации  $CD_{eff} = a + bX$ , где  $CD_{eff}$  – стандартная эффективная доза, мЗв, рассчитанная методом аппроксимации для пациента массой 70 кг; [method 3 – assessment of the standard effective radiation dose of patients, mSv, for the entire sample of patients in this anatomical area, calculated using the approximation model  $CD_{eff} = a + bX$ , where  $CD_{eff}$  is the standard effective dose, mSv, calculated by interpolation for a patient weighing 70 kg].



**Рис. 2.** Распределение пациентов с разной массой тела и линия тренда этого распределения в общей выборке пациентов при КТ без КУ (А,В,С) и КТ с КУ (D,E,F) на КТ-томографе Canon Aquilion One 320 в 2024 г.

По оси абсцисс – масса тела пациентов (кг); по оси ординат – количество пациентов

**[Fig. 2.** Distribution of patients with different body weights and the trend line of this distribution in the general sample of patients in CT without CE (A,B,C) and CT with CE (D,E,F) on the Canon Aquilion One 320 CT-scanner in 2024.

On the abscissa axis is the patients' body weight (kg); on the ordinate axis is the number of patients]

### Обсуждение

Известно, что дозовые параметры облучения пациентов при КТ одной и той же области подвержены большой вариативности, это затрудняет их корректное сопоставление. Так, в обзорном исследовании [12] была отмечена двух-трёх-кратная разница в значениях DRLs между исследованиями для одной и той же процедуры.

В связи с этим, в качестве критерия оценки дозы облучения пациентов в разных медицинских организациях широко используется стандартная доза. Однако при её расчетах могут применяться разные статистические методы. Так, в ICRP Publication 135 «Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging» [3] указано, что DRLs должны

быть стандартизованы, т.е. приведены, насколько это возможно, для «пациента стандартного размера» для каждого рассматриваемого типа КТ-исследования в типичном режиме работы данного рентгеновского аппарата с типичным протоколом её выполнения».

В соответствии с новыми Методическими рекомендациями МР 2.6.1.0296-22 при расчете СД для рентгенорадиологического исследования и/или процедуры оценивается среднее значение выбранной дозовой характеристики для выборки пациентов при проведении рентгенорадиологического исследования и/или процедуры в типовом режиме работы аппарата для рентгеновской диагностики с типовым протоколом его выполнения. При этом для определения СД пациентов для каждого рентгенорадиологического исследования сбор данных

проводится по 20 «стандартным» пациентам по каждой возрастной группе. При отсутствии сведений об антропометрических параметрах пациентов в анкеты заносят параметры проведения исследований для 50 пациентов без учета их массы тела и роста. При этом указано, что при оценке СД приоритетным параметром является масса тела пациента.

Рассмотренные нами статистические методы 1 и 2 соответствуют рекомендованным, однако в наших выборках не учитывались рост и размеры торса, так как в реальной клинической практике это трудно выполнимо в связи с тем, что эти параметры не заносятся в информационную базу отделений лучевой диагностики.

Следует отметить, что в части ситуаций для расчета СД достаточно методов 1 и 2. Однако, если строго руководствоваться МР 2.6.1.0296-22, то в одних ситуациях для расчета СД при КТ применим метод 1 (когда количество КТ-исследований по каждой анализируемой анатомической области 50 и более), в других ситуациях применим метод 2 (когда есть возможность для КТ анализируемой анатомической области отобрать «стандартных» пациентов с массой тела  $70 \text{ кг} \pm 10 \%$  (64–78 кг). Но остается непонятным: как считать СД в часто встречаемых, особенно в небольших ЛПУ, ситуациях, когда по каждой анализируемой анатомической области количество КТ-исследований менее 50, а количество КТ-исследований пациентов с массой тела  $70 \text{ кг} \pm 10 \%$  (64–78 кг) менее 20? В этом случае, по нашему мнению, было бы возможно применять метод 3, приведенный в предшествующей версии методических рекомендаций МР 2.6.1.0066-12.

Вычисление СД с использованием в качестве статистического критерия метода линейной аппроксимации (метод 3) выполнено по аналогии с другим исследованием [8], а также с методикой, изложенной в предшествующей версии Методических рекомендаций МР 2.6.1.0066-12. Как установлено в данном исследовании, результаты оценки СД по методу 3 близки к медианным значениям СД по общей выборке (метод 1), поэтому метод 3, по нашему мнению, при больших выборках (более 50 пациентов) может дублировать метод 1, так как чем больше в выборке пациентов с массой тела выше 70 кг, тем СД больше приближается к средней дозе по этой выборке.

В нашем исследовании мы рассмотрели результаты применения метода 3, учитывая следующие моменты:

1) нередко при малочисленности групп пациентов нет возможности отобрать 20 и более пациентов с массой тела  $70 \text{ кг} \pm 10 \%$  (64–78 кг), тем более в настоящее время при современной тенденции у населения страны к увеличению средней массы тела до 75–85 кг; поэтому использование метода 3 (основанного на разработке моделей линейной аппроксимации дозы для каждой анатомической области) позволяет получить оценку СД приближающуюся к «стандартному» пациенту с массой тела  $70 \text{ кг} \pm 10 \%$  (64–78 кг), с опорой на выборки менее 50 КТ-исследований для каждой анатомической области;

2) при невозможности отобрать 20 и более пациентов с массой тела  $70 \text{ кг} \pm 10 \%$  (64–78 кг), в общей группе с числом пациентов менее 50 метод 3 позволяет сопоставлять результаты оценки СД с аналогичными литературными данными и с рекомендациями МКРЗ, в которых часто приводится эффективная доза облучения для «стандартного» пациента массой  $70 \pm 3 \text{ кг}$ .

Следует уточнить, что при малых выборках КТ-исследований при расчетах СД будут увеличиваться неопределенности (погрешности) в расчетах СД при всех трёх использованных статистических методах. В связи с этим, представляется необходимым проведение дополнительных исследований по сопоставлению результатов статистической оценки СД с использованием методов 1, 2 и 3 применительно к малым выборкам, учитывая увеличение погрешности оценок при уменьшении количества КТ-исследований в выборке.

Оценка РДУ по Москве была проведена в работе [13], но в ней отражены только дозы при рентгенографических исследованиях. В исследовании [14] обобщен опыт формирования региональных РДУ для КТ-исследований преимущественно в шести регионах России (города Москва, Санкт-Петербург, Дмитровград, Озерск, а также области Белгородская и Ленинградская). По этим данным значения РДУ в величинах DLP и эффективной дозы для одnofазных КТ-исследований или одной фазы многофазных КТ-исследований составили: голова – 1200 мГр·см (2 мЗв), органы грудной клетки – 500 мГр·см (6 мЗв), органы брюшной полости – 800 мГр·см (11 мЗв), органы малого таза – 900 мГр·см (13 мЗв). Вычисленные в нашем исследовании по статистическим методам 1, 2 и 3 СД при КТ-исследованиях основных анатомических зон для КТ-томографа Canon Aquilion One 320 ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ниже этих значений и значений по МУК 2.6.7.3652-20 для головы в 1,1-1,3 раза, для ОГК в 1,5-3 раза, для ОБП в 1,4-2,2 раза.

Установленные в нашем исследовании стандартные эффективные дозы облучения пациентов при КТ разных областей тела близки к европейским стандартам [15] и могут быть использованы в последующем для расчета РДУ при КТ-исследованиях в медицинских учреждениях ФМБА России.

## Заключение

Важность корректного вычисления СД в медицинских организациях определяется растущим уровнем применения ионизирующего излучения в медицинской диагностике, а также неприменением принципа нормирования в медицинском облучении пациентов. Значения СД используются для установления РДУ, которые являются не нормативом, а референтным значением при внутреннем (в рентгеновском отделении центра лучевой диагностики) контроле качества проведения этих процедур.

В настоящем исследовании представлены и проанализированы три метода оценки СД при КТ-исследованиях без КУ и с КУ. Результаты свидетельствуют о том, что корректность оценки и сопоставления таких СД зависит от единообразия методических подходов к их расчетам. При использовании одного и того же статистического метода такая оценка будет в полной мере соответствовать задачам контроля за условиями облучения пациентов и при необходимости оптимизации этих условий.

В связи с этим, в практическом аспекте при проведении внутреннего контроля доз в медицинской организации врачам-рентгенологам при оценке СД наиболее оптимально использовать статистические методы расчетов по выборке из не менее 20 пациентов со стандартной массой тела, как указано в МР 2.6.1.0296-22. Расчеты СД

в разные годы или на разных КТ-томографах следует проводить по одному и тому же статистическому методу. Эти положения применяются в отделении лучевой диагностики ФМБЦ им. А.И. Бурназяна при регулярной оценке СД и сопоставлении их с РДУ для всех исследуемых анатомических областей в целях постоянного контроля за дозами облучения пациентов.

#### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Маткевич Е.И. – разработка дизайна исследования, определение цели и задач, оформление таблиц и иллюстраций, подготовка промежуточного и окончательного варианта рукописи.

Сивенков А.Г. – статистическая обработка результатов, подготовка иллюстраций.

Башков А.Н. – редакция промежуточного варианта рукописи.

Самойлов А.С. – определение направления исследований, редакция окончательного варианта рукописи.

#### Благодарности

Авторы благодарят профессора А.Ю. Бушманова за методическую помощь при проведении исследования, рецензентов – за подробный анализ материалов рукописи и высокопрофессиональные рекомендации по её доработке.

#### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### Литература

- Водоватов А.В. Практическая реализация концепции референтных диагностических уровней для оптимизации защиты пациентов при проведении стандартных рентгенографических исследований // Радиационная гигиена. 2017. Т. 10, № 1. С. 47-55.
- Стадник Л.Л., Шалеева О.Ю., Носик О.В. Оценка доз пациентов в рентгенографии и их оптимизация путем установления национальных диагностических рекомендованных уровней // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 4. С. 84-88.
- Vañó E., Miller D.L., Martin C.J. et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. SAGE Journals. 2017; 46(1). 144 p. DOI: 10.1177/0146645317717209.
- Публикация МКРЗ 105. Радиационная защита в медицине. Ред. русского перевода М.И. Балонова. СПб: ФБУН НИИРГ, 2011. 66 с.
- Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Водоватов А.В. и др. Разработка и применение референсных диагностических уровней для взрослых пациентов в лучевой диагностике // Медицинская физика. 2022. Т. 93, № 1. С. 81-96. DOI: 10.52775/1810-200X-2022-93-1-81-96.
- Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В. и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. Том 1. Лучевая диагностика: Монография, пособия. Под ред. проф. М.И. Балонова. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2019. Т.1. 320 с.
- Акопова Н.А., Иванов С.И., Охрименко С.Е. Оптимизация доз облучения пациентов при проведении рентгенодиагностических исследований // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. Т. 61, № 4. С. 48-51.
- Маткевич Е.И., Синицын В.Е., Иванов И.В. Обоснование нового подхода к критериям оценки дозы облучения пациентов при компьютерной томографии // Digital Diagnostics. 2022. Т. 3, № 4. С. 344-361. DOI: 10.17816/DD110857.
- Brat H., Zanca F., Montandon S. et al. Local clinical diagnostic reference levels for chest and abdomen CT-examinations in adults as a function of body mass index and clinical indication: A prospective multicenter study // European Radiology. 2019. Vol. 29, No 12. P. 6794-6804. DOI: 10.1007/s00330-019-06257-x.
- Li X., Steigerwalt D., Rehani M. T-shirt size as a classification for body habitus in computed tomography (CT) and development of sizebased dose reference levels for different indications // European Journal of Radiology. 2022. Vol. 151, No 3. P. 110289. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110289.
- ICRP Publication 89. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. A report of age- and gender-related differences in the anatomical and physiological characteristics of reference individuals // Annals of the ICRP. 2002. Vol. 32, No (3-4). P. 5-265. PMID: 14506981.
- Garba I., Zarb F., McEntee M.F., Fabri S.G. Computed tomography diagnostic reference levels for adult brain, chest and abdominal examinations: A systematic review // Radiography. 2021. Vol. 27, No 2. P. 673-681. DOI: 10.1016/j.radi.2020.08.011.
- Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Толкачев К.В. и др. Референтные диагностические уровни при проведении рентгенографических исследований в г. Москве // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 103-113. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-103-113.
- Дружинина П.С., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Романович И.К. Перспективы установления референтных диагностических уровней для КТ в Российской Федерации. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Современные проблемы эпидемиологии, микробиологии и гигиены». Ростов-на-Дону, 21-22 октября 2020 года. Ростов н/Д., 2020. С. 158-160.
- Bongartz G., Golding S.J., Jurik A.G. et al. European guidelines on quality criteria for computed tomography. Report EUR 16262. Belgium: European Commission. 2004. 114 p.

Поступила: 11.04.2025

**Маткевич Елена Ивановна** – кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, заведующая отделением МРТ-диагностики Центра лучевой диагностики Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 123098, Россия, Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23; E-mail: ei.matkevich@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7729-2724

**Сивенков Александр Геннадиевич** – инженер лаборатории № 25 (лаборатория радиационно-гигиенических исследований) отдела ионизирующих и неионизирующих излучений Центра специальных исследований Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-7980-7680



**Башков Андрей Николаевич** – кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог, заведующий Центром лучевой диагностики Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-4560-6415

**Самойлов Александр Сергеевич** – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, генеральный директор Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-9241-7238

**Для цитирования:** Маткевич Е.И., Сивенков А.Г., Башков А.Н., Самойлов А.С. Анализ методов статистической оценки стандартных доз облучения пациентов при компьютерной томографии в Федеральном медицинском биофизическом центре им. А.И. Бурназяна // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 16–28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-16-28

## Analysis of statistical methods for estimating standard radiation doses for patients undergoing computed tomography at the A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center

Elena I. Matkevich, Alexander G. Sivenkov, Andrey N. Bashkov, Alexander S. Samoylov

State Research Center – Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

*This study compares standard radiation dose estimates for patients undergoing computed tomography (CT) of major anatomical regions at the A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center using three different statistical approaches. A total of 4,854 CT examinations performed in 2024 were analyzed. For most anatomical regions, the standard dose calculated using Method 1 (entire patient cohort with an average body weight of 76–85 kg) was significantly higher than that obtained using Method 2 (patients selected with a body weight of  $70 \pm 5$  kg), with statistically significant differences ( $p < 0.001$ ). Comparison of doses calculated by Method 1 and Method 3 (linear regression modeling based on the entire cohort to estimate the dose for a "standard" 70 kg patient) revealed similar values, reflecting the influence of the overall weight distribution on the final dose estimates. When comparing Method 2 and Method 3—both applied to estimate the dose for a "standard" patient—it was found that Method 2 yielded lower values, with differences ranging from 1.1 to 1.5 folds. For example, for the most extensive combined anatomical regions, the effective dose per a non-contrast study was 6.3 mSv (Method 2) and 9.34 mSv (Method 3), and for the contrast-enhanced CT of the abdominal and retroperitoneal organs, 18.8 mSv (Method 2) and 20.11 mSv (Method 3). Conclusion: The application of three statistical methods for assessing standard effective radiation doses in CT was analyzed. The accuracy and comparability of standard dose estimates for the purpose of exposure control depend on the consistency of methodological approaches used to determine the need for dose optimization.*

**Key words:** ionizing radiation, radiation diagnostics, computed tomography, radiation doses, standard radiation doses, statistical methods of assessment, small samples.

### Authors' personal contribution

Elena I. Matkevich development of the study design, defined the goals and objectives, design of tables and illustrations, preparation of the intermediate and final version of the manuscript.

Alexander G. Sivenkov conducted statistical processing and prepared illustrations.

Andrey N. Bashkov prepared draft of the manuscript.

Alexander S. Samoylov – determination of the direction of the research, editing of the final version of the manuscript.

### Acknowledgments

The authors thank Professor A.Yu. Bushmanov for methodological support during the study, and the reviewers for their detailed analysis of the manuscript and their highly professional recommendations for its improvement.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsorship.

**Elena I. Matkevich**

Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency

**Address for correspondence:** Marshal Novikov Str., 23, Moscow, 123098, Russia; E-mail: ei.matkevich@yandex.ru



## References

- Vodovатов AV. Practical implementation of the concept of diagnostic reference levels to optimize patient protection during standard radiographic examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 47-55. (In Russian).
- Stadnik LL, Shalepa OYu, Nosik OV. Assessment of patient doses in radiography and their optimization by establishing determining national diagnostic reference levels. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2014;7(4): 84-88. (In Russian).
- Vañó E, Miller DL, Martin CJ, Rehani MM, Kang K, Rosenstein M, et al. ICRP Publication 135: Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. *SAGE Journals*. 2017;46(1): 144. DOI: 10.1177/0146645317717209.
- ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. Ed. Russian translation by MI Balonov. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. PV Ramzaev; 2011. 66 p. (In Russian).
- Druzhinina YuV, Lantukh ZA, Vodovатов AV, Morozov SP, Ryzhov SA, Sokolov EN, et al. Development and Application of Diagnostic Reference Levels for Adult Patients in Diagnostic Radiology. *Meditsinskaya Fizika = Medical Physics*. 2022;93(1): 81-96. DOI: 10.52775/1810-200X-2022-93-1-81-96. (In Russian).
- Balonov MI, Golikov VYu, Vodovатов AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Kalnitsky SA, et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Vol.1. Diagnostic radiology: Monograph, manuals. Ed. by Prof. MI Balonov. St. Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Prof. PV Ramzaev; 2019. 320 p. (In Russian).
- Akopova NA, Ivanov SI, Okhrimenko SE. Optimization of radiation doses to patients during X-ray diagnostic examinations. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical radiology and radiation safety*. 2016;61(4): 48-51. (In Russian).
- Matkevich EI, Sinitsyn VE, Ivanov IV. Substantiation of a new approach to the criteria for assessing the radiation dose of patients during computed tomography. *Digital Diagnostics*. 2022;3(4): 344–361. DOI: 10.17816/DD110857.
- Brat H, Zanca F, Montandon S, Racine D, Rizk B, Meicher E, et al. Local clinical diagnostic reference levels for chest and abdomen CT-examinations in adults as a function of body mass index and clinical indication: A prospective multicenter study. *European Radiology*. 2019;29(12): 6794–6804. DOI: 10.1007/s00330-019-06257-x.
- Li X, Steigerwalt D, Rehani M. T-shirt size as a classification for body habitus in computed tomography (CT) and development of sizebased dose reference levels for different indications. *European Journal of Radiology*. 2022;151(3): 110289. DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110289.
- ICRP Publication 89. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values. A report of age- and gender-related differences in the anatomical and physiological characteristics of reference individuals. *Annals of the ICRP*. 2002;32(3-4): 5-265. PMID: 14506981.
- Garba I, Zarb F, McEntee MF, Fabri SG. Computed tomography diagnostic reference levels for adult brain, chest and abdominal examinations: A systematic review. *Radiography*. 2021;27(2): 673–681. DOI: 10.1016/j.radi.2020.08.011/.
- Druzhinina YuV, Lantukh ZA, Tolkachev KV, Soldatov IV, Shatenok MP, Vodovатов AV, et al. Diagnostic reference levels of the city of Moscow during X-ray examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 103-113. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-103-113. (In Russian).
- Druzhinina PS, Chipiga LA, Vodovатов AV, Romanovich IK. Prospects for establishing reference diagnostic levels for CT in the Russian Federation. Collection of reports and abstracts of the scientific and practical. conf. "Modern problems of epidemiology, microbiology and hygiene", Rostov-on-Don, October 21-22, 2020. Rostov-on-Don; 2020. P. 158-160. (In Russian).
- Bongartz G, Golding SJ, Jurik AG, Leonardi M, Meerten EVP, Geleijns J, et al. European guidelines on quality criteria for computed tomography. Report EUR 16262. Belgium: European Commission; 2004. 114 p.

Received: April 11, 2025

**For correspondence: Elena I. Matkevich** – Candidate of Medical Sciences, Radiologist, Head of the Department of MRI Diagnostics of the Radiology Center based on State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency (Marshal Novikov Str., 23, Moscow, 123098, Russia; E-mail: ei.matkevich@yandex.ru)

ORCID: 0000-0001-7729-2724

**Alexander G. Sivenkov** – Engineer of Laboratory No. 25 (Laboratory of Radiation and Hygienic research) of the Department of Ionizing and non-ionizing Radiation on State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-7980-7680

**Andrey N. Bashkov** – Candidate of Medical Sciences, Radiologist, Head of the Radiology Center based on State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-4560-6415

**Alexander S. Samoylov** – Doctor of Medical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director General of State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-9241-7238

**For citation: Matkevich E.I., Sivenkov A.G., Bashkov A.N., Samoylov A.S. Analysis of statistical methods for estimating standard radiation doses for patients undergoing computed tomography at the A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No 2. P. 16–28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-16-28.**

## Анализ влияния медико-демографических показателей российской популяции на значения радиационного риска по модели МКРЗ

Косарлукова Е.А., Репин Л.В., Библин А.М., Ахматдинов Рустам Р.

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

*Основной величиной, используемой для контроля уровней облучения населения и персонала радиационных объектов, является индивидуальная эффективная доза. Указанный показатель позволяет учитывать различия в радиочувствительности отдельных органов и тканей, за счет использования соответствующих взвешивающих тканевых множителей, рекомендованных МКРЗ и рассчитанных с использованием медико-демографических показателей двух искусственно сформированных популяций — «евро-американской» и «азиатской». Значения относительного вреда, рассчитанные на основании полученных оценок риска, послужили основой для установления рекомендованных значений взвешивающих множителей для органов и тканей. Между тем, использование эффективной дозы в качестве меры риска при неравномерном облучении в конкретных популяциях ставит вопрос о целесообразности использования при ее расчете альтернативных значений взвешивающих множителей для органов и тканей, позволяющих более математически строго учесть различия в их относительной радиочувствительности. Цель исследования: оценка того, обеспечивают ли рекомендованные значения коэффициентов номинального риска и взвешивающих множителей для органов и тканей сопоставимый уровень безопасности для российской популяции по сравнению с тем, который обеспечивается для номинальной популяции МКРЗ. Материалы и методы: Оценка радиационного риска развития онкологических заболеваний проведена с использованием российских медико-демографических данных за период с 1993 по 2022 гг. по модели межпопуляционного переноса радиационного риска Публикации 152 МКРЗ. Результаты исследования и обсуждение: Результаты расчета показывают, что оценки риска в российской популяции для большинства органов и тканей постепенно увеличиваются для мужчин на протяжении 30 лет, при этом, за исключением риска развития рака щитовидной железы у женщин, не превосходят аналогичных значений, использованных при установлении значений взвешивающих множителей. Заключение. Применяемая в настоящее время система показателей риска и пределов дозы обеспечивает достаточный уровень защиты российской популяции и не требует изменения до пересмотра международных подходов к обеспечению радиационной защиты.*

**Ключевые слова:** злокачественные новообразования, эффективная доза, коэффициенты радиационного риска, номинальная популяция, радиационный ущерб, популяционный риск.

### Введение

Применение эффективной дозы в качестве меры радиационного риска для здоровья предполагает использование двух наборов величин: линейных коэффициентов радиационного ущерба (в НРБ-99/2009 – коэффициенты радиационного риска) для различных половозрастных групп населения и взвешивающих множителей для органов и тканей, позволяющих учитывать различия в относительной радиочувствительности органов, тканей и систем организма при экспозиции одинаковой органной дозой.

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) в Публикации 103 [1] рекомендовала к использованию в системе радиационной защиты линейные коэффициенты радиационного ущерба для двух различных по половозрастному составу групп («все население» и «лица трудоспособного возраста») и единый набор взвешивающих множителей для органов и тканей, не зависящих от пола и возраста облученных лиц.

Подобный подход представляется оправданным для целей контроля уровней облучения населения и персонала радиационных объектов в условиях их нормальной эксплуатации. Математическая строгость расчета всех указанных коэффициентов и множителей принесена в жертву удобству и простоте методики, что кажется вполне оправданным при решении задач в диапазоне малых и очень малых доз облучения. Важно отметить также, что основное назначение разработанной МКРЗ методики – обоснование пределов доз облучения в системе радиационной защиты и сравнение рисков при неравномерной геометрии облучения, а значительное число неопределенностей, присущих методике, ограничивает сферу возможного применения оценок риска, полученных с ее использованием. Несмотря на данное обстоятельство эффективная доза оказалась настолько удобной величиной, что на практике стала применяться даже при решении задач, для которых она не была изначально предназначена.

Указанный метод позволяет произвести расчет риска развития радиационно-индуцированных злокачественных ново-

**Репин Леонид 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: leonid\_repin@mail.ru

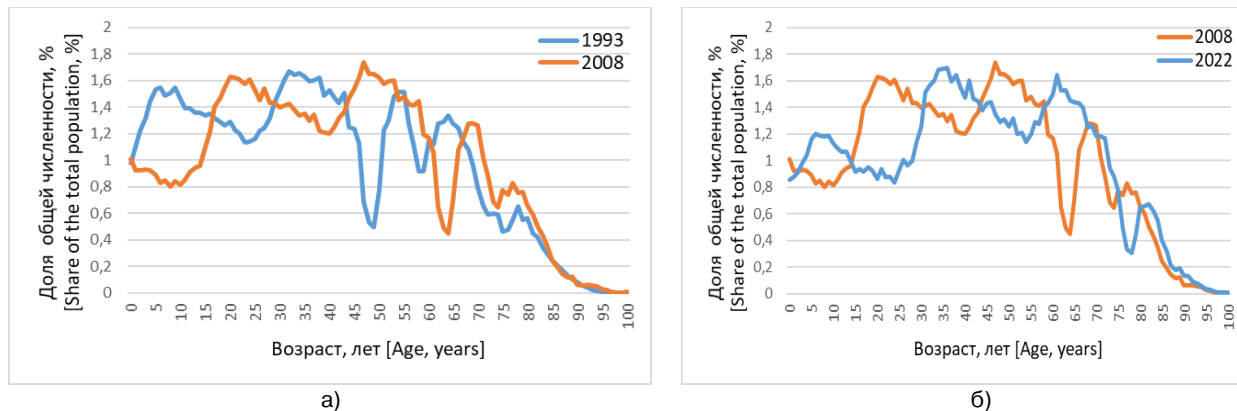
образований (ЗНО) в зависимости от пола и возраста облученного лица, дозы облучения и достигнутого возраста. Расчет осуществляется по моделям абсолютного и относительного риска, после чего полученные оценки взвешиваются между собой. Далее, на основании полученных значений для лиц конкретного пола и возраста на момент облучения, можно рассчитать значения различных показателей пожизненного радиационного риска, после чего рассчитать популяционные риски, учитывающие вклад лиц различного пола и возраста в ту или иную половозрастную группу населения. Отметим, что МКРЗ произвела расчеты коэффициентов риска и тканевых взвешивающих множителей для искусственно сформированной популяции, так называемой «номинальной популяции», путем усреднения результатов расчетов, полученных для «азиатской» и «евро-американской» популяций [2]. Именно расчеты для номинальной популяции МКРЗ легли в основу современной системы радиационной защиты. При этом методика МКРЗ для межпопуляционного переноса радиационного риска позволяет производить собственные расчеты с использованием данных реально существующих («национальных») популяций [3–5]. С учетом большого числа неопределенностей, присущих такому методу, результаты подобных расчетов не следует воспринимать как основу для прогнозной оценки рисков в диапазоне малых доз облучения, однако результаты подобных оценок уместно использовать при решении задач по реализации принципов обоснования и оптимизации радиационной защиты как более математически строгие по сравнению с использованием данных номинальной популяции. В рамках настоящего исследования были использованы российские медико-демографические данные за период 30 лет (с 1993 по 2022 гг.) при выполнении оценки риска по методике МКРЗ.

**Цель исследования** заключалась в оценке того, обеспечивает ли современная система радиационной защиты сопоставимый уровень безопасности для российской популяции по сравнению с тем, который обеспечивается для номинальной популяции МКРЗ.

### Материалы и методы

За основу расчета взята методика, изложенная в Публикации 152 МКРЗ [2]. Однако вместо приведенных в приложении А названной публикации медико-демографических данных азиатской и евро-американской популяций МКРЗ были использованы данные об уровнях половозрастной онкологической заболеваемости [6–22], половозрастной онкологической и общей смертности [6–22; 25] и половозрастном составе населения Российской Федерации [23–24] за период с 1993 по 2022 гг.

На первом этапе работы была проанализирована половозрастная структура населения Российской Федерации в указанные годы, так как более высокая средняя радиочувствительность детей и женщин по сравнению со взрослыми и мужчинами [1] способна оказывать влияние на значение популяционных рисков в различных по составу группах населения. На рисунке 1 наглядно показаны различия в возрастной структуре российского населения в 1993 и 2008 гг. (рис. 1а), а также в 2008 и 2022 гг. (рис. 1б). Указанными различиями был обусловлен выбор календарных периодов для расчета значений риска. Расчет осуществлялся с использованием данных за 1993, 2000, 2008, 2015 и 2022 гг.



**Рис. 1.** Сравнение вклада различных возрастных групп в общую численность населения Российской Федерации в 1993 и 2008 гг. (а); в 2008 и 2022 гг. (б), %

**[Fig. 1.** Comparison of the contribution of different age groups to the total population of the Russian Federation in 1993 and 2008 (a); in 2008 and 2022 (b), %]

В рамках настоящей работы были рассчитаны значения  $REIC_c$ <sup>1</sup> в соответствии с разделом 3.1.3.3 Публикации 152 МКРЗ для следующих органов/тканей/систем организма: пищевода, желудка, ободочной кишки, печени, легких, молочной железы и яичников у женщин, мочевого пузыря, щитовидной железы,

ЗНО лимфатической и кроветворной систем, а также для группы «другие солидные ЗНО» без выделения отдельных органов и тканей.

Расчет осуществлялся по моделям относительного ( $ERR^2$ ) и абсолютного ( $EAR^3$ ) риска.

<sup>1</sup> REIC – Risk of Exposure-Induced Cancer (англ. риск развития ЗНО, вызванного облучением).

<sup>2</sup> ERR – excessive relative risk (англ. избыточный относительный риск).

<sup>3</sup> EAR – excessive absolute risk (англ. избыточный абсолютный риск).

Расчет производился при значении органной дозы гамма-излучения 0,1 Гр<sup>4</sup>. Оценка производилась отдельно для мужского и женского населения. Популяционный риск рассчитан для группы «все население» и учитывает половозрастную структуру населения в конкретный календарный год. При этом к оценкам риска применялось значение коэффициента DDREF<sup>5</sup>, равное 2.

### Результаты и обсуждение

Результаты расчета коэффициентов популяционного риска развития ЗНО для мужчин и женщин российской популяции за период с 1993 по 2022 гг. представлены в таблице. Для сравнения приводятся значения коэффициентов номинального риска, представленные в Публикации 103 МКРЗ.

Из данных, представленных в таблице, видно, что значения риска в российской популяции для мужского населения по всем органам, тканям и системам организма на протяжении 30 лет оставались существенно ниже аналогичных значений для номинальной популяции МКРЗ лишь по некоторым органам (щитовидная железа и группа «другие солидные ЗНО»), постепенно приближаясь к соответствующим значениям для номинальной популяции. Причина этого, по-види-

мому, заключается в сравнительно невысокой средней продолжительности жизни мужчин в российской популяции, которая начала увеличиваться в последние годы.

В то же время значения радиационного риска развития рака щитовидной железы для женской части российской популяции в последние 15 лет несколько превысили значения, рассчитанные МКРЗ для номинальной популяции. Однако для остальных органов, тканей и систем организма значения риска в российской популяции для женщин по-прежнему остаются существенно ниже значений риска для номинальной популяции. При этом, в отличие от мужской части населения, значения радиационных рисков для женщин по большинству органов и тканей менялись незначительно, за исключением раков щитовидной железы.

Анализируя представленные результаты, важно учитывать возможное влияние различий в половозрастном составе российской популяции по сравнению с номинальной популяцией МКРЗ. Для этого был изучен половозрастной состав мужского и женского населения Российской Федерации за весь рассматриваемый период, а также половозрастной состав номинальной популяции МКРЗ в целом и отдельно для азиатской и евро-американской популяций МКРЗ.

Таблица

**Риск развития радиационно-индуцированных ЗНО в органе/ткани на 1 Гр органной дозы, случаев на 10 000 чел.**

[Table

**The risk of radiation-induced malignant neoplasms in the organ/tissue per 1 Gy organ dose, expressed as cases per 10,000 individuals]**

| Орган/ткань                               | Пищевод<br>[Oesophagus] | Желудок<br>[Stomach] | Ободочная<br>кишка [Colon] | Печень<br>[Liver] | Легкое<br>[Lung] | Молочная<br>железа<br>[Feemate<br>Breast] | Яичник<br>[Ovary] | Мочевой<br>пузырь<br>[Bladder] | Щитовидная<br>железа<br>[Thyroid] | Другие<br>солидные<br>[Other solid] | Лейкемии<br>[Leukaemias] | Сумма<br>[Summ] |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Мужчины [Males]                           |                         |                      |                            |                   |                  |                                           |                   |                                |                                   |                                     |                          |                 |
| МКРЗ [ICRP]                               | 15                      | 68                   | 91                         | 41                | 76               |                                           |                   | 46                             | 12                                | 157                                 | 48                       | 554             |
| Российская популяция [Russian population] | 1993                    | 6                    | 31                         | 25                | 13               | 28                                        |                   | 10                             | 3                                 | 65                                  | 27                       | 207             |
|                                           | 2000                    | 7                    | 38                         | 37                | 17               | 44                                        |                   | 19                             | 4                                 | 88                                  | 34                       | 287             |
|                                           | 2008                    | 8                    | 36                         | 41                | 17               | 44                                        |                   | 20                             | 6                                 | 99                                  | 35                       | 306             |
|                                           | 2015                    | 9                    | 39                         | 50                | 20               | 50                                        |                   | 25                             | 7                                 | 125                                 | 38                       | 365             |
|                                           | 2022                    | 8                    | 38                         | 54                | 21               | 48                                        |                   | 25                             | 10                                | 127                                 | 39                       | 371             |
| Женщины [Females]                         |                         |                      |                            |                   |                  |                                           |                   |                                |                                   |                                     |                          |                 |
| МКРЗ [ICRP]                               | 16                      | 91                   | 40                         | 19                | 153              | 224                                       | 21                | 41                             | 53                                | 131                                 | 36                       | 825             |
| Российская популяция [Russian population] | 1993                    | 9                    | 71                         | 23                | 11               | 75                                        | 17                | 17                             | 33                                | 104                                 | 21                       | 552             |
|                                           | 2000                    | 8                    | 63                         | 23                | 9                | 72                                        | 17                | 17                             | 47                                | 102                                 | 21                       | 532             |
|                                           | 2008                    | 8                    | 59                         | 24                | 9                | 75                                        | 17                | 18                             | 51                                | 105                                 | 21                       | 534             |
|                                           | 2015                    | 8                    | 60                         | 26                | 9                | 82                                        | 17                | 21                             | 64                                | 117                                 | 22                       | 582             |
|                                           | 2022                    | 9                    | 57                         | 26                | 9                | 83                                        | 17                | 21                             | 78                                | 116                                 | 21                       | 590             |

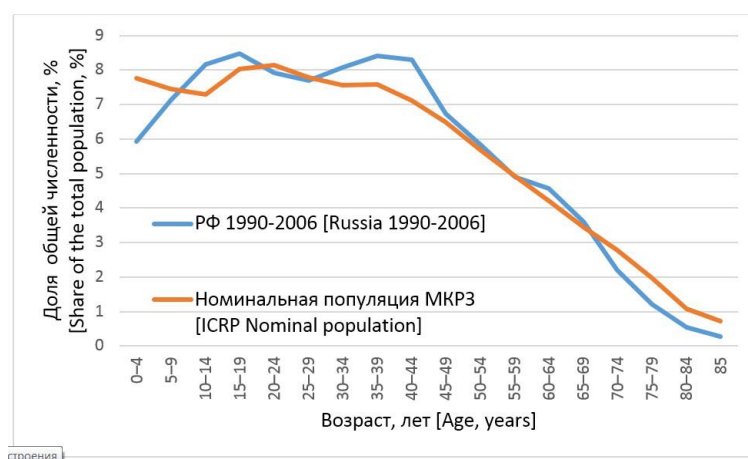
<sup>4</sup> Указанное значение дозы выбрано как верхняя граница диапазона малых доз облучения. С учетом того, что результаты расчета приводятся в пересчете на 1 Гр, указанный факт влияет только на оценку риска для заболеваний лимфатической и кроветворной ткани, а также на суммарный риск при равномерном облучении, т.к. модели для солидных раков линейны по отношению к дозе облучения.

<sup>5</sup> DDREF – Dose and Dose Rate Effectiveness Factor (англ. фактор эффективности дозы и мощности дозы). Указанный коэффициент применяется к оценкам риска в диапазоне малых доз и/или малых мощностей дозы и фактически означает снижение риска по сравнению с расчетным. Указанный эффект снижения риска не наблюдается в некоторых исследованиях, тогда как в других исследованиях его значение находится в диапазоне от 1 до 10. В соответствии с рекомендациями Публикации 103 МКРЗ в настоящей работе принято значение DDREF равное 2.



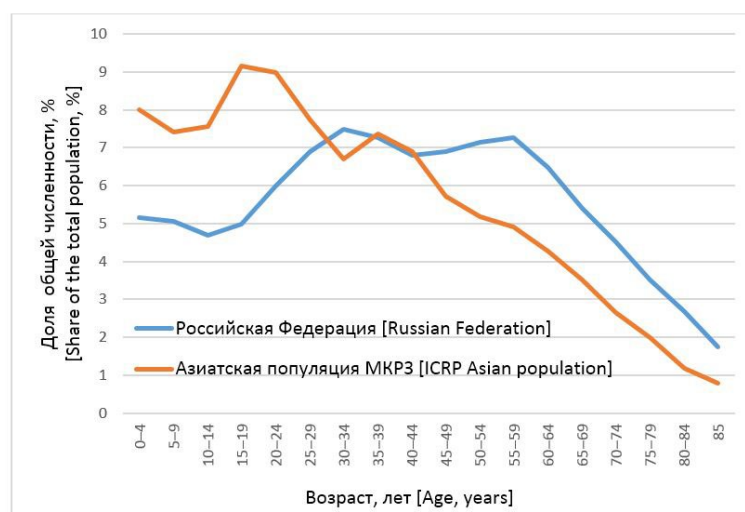
На рисунках 2 и 3 представлены некоторые результаты сравнения возрастного состава мужского и женского населения российской популяции с азиатской, евро-американской и усредненной номинальной популяцией МКРЗ. Для удобства зрительного восприятия данные по российской популяции представлены в среднем за первую и вторую половины 35-летнего периода (рис. 2), а также в среднем за все 35 лет с 1990 по 2024 гг (рис. 3). Для наглядности представлены как наиболее близкие по возрастному составу субпопуляции, так и наиболее отличающиеся. В целом можно сказать, что возрастной состав как мужского, так и женского населения в российской популяции достаточно близок к возрастному составу евро-американской популяции МКРЗ. Хотя во второй половине

35-летнего периода наметилось снижение доли детского населения как среди мужчин, так и среди женщин российской популяции по сравнению с евро-американской популяцией. Указанное различие составляет порядка 15 %. Однако азиатская популяция МКРЗ демонстрирует существенно более высокую долю детского населения как среди женщин (рис. 3), так и среди мужчин. Причем указанное различие возрастает со временем. С учетом более высокой радиочувствительности детского населения по сравнению со взрослыми для большинства органов и тканей, указанная ситуация потенциально может привести к возрастанию значений радиационного риска в российской популяции в случае улучшения демографической ситуации и роста доли детского населения.



**Рис. 2.** Возрастной состав мужского населения в российской популяции за период с 1990 по 2006 гг. в сравнении с номинальной популяцией МКРЗ

[Fig. 2. Age distribution of the male population in the Russian cohort during 1990–2006 compared to the ICRP reference population]



**Рис. 3.** Возрастной состав женского населения в российской популяции за период с 2007 по 2024 гг. в сравнении с азиатской популяцией МКРЗ

[Fig. 3. Age distribution of the female population in the Russian cohort during 2007–2024 compared to the ICRP Asian population]



## Заключение

1. Использование коэффициентов риска и взвешивающих множителей для органов и тканей, рассчитанных с использованием медико-демографических данных конкретных популяций, позволяет более математически строго учитывать различие в радиочувствительности между популяциями и воздействие радиации на состояние здоровья на национальном уровне для решения задач сравнительного анализа рисков в условиях воздействия малых доз при различных ситуациях и сценариях облучения.

2. Значения популяционного риска развития радиационно-индуцированных ЗНО, рассчитанные для российской популяции с использованием медико-демографических данных за 1993–2022 гг. по модели МКРЗ для межпопуляционного переноса радиационного риска, не превосходят аналогичные значения для номинальной популяции МКРЗ за весь указанный период для подавляющего большинства органов и тканей.

3. Единственным исключением является риск развития рака щитовидной железы у женщин. Указанный риск, рассчитанный по данным по Российской Федерации за 2022 г., в 1,5 раза выше, чем для номинальной популяции МКРЗ. Однако в период с 1993 по 2021 гг. указанная разница в оценках не превышает 1,2 раза. При этом значения тканевого множителя для щитовидной железы, определенные МКРЗ, в 1,3 раза превосходят расчетное значение коэффициента относительной радиочувствительности. В связи с этим, описанные различия не оказывают существенного влияния на эффективную дозу и на уровень радиационной защиты населения.

4. Действующая система радиационной защиты, основанная на использовании коэффициентов риска, рекомендованных МКРЗ, обеспечивает достаточный уровень защиты и не требует перерасчета с использованием данных российской популяции.

## Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Косарлукова Е.А. провела сбор, анализ и подготовку медико-демографических данных для расчетов, подготовила промежуточный вариант рукописи.

Репин Л.В. разработал дизайн исследования, определил цели и задачи, осуществил расчеты, редактировал промежуточный вариант рукописи.

Библин А.М. редактировал промежуточный вариант рукописи, подготовил окончательный вариант рукописи.

Ахматдинов Рустам Р. редактировал промежуточный вариант рукописи.

## Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Сведения об источнике финансирования

Статья подготовлена в рамках выполнения НИР «Разработка и научное обоснование прикладных методов оценки радиационных рисков для здоровья населения при различных ситуациях и сценариях облучения на основе современных подходов к оценке радиационного ущерба».

## Литература

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2-4. 332 p.
2. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152 // Annals of the ICRP. 2022. Vol. 51, No 3. 103 p.
3. Горский А.И., Чекин С.Ю., Максютов М.А. и др. Эффект переноса моделей радиационного риска МКРЗ на популяцию РФ // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2019. Т. 28, №. 4. С. 5-15. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
4. Губин А.Т., Редько В.И., Сакович В.А. Влияние демографических особенностей популяции на оценки коэффициентов радиогенного риска на примере российского населения // Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 26-36. DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-26-36.
5. Репин Л.В., Николаевич М.С. Оценка приемлемости использования тканевых весовых коэффициентов МКРЗ при вычислении эффективной дозы для отдельных половозрастных групп населения Российской Федерации // Радиационная гигиена. 2013. Т. 6, № 1. С. 38-44.
6. Петрова Г.В., Каприн А.Д., Грецова О.П., Старинский В.В. Злокачественные новообразования в России: обзор статистической информации за 1993–2013 гг. / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 2015. 511 с.
7. Злокачественные новообразования в России в 2007 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГУ «МНИОИ им. П.А. Герцена Росмедтехнологий», 2009. 244 с.
8. Злокачественные новообразования в России в 2008 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГУ «МНИОИ им. П.А. Герцена Росмедтехнологий», 2010. 256 с.
9. Злокачественные новообразования в России в 2009 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГУ «МНИОИ им. П.А. Герцена Минздравсоцразвития России», 2011. 260 с.
10. Злокачественные новообразования в России в 2010 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздравсоцразвития России, 2012. 260 с.
11. Злокачественные новообразования в России в 2011 году (заболеваемость и смертность) / под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2013. 289 с.
12. Злокачественные новообразования в России в 2012 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: ФГБУ «МНИОИ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2014. 250 с.
13. Злокачественные новообразования в России в 2013 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «ФМИЦ им. П.А. Герцена» Минздрава России, 2015. 250 с.

14. Злокачественные новообразования в России в 2014 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2016. 250 с.
15. Злокачественные новообразования в России в 2015 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2017. 250 с.
16. Злокачественные новообразования в России в 2016 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2018. 250 с.
17. Злокачественные новообразования в России в 2017 году (заболеваемость и смертность). / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2018. 250 с.
18. Злокачественные новообразования в России в 2018 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2019. 250 с.
19. Злокачественные новообразования в России в 2019 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2020. 252 с.
20. Злокачественные новообразования в России в 2020 году (заболеваемость и смертность). / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2021. 252 с.
21. Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность). / под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. 252 с.
22. Злокачественные новообразования в России в 2022 году (заболеваемость и смертность) / под ред. А.Д. Каприна и др. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2023. 275 с.
23. Федеральная служба государственной статистики. Численность населения мужчин Российской Федерации по полу и возрасту. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31548> (дата обращения: 09.04.2025).
24. Федеральная служба государственной статистики. Численность населения женщин Российской Федерации по полу и возрасту. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/33459> (дата обращения: 09.04.2025).
25. Федеральная служба государственной статистики. Демографический ежегодник России. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13207> (дата обращения: 09.04.2025).

Поступила: 10.04.2025

**Косарлукова Елена Алексеевна** – исполняющая обязанности младшего научного сотрудника информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0009-0007-6476-9571

**Репин Леонид Викторович** – младший научный сотрудник информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: [leonid\\_repin@mail.ru](mailto:leonid_repin@mail.ru)

ORCID: 0000-0002-4857-6792

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

**Ахматдинов Рустам Расимович** – ведущий инженер-исследователь информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-4151-5380

**Для цитирования:** Косарлукова Е.А., Репин Л.В., Библин А.М., Ахматдинов Р.Р. Анализ влияния медико-демографических показателей российской популяции на значения радиационного риска по модели МКРЗ // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 29–36. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-29-36

## Analysis of the impact of medical and demographic indicators of the Russian population on radiation risk estimates based on the ICRP model

Elena A. Kosarlukova, Leonid V. Repin, Artem M. Biblin, Rustam R. Akhmatdinov

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 primary quantity used for monitoring exposure levels of the general population and personnel at radiation facilities is the individual effective dose. This metric accounts for variations in the radiosensitivity of specific organs and tissues by employing corresponding tissue weighting factors recommended by the ICRP. These factors were derived based on medico-demographic data from two artificially constructed populations: "Euro-American" and "Asian." Estimates of relative harm, calculated from risk assessments, served as the basis for establishing the recommended values of tissue weighting factors for organs and tissues. However, the use of effective dose as a risk measure in cases of non-uniform exposure within specific populations raises questions about the appropriateness of applying alternative tissue weighting factors in its calculation to more rigorously account for differences in relative radiosensitivity. The study aims to assess whether the recommended values of nominal risk coefficients and weighting factors for organs and tissues provide a comparable level of safety for the Russian population compared to that provided for the ICRP nominal population. Materials and Methods: The assessment of radiation-induced cancer risk was conducted using Russian medico-demographic data from 1993 to 2022, applying the interpopulation radiation risk transfer model from ICRP Publication 152. Results and Discussion: The calculations indicate that risk estimates for most organs and tissues in the Russian population have gradually increased for males over the 30-year period. However, with the exception of thyroid cancer risk in females, these estimates do not exceed the corresponding values used to establish the tissue weighting factors. Conclusion: The current system of risk indicators and dose limits provides an adequate level of protection for the Russian population and does not require revision until international approaches to radiation protection are updated.*

**Key words:** malignant neoplasms, effective dose, radiation risk coefficients, nominal population, radiation detriment, population risk.

### Authors' personal contribution

Kosarlukova E.A. conducted the collection, analysis, and preparation of medical-demographic data for the calculations and prepared the preliminary manuscript draft.

Repin L.V. developed the study design, defined the research objectives and tasks, performed the calculations, and edited the preliminary manuscript draft.

Biblin A.M. edited the preliminary manuscript draft and prepared the final manuscript version

Akhmatdinov Rustam R. edited the preliminary manuscript draft.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsorship. The study was performed within framework of research project "Development and scientific justification of applied methods for assessment of radiation risks to public health under different situations and exposure scenarios based on modern approaches to radiation detriment assessment".

### References

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 332.
2. Radiation detriment calculation methodology. ICRP Publication 152. *Annals of the ICRP*. 2022;51(3).
3. Gorski AI, Chekin SYu, Maksimov MA, Menyailo AN, Korelo AM, Tumanov KA, et al. Transfer of ICRP models of radiation risk to the population of the Russian Federation. *Radiation and Risk*. 2019;28(4): 5-15. (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-5-15.
4. Gubin AT, Redko VI, Sakovich VA. The impact of the demographic characteristics of the population on estimates of the coefficients of radiogenic risk in the Russian population. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2016;9(4): 2636. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2016-9-4-26-36.
5. Repin LV, Nikolaevich MS. Acceptability evaluation for using ICRP tissue weighting factors to calculate effective dose value for separate gender-age groups of Russian Federation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2013;6(1): 38-44. (In Russian).
6. Petrova GV, Kaprin AD, Gretsova OP, Starinsky VV. Malignant neoplasms in Russia. Review of statistical information for 1993–2013. Moscow: P. Hertsen MORI –branch of the FSBI NMRRC of the Ministry of Health of Russia. 2015; 510 p. (In Russian).
7. Malignant neoplasms in Russia in 2007 (incidence and mortality). Ed. VI Chissov, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: Federal State Institution "P.A. Hertsen Moscow Medical Research Institute of Medical Technology of the Russian Federation"; 2009, 244 p. (In Russian).
8. Malignant neoplasms in Russia in 2008 (morbidity and mortality). Ed. by VI Chissov, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: FGU "P.A. Hertsen MNIOI Rosmedtechnologii"; 2010. 256 p. (In Russian).
9. Malignant neoplasms in Russia in 2009 (morbidity and mortality). Ed. by VI Chissov, VV Starinsky, GV Petrova.

**Leonid V. Repin**

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

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

- Moscow: FGU "P.A. Hertsen MNIOL of the Ministry of Health and Social Development of Russia"; 2011. 260 p. (In Russian).
10. Malignant neoplasms in Russia in 2010 (morbidity and mortality). Ed. by VI Chissov, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: FGBU "P.A. Hertsen MNIOL" Ministry of Health and Social Development of Russia; 2012. 260 p. (In Russian).
  11. Malignant neoplasms in Russia in 2011 (morbidity and mortality). Ed. by VI Chissov, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: FGBU "P.A. Hertsen MNIOL" of the Ministry of Health of Russia; 2013. 289 p. (In Russian).
  12. Malignant neoplasms in Russia in 2012 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: FGBU "P.A. Hertsen MNIOL" of the Ministry of Health of Russia; 2014. 250 p. (In Russian).
  13. Malignant neoplasms in Russia in 2013 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "P.A. Hertsen FMIC" of the Ministry of Health of Russia; 2015. 250 p. (In Russian).
  14. Malignant neoplasms in Russia in 2014 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMIRC" of the Ministry of Health of Russia; 2016. 250 p. (In Russian).
  15. Malignant neoplasms in Russia in 2015 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMIRC" of the Ministry of Health of Russia; 2017. 250 p. (In Russian).
  16. Malignant neoplasms in Russia in 2016 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2018. 250 p. (In Russian).
  17. Malignant neoplasms in Russia in 2017 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2018. 250 p. (In Russian).
  18. Malignant neoplasms in Russia in 2018 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, GV Petrova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2019. 250 p. (In Russian).
  19. Malignant neoplasms in Russia in 2019 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, AO Shakhzadova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2020. 252 p. (In Russian).
  20. Malignant neoplasms in Russia in 2020 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, AO Shakhzadova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2021. 252 p. (In Russian).
  21. Malignant neoplasms in Russia in 2021 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin, VV Starinsky, AO Shakhzadova. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2022. 252 p. (In Russian).
  22. Malignant neoplasms in Russia in 2022 (morbidity and mortality). Ed. by AD Kaprin et al. Moscow: P.A. Hertsen MNIOL – branch of FGBU "NMRC Radiology" of the Ministry of Health of Russia; 2023. 275 p. (In Russian).
  23. Federal State Statistics Service. Population of men of the Russian Federation by sex and age. Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/31548> [Accessed 09 April 2025].
  24. Federal State Statistics Service. Population of women of the Russian Federation by sex and age. Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/33459> [Accessed 09 April 2025].
  25. Federal State Statistics Service. Demographic Yearbook of Russia. Available from: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13207> [Accessed 09 April 2025].

Received: April 10, 2025

**Elena A. Kosarlukova** – Acting Junior Researcher, Information Analytical Center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0007-6476-9571

**For correspondence: Leonid V. Repin** – Junior Researcher, Information Analytical Center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: l.repin@niirg.ru)

ORCID: 0000-0002-4857-6792

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

**Rustam R. Akhmatdinov** – Engineer-Researcher, Information Analytical Center, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-4151-5380

**For citation: Kosarlukova E.A., Repin L.V., Biblin A.M., Akhmatdinov R.R. Analysis of the impact of medical and demographic indicators of the Russian population on radiation risk estimates based on the ICRP model. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No 2. P. 29–36. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-29-36**



# Определение фактических сроков вынужденного переселения представителей Уральской когорты аварийно-облученного населения с радиоактивно загрязненных территорий

Тряпицына С.В.<sup>1</sup>, Кравцова О.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уральский научно-практический центр радиационной медицины  
Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> 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

*К основным эффективным мерам радиационной защиты, помимо проведения дезактивационных мероприятий и ограничения потребления пищевых продуктов местного происхождения, относятся эвакуация и отселение жителей. Тем не менее принудительная смена привычной среды обитания может оказать негативное влияние на качество жизни человека. Изучение воздействия факторов радиационной и нерадиационной природы на состояние здоровья облученного населения требует классификации исследуемой когорты по критерию вынужденного переселения, то есть переселения, связанного с реализацией меры радиационной защиты. Однако качество ретроспективной информации не всегда однозначно позволяет определить момент времени, когда отселение жителей с радиоактивно загрязненных территорий началось фактически. Цель исследования — определение фактических сроков отселения населенных пунктов, жители которых включены в Уральскую когорту аварийно-облученного населения. Материалы и методы: Основным источником информации являлась медико-дозиметрическая база данных по облученным жителям населенных пунктов, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие сбросов жидких радиоактивных отходов химкомбината в конце 1940-х — в начале 1950-х гг. в реку Течу и радиационной аварии 1957 года на том же предприятии. Выбор критерия вынужденного переселения проводился с использованием методов демографического анализа собранных данных, определение сроков переселения — с привлечением исторических материалов. Результаты и обсуждение: Для двух радиационных ситуаций изучена миграционная активность населения в период с 1950 по 1960 гг. В качестве базового критерия определен коэффициент миграционной убыли за год (минус 100 % — для относительно крупных и средних населенных пунктов, минус 150 % — для малых). Для каждого отселенного населенного пункта был установлен год начала организованного переселения жителей и год окончания. Заключение: Исследование миграционных процессов позволило определить критерий вынужденного переселения и установить фактические сроки реализации этой защитной меры в отношении представителей исследуемой когорты.*

**Ключевые слова:** защитные меры, переселение, Уральская когорта аварийно-облученного населения, река Теча, Восточно-Уральский радиоактивный след.

## Введение

В период становления атомной промышленности СССР на Южном Урале возникли две ситуации радиоактивного загрязнения населенных территорий. Одна из этих ситуаций вызвана плановыми и аварийными сбросами жидких радиоактивных отходов (ЖРО) химкомбината «Маяк» (ПО «Маяк») в 1949–1956 гг. в реку Течу, активно используемую населением прибрежных населенных пунктов (НП) в хозяйственных целях [1–4]. Вторая – радиационная авария 1957 года на том же предприятии с образованием Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) [3,5]. При сходном характере облучения населения [6], в реализации защитных мероприятий каждая из этих ситуаций имеет свои особенности. В отношении прибрежных НП реки Течи мероприятия по пересе-

лению жителей на «чистые» территории имели плановый характер и вводились поэтапно по мере накопления данных дозиметрического контроля. В отношении жителей НП территорий ВУРС были применены как экстренные мероприятия для минимизации неблагоприятных последствий, так и плановые.

С пятидесятих годов прошлого века в Уральском научно-практическом центре радиационной медицины ФМБА России (УНПЦ РМ) собирается информация по жителям радиоактивно загрязненных территорий. За это время были сформированы когорты облученного населения [7–11]. Для организации наблюдения и обработки большого массива информации была создана медико-дозиметрическая база данных «Человек» УНПЦ РМ (БД «Человек») [1].

**Тряпицына Светлана Васильевна**

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

**Адрес для переписки:** 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: svt174@list.ru



С целью повышения статистической мощности исследований в 2018 году на основе ранее сформированных когорт была создана объединенная аналитическая когорта – Уральская когорта аварийно-облученного населения (УКАОН) [12]. Объединение когорт обеспечило использование единых информационных источников и единой методологии сбора информации, позволило создать единую дозиметрическую систему расчета доз в радиационных ситуациях на Южном Урале.

Расширение спектра задач УНПЦ РМ по изучению радиобиологических эффектов потребовало детального дифференцирования когорты УКАОН по критерию вынужденного переселения, то есть переселения, связанного с реализацией меры радиационной защиты. Однако качество ретроспективной информации и специфика реализации этого мероприятия не всегда однозначно позволяют определить момент времени, когда отселение жителей с радиоактивно загрязненных территорий началось фактически.

**Цель исследования** – определить фактические сроки отселения населенных пунктов, жители которых включены в УКАОН.

### Материалы и методы

Основным источником информации об облученных жителях радиоактивно загрязненных территорий являлась БД «Человек» [1]. По состоянию на апрель 2024 год численность УКАОН составляла приблизительно 63 тысячи человек, проживавших в период 1950–1960 гг. в НП Челябинской и Курганской областей и облучившихся вследствие ситуаций на ПО «Маяк», связанных с поступлением в окружающую среду радиоактивных веществ [12].

Сложность в определении фактических сроков вынужденного переселения связана с поэтапным принятием решений об отселении НП и с отложенным во времени исполнением требований распорядительных документов. Для решения проблемы классификации представителей УКАОН по критерию вынужденного переселения были использованы методы демографического анализа [13, 14] собранных данных с привлечением исторических материалов [3, 15]. Для этих целей, помимо основного источника информации (БД «Человек»), принимались во внимание отчетные материалы УНПЦ РМ, сведения из приказов и распоряжений органов исполнительной власти, а также исторические и аналитические материалы, опубликованные в научной литературе [2, 3, 5, 6, 15].

Систематизацию и обработку исходной информации проводили с использованием MS Office Excel 2013, статистический анализ – с использованием программного пакета Past 4.03.

### Результаты и обсуждение

#### *Краткая характеристика мер радиационной защиты населения в ситуации сброса жидких радиоактивных отходов в реку Теча*

Как свидетельствуют исторические материалы, первые мероприятия по снижению дозовых нагрузок на жителей прибрежных НП реки Течи были инициированы осенью 1951 года после подробного изучения радиационной ситуации на производственных площадках предприятия и результатов контроля уровней содержания радиоактивных веществ в объектах окружающей среды [15]. По результатам исследования были даны рекомендации по ограничению хозяйственного использования населением речной воды и пойменных земель, а также по организации наблюдений за состоянием здоровья жителей прибрежных территорий. Предпринятые меры по сохранению здоровья населения включали административные, организационно-технические, санитарно-гигиенические и медицинские мероприятия [2, 15]. В НП был установлен охранный режим на прибрежных территориях, прилегающих к задействованным в технологическом процессе водоемам, введен запрет на использование речной воды в питьевых и хозяйственных целях. Строились новые и реконструировались существующие источники питьевого водоснабжения (колодцы, водопроводы, скважины). Среди населения проводилась разъяснительная работа о недопустимости использования реки для хозяйственных и бытовых нужд (в том числе для полива огородов, водопоя скота, купания). Вводились запреты и ограничения на использование затопляемых в период весеннего паводка земель для выпаса домашнего скота и заготовки сена, сруба деревьев и кустарников с целью заготовки дров. Устанавливались знаки о запрете рыболовства и охоты. Изымались не прошедшие санитарный контроль пищевые продукты: молоко, картофель и овощи, мясо домашнего скота и водоплавающей птицы. Были проведены медицинские обследования состояния здоровья жителей прибрежных НП, организовано медико-санитарное обслуживание населения.

Однако на практике комплекс защитных мер реализован был лишь отчасти. Административные запреты надлежаще не исполнялись ввиду отсутствия необходимых кадровых ресурсов, недостаточности правовых полномочий. Практическая реализация проектов по строительству водопроводов и колодцев была затянута во времени из-за несогласованности административных действий, материальных трудностей и недочетов некоторых технических решений. Население продолжало пользоваться речной водой для питьевых и хозяйственных целей. Речные ресурсы и ресурсы пойменных земель также оставались быть задействованными сельскохозяйственными предприятиями.

По результатам исследований и наблюдений, накопленных к концу 1953 года, было предложено с берегов реки Теча переселить все НП Челябинской и Курганской областей (41 НП) [3, 12, 15]. В июне 1954 года издано постановление<sup>1</sup> Совета Министров СССР (СМ СССР), дополненное в октябре того же года<sup>2</sup>, о переселении изъявивших согласие

<sup>1</sup> Постановление Совета Министров СССР от 11 июня 1954 г. № 1167-511сс [Resolution of the Council of Ministers of the USSR of June 11, 1954 No. 1167-511ss (In Russ.)].

<sup>2</sup> Постановление Совета Министров СССР от 21 октября 1954 г. № 2186-1030сс [Resolution of the Council of Ministers of the USSR of October 21, 1954 No. 2186-1030ss. (In Russ.)].

жителей двенадцати прибрежных НП, В сентябре 1956 года СМ СССР принял постановление<sup>3</sup> об отселении всех жителей поселка геологоразведочной партии (п. ГРП), а в марте 1957 года – решение<sup>4</sup> о переселении еще тринадцати НП Челябинской и Курганской областей. Однако по результатам изучения радиационной обстановки, сложившейся к июлю 1957 года, проведение мероприятий по отселению жителей прочих НП было признано необоснованным [15, 16].

Из-за технических сложностей, высоких материальных и финансовых затрат, а также негативного отношения населения к вынужденной перемене места жительства, процесс переселения жителей НП, подлежащих отселению, затянулся на годы [2, 15]. С 1954 года с берегов реки Теча было отселено 26 НП (табл. 1), жители которых включены в когорту УКАОН. Отселение некоторых НП было завершено лишь к 1962 году [3].

Таблица 1

**Перечень основных распорядительных документов о переселении жителей прибрежных НП реки Течи [2, 3, 15]**

[Table 1]

**The list of main order documents on relocation of residents of the Tcha River basin [2, 3, 15]**

| Населенный пункт<br>[Settlement]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Распорядительные документы<br>[Ordering documents]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Курганская область [Kurgan Oblast]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| д. 2-я Белоярка, с. Ганино, п. Дубасово, с. Марково, с. Прогресс<br>[Beloyarka-2, Ganino, Dubasovo, Markovo, Progress]                                                                                                                                                                                                                                                                    | Постановление СМ СССР от 20 марта 1957 г. № 299-145сс; Приказ Министерства среднего машиностроения (МСМ) от 15 апреля 1957 г. № 196; Постановление Совета Министров РСФСР (СМ РСФСР) от 6 апреля 1957 г. № 179р<br>[Resolution of the USSR CM of March 20, 1957, No. 299-145ss; Order of the Ministry of Medium Machine Building (MMMB) of April 15, 1957, No. 196; Resolution of the Council of Ministers of the RSFSR (CM RSFSR) of April 6, 1957, No. 179r. (In Russ.)] |
| Челябинская область [Chelyabinsk Oblast]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| д. Большое Исаево, д. Герасимовка, д. Ибрагимово, д. Малое Таскино, с. Метлино, д. Надыров Мост, д. Надырово, д. Назарово, д. Новое Асаново, п. Подсобное хозяйство треста № 92, д. Старое Асаново, д. Теча-Брод<br>[Bolshoe Isayevo, Gerasimovka, Ibragimovo, Maloye Taskino, Metlino, Nadyrov Most, Nadyrovo, Nazarovo, Novoye Asanovo, Farm of Trust № 92, Staroye Asanovo, Tcha-Brod] | Постановление СМ СССР от 11 июня 1954 г. № 1167-511сс; Приказ МСМ СССР от 18 июня 1954 г. № 538сс; Постановление СМ СССР от 21 октября 1954 г. № 2186-1030сс; Приказ МСМ СССР от 28 октября 1954 г. № 830сс<br>[Resolution of the USSR CM of June 11, 1954, No. 1167-511ss; Order of the USSR MMB of June 18, 1954, No. 538ss; Resolution of the USSR CM of October 21, 1954, No. 2186-1030ss; Order of the USSR MMB of October 28, 1954, No. 830ss. (In Russ.)]           |
| Поселок геологоразведочной партии<br>[Settlement of the geological prospecting party (GRP)]                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Постановление СМ СССР от 27 сентября 1956 г. № 1364-685; Приказ МСМ от 12 октября 1956 г. № 682<br>[Resolution of the USSR CM of September 27, 1956, No. 1364-685; Order of the MSM of October 12, 1956, No. 682 (In Russ.)]                                                                                                                                                                                                                                               |
| д. Бакланово, д. Ветроудуйка, д. Заманиха, д. Карпино, д. Курманово, д. Осолодка, д. Паново, д. Черепаново<br>[Baklanovo, Vetroduika, Zamanikha, Karpino, Kurmanovo, Osolodka, Panovo, Cherepanovo]                                                                                                                                                                                       | Постановление СМ СССР от 20 марта 1957 г. № 299-145сс; Приказ МСМ от 15 апреля 1957 г. № 196 сс; Постановление СМ РСФСР от 6 апреля 1957 г. № 179р<br>[Resolution of the USSR CM of March 20, 1957, No. 299-145ss; Order of the MSM of April 15, 1957, No. 196 ss; Decree of the SM of the RSFSR of April 6, 1957, No. 179r. (In Russ.)]                                                                                                                                   |

*Краткая характеристика мер радиационной защиты населения в ситуации радиационной аварии 1957 года*

Реализация защитных мероприятий в ситуации радиационной аварии, произошедшей на ПО «Маяк» в сентябре 1957 года – взрыв емкости с высокоактивными радиоактивными отходами – имела иной характер. Организованный дозиметрический и радиометрический контроль уже в первые

дни после аварии позволил определить пространственное распределение рассеянных радиоактивных веществ и оценить масштабы загрязнения территорий [2, 15, 17]. Радиоактивному загрязнению подверглись все объекты окружающей среды. В ближайших к источнику взрыва НП фиксировались высокие уровни мощности дозы гамма-излучения над поверхностью земли и уровни загрязнения бета-частицами жилищ и предметов обихода населения [2, 15]. Уже

<sup>3</sup> Постановление Совета Министров СССР от 27 сентября 1956 г. № 1364-685 [Resolution of the Council of Ministers of the USSR of September 27, 1956, No. 1364-685. (In Russ.)].

<sup>4</sup> Постановление Совета Министров СССР от 20 марта 1957 г. № 299-145сс [Resolution of the Council of Ministers of the USSR of March 20, 1957, No. 299-145ss (In Russ.)].

в начале октября 1957 года комиссия по расследованию причин взрыва вынесла решение<sup>5</sup> о переселении трех деревень: Бердяниш, Сатлыково, Галикаево [15]. В октябре же было принято решение о переселении д. Кирпичики, в котором, как оказалось позже, уровни радиоактивного загрязнения территории были не столь высокими [15].

Одной из основных мер защиты населения в первый год после аварии был контроль с выбраковкой и изъятием сельскохозяйственной продукции. В качестве критерия контроля были введены временные допустимые уровни содержания смеси радионуклидов в пищевых продуктах. Однако эта защитная мера была признана малоэффективной [2].

Для предотвращения облучения населения в 1958–1959 гг. было принято решение о переселении<sup>6</sup> жителей семи НП, где начальная плотность радиоактивного загрязнения территории по  $^{90}\text{Sr}$  превышала  $74 \text{ кБк/м}^2$  (от места взрыва до села Багаряк по направлению оси следа) и девяти НП, где поверхностная активность  $^{90}\text{Sr}$  в почве достигала  $150 \text{ кБк/м}^2$  [2]. В 1959 году на отселенной территории ВУРС правительством РСФСР было принято решение об образовании санитарно-охранной зоны, где запрещалась любая хозяйственная деятельность [15]. С октября 1957 года с территории ВУРС было отселено 20 НП, где проживали представители населения, вошедшие в когорту УКАОН (табл. 2).

Таблица 2

**Перечень основных распорядительных документов о переселении жителей НП, расположенных на территории ВУРС [2, 3, 15]**

[Table 2]

**The list of main order documents on relocation of residents of the EURT territory [2, 3, 15]]**

| Населенный пункт<br>[Settlement]                                                                                                                                                                         | Распорядительные документы<br>[Ordering documents]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| д. Бердяниш, с. Галикаева, д. Кирпичики, д. Сатлыково<br>[Berdyanish, Galikaeva, Kirpichiki, Satlykovo]                                                                                                  | Постановление комиссии МСМ СССР от 2 октября 1957 года о проведении мероприятий по ликвидации последствий взрыва; Постановление СМ СССР от 12 ноября 1957 г. № 1202-587; Приказ МСМ от 19 ноября 1957 г. № 645сс<br>[Resolution of the USSR MMB Commission of October 2, 1957, on measures to eliminate the consequences of the explosion; Resolution of the USSR CM of November 12, 1957, No. 1202-587; Order of the MMB of November 19, 1957, No. 645ss. (In Russ.)] |
| с. Алабуга, д. Горный, с. Игиш, д. Русская Караболка, д. Трошково, д. Малое Трошково, с. Юго-Конево<br>[Alabuga, Gorny, Igish, Russkaya Karabolka, Troshkovo, Yugo-Konevo]                               | Постановление СМ СССР от 27 февраля 1958 г. № 227-110; Приказ МСМ от 03 марта 1958 г. № 136сс<br>[Resolution of the USSR CM of February 27, 1958, No. 227-110; Order of the MMB of March 03, 1958, No. 136ss. (In Russ.)]                                                                                                                                                                                                                                              |
| д. Боевское, д. Брюханово, с. Гусево, д. Кривошеино, д. Малое Шабурово, с. Мельниково, д. Фадино<br>[Boevskoye, Brukhanovo, Gusevo, Krivosheino, Maloye Shaburovo, Melnikovo, Fadino, Melnikovo, Fadino] | Постановление СМ РСФСР от 26 июля 1958 г. № 857-96; Приказ МСМ от 11 августа 1958 г. № 0476сс<br>[Resolution of the CM of the RSFSR of July 26, 1958, No. 857-96; Order of the MMB of August 11, 1958, No. 0476ss. (In Russ.)]                                                                                                                                                                                                                                         |
| с. Кажаккуль, д. Скориново<br>[Kazhakul, Skorinovo]                                                                                                                                                      | Постановление СМ РСФСР от 13 февраля 1959 г. № 173-27; Приказ МСМ от 13 февраля 1959 г. № 092<br>[Resolution of the CM of the RSFSR of February 13, 1959, No. 173-27; Order of the MSM of February 13, 1959, No. 092 (In Russ.)]                                                                                                                                                                                                                                       |

\* Сведения о жителях деревень Трошково и Малое Трошково в БД отнесены к НП Трошково [Information on Troshkovo and Maloye Troshkovo settlements is united as on Troshkovo settlement].

*Метод определения года начала вынужденного переселения представителей УКАОН*

Наиболее проблемным вопросом в определении года, с которого начался активный отток жителей из НП по административному решению, являлся вопрос выбора обоснованного критерия, позволяющего различить процессы естественной и вынужденной миграционной убыли<sup>7</sup> населения из НП. Смена места жительства в период с 1950 по 1960 гг. могла происходить вследствие переселения НП или в результате добровольной смены места жительства, к примеру, в связи с изменением места работы. Для решения этой про-

ванного критерия, позволяющего различить процессы естественной и вынужденной миграционной убыли<sup>7</sup> населения из НП. Смена места жительства в период с 1950 по 1960 гг. могла происходить вследствие переселения НП или в результате добровольной смены места жительства, к примеру, в связи с изменением места работы. Для решения этой про-

<sup>5</sup> Постановление комиссии МСМ СССР от 2 октября 1957 года о проведении мероприятий по ликвидации последствий взрыва [Resolution of the USSR MMB Commission of October 2, 1957 on measures to eliminate the consequences of the explosion. (In Russ.)].

<sup>6</sup> Постановление СМ СССР от 27 февраля 1958 г. № 227-110. Постановление СМ РСФСР от 26 июля 1958 г. № 857-96. Постановление СМ РСФСР от 13 февраля 1959 г. № 173-27 [Resolution of the USSR CM of February 27, 1958, No. 227-110. Resolution of the CM of the RSFSR of July 26, 1958, No. 857-96. Resolution of the SM of the RSFSR of February 13, 1959, No. 173-27. (In Russ.)].

<sup>7</sup> Здесь и далее под естественной миграционной убылью следует понимать убыль населения НП по причинам, не связанным с принятием административного решения об отселении НП. Под вынужденной миграционной убылью следует понимать убыль населения НП в связи с реализацией правительственных распоряжений [Natural migration loss should be hereafter understood as the loss of the population of the settlement for reasons unrelated to the adoption of an administrative decision on resettlement. Forced migration loss should be understood as the loss of the population of the settlement due to the implementation of government orders].

блемы был разработан метод определения года начала вынужденного переселения представителей исследуемой когорты из НП.

Данные в БД «Человек» УНПЦ РМ позволяют оценить численность жителей НП на начало календарного года, численность родившихся или умерших за год [1]. С использованием этого набора данных был определен годовой коэффициент миграционного прироста (убыли) [14] населения НП в соответствии с выражением:

$$K_{\text{мигр}}^t = \frac{N_{\text{нач}}^{t+1} - (N_{\text{нач}}^t + N_{\text{род}}^t - N_{\text{умер}}^t)}{(N_{\text{нач}}^t + N_{\text{род}}^t - N_{\text{умер}}^t)} \cdot 1000, \%_0$$

где  $K_{\text{мигр}}^t$  – коэффициент миграционного прироста (убыли) жителей в НП за календарный год  $t$ , ‰;  $N_{\text{нач}}^t, N_{\text{нач}}^{t+1}$  – число жителей на начало года  $t$  и на начало последующего года соответственно, человек;  $N_{\text{род}}^t, N_{\text{умер}}^t$  – число родившихся или умерших жителей в год  $t$  соответственно, человек.

Рассчитанные коэффициенты миграционной прироста (убыли) для непереселенных НП (15 НП), где проживали представители УКАОН в период с 1950 по 1960 гг. включительно, дали представление о характере типичных для того времени и той территории миграционных процессах. Диапазон средних значений коэффициентов миграционной прироста (убыли) для непереселенных НП за весь рассмотренный период в основном варьирует от минус 30 ‰ (убыль) до плюс 20 ‰ (прирост). Максимальное значение коэффициента миграционной убыли (КМУ) было оценено как минус 100 ‰. Именно это значение было принято нами в качестве численного выражения базового критерия, дифференцирующего процесс миграционной убыли населения НП на естественный и вынужденный. Так как непереселенные НП, вошедшие в УКАОН, относились к средним и крупным НП, то для малых НП<sup>8</sup> (с численностью жителей менее 200 человек) ввиду большей вариабельности величин относительных демографических показателей было принято решение принять пороговое значение КМУ равным минус 150 ‰.

Также был проведен анализ ситуаций, когда в год выхода постановления значение КМУ населения удовлетворяло вышеописанному критерию (было близко к значению нижней границы), однако в последующий год (или несколько лет) интенсивность миграции населения была более низкой. В таком случае при определении года начала вынужденной миграции населения были приняты во внимание результаты отчетных материалов УНПЦ РМ (в частности, санитарно-гигиенические паспорта НП).

Население большинства отселенных НП имело традиционный сельскохозяйственный уклад жизни. Жители обеспечивали себя в основном продукцией, произведенной в личных подсобных хозяйствах. Но некоторые НП были образованы в связи с развитием отраслевого хозяйства региона. В таких поселениях размещался административный персонал предприятий, а также временные работники. Среди жителей, вошедших в когорту УКАОН, к таким НП относились поселок подсобного хозяйства треста № 92 (треста № 42)

(далее – п. П/х треста № 92) и поселок геологоразведочной партии (п. ГРП), расположенный вблизи деревни Надыров Мост [15]. Потому особое внимание было уделено НП с узкоспециализированным направлением хозяйственной деятельности. КМУ в таких НП отличался от НП с оседлыми жителями, как правило, в большую сторону. При принятии решения о выборе года начала переселения в этом случае мы основывались на анализе собранной ретроспективной информации.

При изучении миграционных процессов в переселенных НП также было принято во внимание то обстоятельство, что установленные распорядительными документами сроки отселения НП переносились. Кроме того, переселение жителей некоторых НП проводилось поэтапно. Для учета этих факторов мы поступили следующим образом: период времени, прошедший с момента выхода распорядительного документа до установленного по критерию миграционной убыли года начала переселения, был обозначен как «период принятия решений», а период времени с года начала переселения до года выезда из НП оставшихся жителей – как «период переселения».

#### *Определение фактических сроков вынужденного переселения*

По информации из БД для каждого отселенного НП (всего 45 НП, в том числе 26 НП отселены по ситуации на реке Тече и 19 НП (см. примечание к табл. 2) – по ситуации аварии 1957 года) был установлен год начала вынужденного переселения. За дату инициации мероприятий по переселению была принята дата (в случае поэтапного переселения – наиболее ранняя дата) принятия административного решения об отселении жителей НП, подтвержденная постановлением СМ СССР, приказом МСМ, приказом местных органов исполнительной власти или прочими распорядительными документами (табл. 1 и 2). Сопоставление оцененных для каждого НП значений КМУ со значениями критерия проводили за период с года инициации мероприятий по переселению вплоть до года, когда из НП были переселены все жители (далее – год окончания переселения).

#### *НП бассейна реки Теча*

По ситуации с радиоактивным загрязнением реки Течи корректность определения года начала переселения по критерию миграционной убыли населения сомнений не вызвала для 23 НП. В установленный год начала переселения более 80 % населения выехало из 10 НП, более 50 % – из двух НП, более 30 % – из одного НП, и более 10 % или 15 % (в зависимости от численности населения) – из 10 НП.

Для уточнения года начала переселения жителей остальных 3 НП (д. Надыров Мост, п. П/х треста № 92 и п. ГРП) был проведен анализ ретроспективной информации. Два НП (п. П/х треста № 92 и п. ГРП) относились к поселениям с узкоспециализированным направлением хозяйственной деятельности и, как отмечалось выше, от прочих НП отличались специфичной миграцией населения. Но также географическая близость д. Надыров Мост к п. ГРП объясняет нетипичную для этой местности динамику изменения коэффициента миграционного прироста (убыли) населения в этом НП.

<sup>8</sup> Согласно административно-территориальному устройству Российской Федерации к малым сельским поселениям относятся поселения с численностью жителей до 200 человек. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (Дата обращения: 11.04.2025) [According to the administrative-territorial structure of the Russian Federation, small rural settlements include settlements with a population of up to 200 persons. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (Accessed 11 Apr 2025)].



Так, по информации из БД на начало 1950 года, в д. Надыров Мост проживало около 150 человек. Но к концу 1953 года численность жителей этого НП увеличилась почти в два раза. Такой приток населения объясняется тем, что работники, занятые на геологоразведочном предприятии, селились в этой деревне, о чем также указано в литературных источниках [15]. Распоряжение об отселении д. Надыров Мост датировано 1954 годом. В этом же году из д. Надыров Мост выехало около 14 % населения, что несколько выше граничного значения КМУ, установленного в качестве критерия активной миграции для НП такого типа. Но почти такая же доля населения мигрировала в том же году и из п. ГРП, хотя правительственное постановление об отселении п. ГРП вышло только в 1956 году. В 1955 году из д. Надыров Мост выехало 50 % населения. Этот год в нашем исследовании и был принят за год начала переселения жителей.

С начала 1950 года численность жителей п. ГРП высокими темпами прирастала и начала снижаться с 1954 года. В 1956 году из поселка мигрировало почти 50 % населения, а в 1957 году поселок был ликвидирован. Однако связать убыль численности населения поселка с годом выхода распорядительного документа в этом случае было бы некорректно, поскольку в Постановлении СМ СССР от 27 сентября 1956 г. № 1364-685 задача переселения этого НП ставилась на 1957 год [15]. Об этом же свидетельствуют отчетные материалы УНПЦ РМ, где в санитарно-гигиеническом паспорте НП год отселения жителей определен как 1957. Исходя из вышеприведенных доводов, 1957 год был установлен годом начала переселения жителей п. ГРП.

Иная ситуация прослеживается в изменении годовой численности жителей п. П/х треста № 92. Постановление об отселении НП вышло в 1954 году. По информации из БД в этом же году из поселка мигрировало почти 15 % населения. Однако в последующие годы, вплоть до 1958 года, за год из НП мигрировало не более 7 % населения. В 1958 году из НП выехало 50 % наличного населения и далее, вплоть до ликвидации НП, интенсивность годовой миграции практически не снижалась. Исходя из этого, за год начала переселения жителей п. П/х треста № 92 был принят 1958 год.

Анализ численности жителей, выехавших из НП с момента выхода распорядительного документа до установленного года начала организованного переселения и позже, показал следующие результаты. Для всей совокупности НП, отселенных с берегов реки Течи, доля жителей, мигрировавших из НП в «период принятия решений» в среднем составляла  $(10,4 \pm 2,3) \%$ <sup>9</sup>, а доля жителей, выехавших из НП в «период переселения» –  $(89,6 \pm 2,3) \%$  от общего числа мигрировавшего населения из НП. При исключении из общей совокупности НП п. П/х треста № 92 и п. ГРП, т.е. НП с узкоспециализированным направлением хозяйственной деятельности, доля жителей, мигрировавших из НП в «период принятия решений» составляла в среднем  $(7,8 \pm 1,2) \%$ . При этом из двух НП в «период принятия решения», длившийся

два года, мигрировало от 15 % до 20 % населения. Из пяти НП в «период переселения» мигрировало 100 % населения, то есть процесс организованной миграции начался с года выхода административного решения.

#### НП территории ВУРС

По ситуации радиационной аварии 1957 года по критерию миграционной убыли населения год начала переселения был установлен для 16 НП, расположенных на территории радиоактивного следа. При этом в установленный год из 12 НП было переселено 100 % жителей и из 4 НП – более 50 %. Для определения первого года фактического отселения еще трех НП (д. Кирпичики, д. Скориново и с. Кажаккуль) территории ВУРС потребовалось изучение дополнительной информации.

Согласно результатам анализа информации из БД по миграционному движению населения д. Кирпичики, в 1957 году (год выхода распорядительного документа об отселении НП) КМУ населения был определен равным минус 90 %, что выше значения критерия, дифференцирующего миграционную активность населения на естественную и вынужденную (минус 150 ‰). Однако аналитические материалы исторических и радиологических исследований позволили получить подтверждение о переселении части жителей этой деревни в 1957 году [2, 3, 15]. Этот год и был принят за год начала переселения д. Кирпичики.

Постановление СМ РСФСР об отселении д. Скориново и с. Кажаккуль вышло в 1959 году. Но также имеется информация в опубликованных архивных материалах [3, с. 324] о намерении отселить эти НП уже в 1958 году, что не было выполнено в полной мере из-за технических трудностей в размещении переселенцев, в связи с чем срок переселения жителей был перенесен на 1959 год. Изучение материалов медико-дозиметрических исследований позволило уточнить сроки отселения облученного населения этих двух НП: для д. Скориново – через 330 суток с момента радиационной аварии, для с. Кажаккуль – через 670 суток [16]. На основе этой информации годы начала переселения представителей УКАОН из д. Скориново и с. Кажаккуль были установлены как 1958 год и 1959 год соответственно.

Таким образом, по результатам проведенного анализа информации о миграционном движении облученного населения 45 НП, отселенных с радиоактивно загрязненных территорий по распоряжению органов исполнительной власти, были установлены фактические сроки вынужденного переселения представителей УКАОН из НП, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие деятельности ПО «Маяк» в 1940-х – 1950-х гг. Результаты исследования представлены в таблице 3. При дальнейшей классификации конкретных лиц из УКАОН по критерию переселения следует провести дополнительный анализ с целью установления причины выезда жителя из НП. В случае, если в «период переселения» житель выбыл из НП, к примеру, для прохождения срочной военной службы или для отбытия уголовного наказания, такого человека к переселенным жителям относить не следует.

<sup>9</sup>Здесь и далее приведены следующие статистические параметры: среднее значение  $\pm$  стандартная ошибка среднего значения [The following statistical parameters are hereafter given: mean value  $\pm$  stand-ard error of the mean value].



Таблица 3

Сроки переселения жителей из НП Челябинской области, подлежащих отселению по распоряжениям органов исполнительной власти

[Table 3]

Time frames for relocation of residents of settlements of Chelyabinsk Oblast]

| Год выхода распоря-<br>тельного документа<br>[Year of issuance of the reg-<br>ulatory document]                                    | Сроки переселения<br>[Time frames for relo-<br>cation] | Населенный пункт<br>[Settlement]                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ситуация облучения населения вследствие сбросов ЖРО в реку Теча<br>[The liquid radioactive wastes discharges into the Techa River] |                                                        |                                                                                                                                                                                                                               |
| 1954                                                                                                                               | 1954–1955                                              | Ибрагимово*, Надырово, Теча-Брод*<br>[Ibragimovo*, Nadyrovo, Techa-Brod*]                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                    | 1955                                                   | Малое Таскино* [Maloye Taskino*]                                                                                                                                                                                              |
|                                                                                                                                    | 1955–1956                                              | Большое Исаево, Метлино, Надыров Мост, Назарово*,<br>Новое Асаново, Старое Асаново<br>[Bolshoye Isaev, Metlino, Nadyrov Most, Nazarovo*,<br>Novoye Asanovo, Staroye Asanovo]                                                  |
|                                                                                                                                    | 1955–1957                                              | Герасимовка [Gerasimovka]                                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                    | 1958–1961                                              | Подсобное хозяйство треста № 92<br>[Farm of Trust No. 92]                                                                                                                                                                     |
| 1956                                                                                                                               | 1957                                                   | Геологоразведочный поселок [GRP]                                                                                                                                                                                              |
| 1957                                                                                                                               | 1957–1960                                              | Марково* [Markovo*]                                                                                                                                                                                                           |
|                                                                                                                                    | 1958                                                   | Ганино* [Ganino*]                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                    | 1958–1960                                              | Заманиха [Zamanikha]                                                                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                    | 1959–1960                                              | Бакланово, Ветроудуйка*, Дубасово, Паново*, Черепаново<br>[Baklanovo, Vetroduika*, Dubasovo, Panovo*, Cherepanovo]                                                                                                            |
|                                                                                                                                    | 1959–1961                                              | Карпино [Karpino]                                                                                                                                                                                                             |
|                                                                                                                                    | 1960                                                   | Курманово, Прогресс* [Kurmanovo, Progress*]                                                                                                                                                                                   |
|                                                                                                                                    | 1960–1961                                              | 2-я Белоярка, Осолодка [Beloyarka-2, Osolodka]                                                                                                                                                                                |
| Ситуация облучения населения вследствие аварии 1957 года<br>[The 1957 accident]                                                    |                                                        |                                                                                                                                                                                                                               |
| 1957                                                                                                                               | 1957                                                   | Бердяниш, Галикаева, Сатлыково<br>[Berdyanish, Galikaeva, Satlykovo]                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                    | 1957–1958                                              | Кирпичики* [Kirpichiki*]                                                                                                                                                                                                      |
| 1958                                                                                                                               | 1958                                                   | Алабуга, Брюханово*, Горный, Гусево, Игиш, Малое Шабурово*,<br>Русская Караболка, Скориново*, Юго-Конево<br>[Alabuga, Bryukhanovo*, Gornyy, Gusevo, Igish, Maloye Shaburovo*,<br>Russkaya Karabolka, Skorinovo*, Yugo-Konevo] |
|                                                                                                                                    | 1958–1959                                              | Боевское, Кривошеино, Мельниково*, Трошково*, Фадино<br>[Boevskoye, Krivosheino, Melnikovo*, Troshkovo*, Fadino]                                                                                                              |
| 1959                                                                                                                               | 1959–1960                                              | Кажакуль [Kazhakul]                                                                                                                                                                                                           |

\* НП с численностью населения на год издания распорядительного документа менее 200 человек [Settlements where the population is less 200 residents].

### Заключение

Радиоактивное загрязнение населенных территорий Уральского региона в середине прошлого века потребовало выработки радикального решения, направленного на защиту населения от радиационного воздействия – переселение НП. Основные этапы переселения были инициированы в 1954 и в 1957 годах. Однако фактические сроки переселения ряда населенных пунктов были отложены, а процесс переселения затянут во времени. В результате проведенного исследования был разработан метод определения фактического года начала вынужденного переселения представителей УКАОН с радиоактивно загрязненных территорий, а анализ собранной информации позволил определить фактические сроки реализации этой защитной меры.

В представленных в научной литературе результатах исследований эффективности ликвидации последствий радиационных аварий имеются подтверждения негативного влияния принудительной смены привычной среды обитания на состояние здоровья и качество жизни человека [18–22]. Немалая роль в изменении структуры заболеваемости и причин смерти облученного населения отводится такому фактору нерадиационной природы как психоэмоциональный стресс [18–23]. В результате нашего исследования были уточнены фактические сроки принудительного переселения жителей Уральского региона с загрязненных территорий, что позволит более тщательно дифференцировать представителей исследовательской когорты УКАОН по критерию вынужденного переселения с целью дальнейшего изучения влияния факторов радиационной и нерадиационной природы на состояние здоровья облученного населения.

### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Тряпицына С.В. – поиск литературных источников, систематизация, подготовка и анализ первичных материалов исследования, редактирование текста статьи.

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

### Благодарности

Авторы выражают благодарность Н.В. Старцеву, Е.А. Шишкиной, Е.Ю. Буртовой, Л.Ю. Крестининой (сотрудники УНПЦ РМ ФМБА России) за конструктивные предложения при проведении исследования и обсуждении результатов. Авторы признательны А.В. Аклееву (директору УНПЦ РМ ФМБА России) за помощь в проработке концепции исследования, общее и научное руководство. Авторы благодарны рецензентам за проделанную работу.

### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке ФМБА России, в рамках прикладной научно-исследовательской работы «Отдаленные эффекты хронического облучения населения Уральского региона 2025–2027».

### Литература

1. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: Медбиоэкстрем, 2001. 531 с.
2. Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.
3. Челябинская область: ликвидация последствий радиационных аварий / под ред. А.В. Аклеева. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 2006. 344 с.
4. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи / под ред. А.В. Аклеева. Челябинск: Книга, 2016. 390 с.
5. Восточно-Уральский радиоактивный след / под ред. Аклеев А.В., Киселев М.Ф. Челябинск: Фрегат, 2012. 352 р.
6. Аклеев А.В., Дегтева М.О., Крестинина Л.Ю. Сравнительный анализ медико-дозиметрических последствий аварии 1957 г. и загрязнения реки Течи в контексте эффективности защитных мероприятий // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 16–26. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26.
7. Аклеев А.В., Шведов В.Л., Косенко М.М. и др. Опыт изучения медицинских последствий облучения населения при крупных радиационных авариях // Медицина экстремальных ситуаций. 1999. № 2. С. 41–51.
8. Костюченко В.А., Крестинина Л.Ю. Отдаленные последствия облучения у населения, эвакуированного с ВУРС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 1995. № 1. С. 14–18.
9. Kossenko M.M., Ostroumova Y., Akleyev A. et al. Mortality in the offspring of individuals living along the radioactively contaminated Techa River: a descriptive analysis: 4 // Radiation and Environmental Biophysics. 2000. Vol. 39, № 4. P. 219–225.
10. Харюзов Ю.Е., Крестинина Л.Ю., Толстых Е.И., Аклеев А.В. Методология наблюдения и описательный анализ смертности и онкологической заболеваемости в когорте лиц, облучившихся на реке Теча в период внутриутробного развития // Радиация и риск. 2015. Т. 24, № 3. С. 92–104.
11. Экологические и медицинские последствия радиационной аварии 1957 года на ПО «Маяк» / под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. М.: Медбиоэкстрем, 2001. 294 с.
12. Силкин С.С., Крестинина Л.Ю., Старцев Н.В., Аклеев А.В. Уральская когорта аварийно-облученного населения // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. № 3. С. 393–402.
13. Архангельский В.Н. Иванова А.Е., Рыбаковский Л.Л., Рязанцев С.В. Практическая-демография / под ред. Л.Л. Рыбаковского. Москва: ЦСП, 2005. 204 с.
14. Антонова Л.Н. Демография. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. 154 с.
15. Толстиков В.С., Кузнецов В.Н. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы. Екатеринбург: Банк культурной информации, 2017. 400 с.
16. Проблемы ядерного наследия и пути их решения / под общ. ред. Е.В. Евстратова, А.М. Агапова, Н.П. Лаверова и др. М., 2012. Т. 1. 356 с.
17. Последствия техногенного радиационного воздействия и проблемы реабилитации Уральского региона. М.: Комтехпринт, 2002. 204 с.
18. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2020/2021 Report: Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B. UN, 2022.
19. Hori A., Murakami M., Tsubokura M. Against an insufficient intervention for patients with alcoholism or PTSD: An activity report on a psychiatric clinic after the 2011 complex disaster in Fukushima, Japan // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. Vol. 96. P. 103990.
20. Tsuboi M., Sawano T., Nonaka S. et al. Disaster-related deaths after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident – Definition of the term and lessons learned // Environmental Advances. 2022. Vol. 8. P. 100248.

21. The demography of disasters: Impacts for population and place / Ed. D. Karácsonyi, A. Taylor, D. Bird. Cham: Springer International Publishing, 2021.
22. Маленченко А.Ф., Сушко С.Н. Неопределенности оценки радиационного риска в условиях сочетанного действия ионизирующего излучения с факторами нерадиационной природы // Проблемы здоровья и экологии. 2006. Т. 3, № 9. С. 22–29.

23. Константинов Ю.О. Защита населения при крупномасштабной радиационной аварии: ослабление негативных социальных последствий защитных мероприятий. Часть 1. Интерпретация дозовых характеристик аварийной ситуации // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2 (Спецвыпуск). С. 20–30.

Поступила: 18.04.2025

**Тряпицына Светлана Васильевна** – исполняющая обязанности младшего научного сотрудника отдела «База данных «Человек»» Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: svt174@list.ru  
ORCID: 0009-0008-5701-3693

**Кравцова Ольга Сергеевна** – кандидат биологических наук, исполняющая обязанности ведущего научного сотрудника 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  
ORCID: 0009-0008-5543-5411

**Для цитирования:** Тряпицына С.В., Кравцова О.С. Определение фактических сроков вынужденного переселения представителей Уральской когорты аварийно-облученного населения с радиоактивно загрязненных территорий // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 37–46. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-37-46

## Determination of the actual term of relocation of representatives of the Ural cohort of accidentally irradiated population from radioactively contaminated territories

Svetlana V. Tryapitsyna<sup>1</sup>, Olga S. Kravtsova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> 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 main effective radiation protection measures, in addition to decontamination measures and limiting the consumption of food products of local origin, include the evacuation and resettlement of residents. Nevertheless, forced changes in usual habitat of residents can have a negative impact on the quality of their life. The study of the impact of radiation and non-radiation factors on the health of the exposed population requires classifying for the studied cohort by the criterion of forced relocation (relocation due to implementation of radiation protection measure). However, the quality of retrospective information and the specifics of the implementation of this action do not always unambiguously allow to determine the moment of time when displacement of residents from radioactively contaminated territories actually began. The purpose of this study is to determine the actual term of relocation of settlements whose residents are included in the Ural cohort of accidentally irradiated population. Materials and methods: The main source of information in this study was the medical-dosimetric database on exposed residents of radioactively contaminated territories due to two situations: discharges of liquid radioactive waste from a chemical plant in the late 1940s and early 1950s into the Techa River and the 1957 radiation accident at the same plant. The study cohort numbered approximately 63,000 people. Establishing criteria for forced relocation has been carried out using methods of demographic analysis of the collected data, and time frames of relocation has been determined using historical materials. Results and Discussion: The migration activity of residents between 1950 and 1960 has been studied for the two radiation situations. The net migration rate per year has been determined as a basic criterion (minus 100 ‰ for relatively large- and medium-sized settlements, minus 150 ‰ for small ones). The year of the beginning of the forced resettlement of residents and the year of the end of the resettlement have been determined for each resettled settlement. Conclusion: The study of migration processes allowed to define the criterion for forced relocation and determine actual time frames for the implementation of the protective action in relation to members of the cohort.*

**Key words:** protective actions, Ural cohort of accidentally irradiated population, Techa River, East Ural Radioactive Trace.

**Svetlana V. Tryapitsyna**

Urals Research Center for Radiation Medicine

**Address for correspondence:** Vorovsky Str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: svt174@list.ru

### Authors' personal contribution

Tryapitsyna S.V. – search for literature sources, systematization, preparation and analysis of primary research materials, editing the text of the article.

Kravtsova O.S. – analysis of information sources, generalization and processing of research materials, carrying out calculations, analysis of the results, writing the text of the article.

### Acknowledgments

The authors express their gratitude and appreciation to N.V. Startsev, E.A. Shishkina, E.Y. Burtovaya, and L.Yu. Krestinina (employees of the URCRM FMBA of Russia) for constructive suggestions in conducting the study and discussing the results. The authors are grateful to A.V. Akleyev (Director of the URCRM FMBA of Russia) for his help in elaboration of the study concept, general and scientific guidance. The authors thank the reviewers for their work.

### Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

### Sources of funding

The work was carried out with financial support of the FMBA of Russia, within the framework of applied research work “Long-term effects of chronic irradiation of the population of the Ural region 2025-2027”.

### References

1. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa River / Ed. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 531 p. (In Russian).
2. Aleksakhin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, Drozhko EG, Ilyin LA, Kryshev II, et al. Large-scale radiation accidents: consequences and protective measures. Moscow: IzdAT; 2001. 752 p. (In Russian).
3. Chelyabinsk region: Liquidation of consequences of radiation accidents / Ed. Akleyev AV. Chelyabinsk: South-Ural Book Publishing House; 2006. 344 p. (In Russian).
4. Consequences of radioactive contamination of the Techa River / Ed. Akleyev AV. Chelyabinsk: Kniga; 2016. 390 p. (In Russian).
5. East-Urals radioactive trace / Ed. Akleyev AV, Kiselev MF. Chelyabinsk: Fregat; 2012. 352 p. (In Russian).
6. Akleyev AV, Krestinina LYu, Degteva MO. Comparative analysis of medical and dosimetric consequences of the 1957 accident and contamination of the Techa river from the perspective of protective measures efficiency. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 16-26. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-16-26.
7. Akleyev AV, Shvedov VL, Kosenko MM, Degtyareva MO, Startsev NV, Kostyuchenko VA, et al. Experience in studying the medical consequences of population exposure to radiation during major radiation accidents. *Meditsina ekstremnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 1999;(2): 41–51. (In Russian).
8. Kostyuchenko VA, Krestinina LYu. Remote consequences of irradiation in the population evacuated from EURT. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 1995;(1): 14–18. (In Russian).
9. Kosenko MM, Ostroumova Y, Akleyev A, Startsev N, Degteva M, Granath F, et al. Mortality in the offspring of individuals living along the radioactively contaminated Techa River: a descriptive analysis. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2000;39(4): 219–225.
10. Kharyuzov YuE, Krestinina LYu, Tolstykh EI, Akleyev AV. Follow-up methodology and analysis of mortality and cancer incidence in the cohort of people in utero exposed to radiation as a result of radioactive contamination of environment and the Techa River. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2015; 24(3): 92–104. (In Russian).
11. Ecological and medical consequences of the 1957 radiation accident at Mayak PA / Ed. Akleyev AV, Kiselev MF. Moscow: Medbioekstrem; 2001. 294 p. (In Russian).
12. Silkin SS, Krestinina LYu, Startsev NV, Akleyev AV. Ural cohort of emergency-irradiated population. *Meditsina ekstremnykh situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21(3): 393–402. (In Russian).
13. Arkhangel'sky VN, Ivanova AE, Rybakovsky LL, Ryazantsev SV. Practical demography. Moscow: CSP; 2005. 204 p. (In Russian).
14. Antonova LN. Demography. Ekaterinburg: Publishing House of the Ural University; 2014. 154 p. (In Russian).
15. Tolstikov VS, Kuznetsov VN. Nuclear Heritage in the Urals: Historical Assessments and Documents: Nuclear Cities of the Urals. Ekaterinburg: Bank of cultural information; 2017. 400 p. (In Russian).
16. Problems of Nuclear Heritage and Ways to Solve Them / Ed. Evstratov EV, Agapov AM, Laverov NP, Bolshov LA, Linge II. Moscow: Energopromanalitika; 2012. 356 p. (In Russian).
17. Consequences of technogenic radiation exposure and the problem of rehabilitation of the Ural region. Moscow: Komtechprint; 2002. 204 p. (In Russian).
18. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes A and B. UN; 2022.
19. Hori A, Murakami M, Tsubokura M. Against an insufficient intervention for patients with alcoholism or PTSD: An activity report on a psychiatric clinic after the 2011 complex disaster in Fukushima, Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023;96: 103990.
20. Tsuboi M, Sawano T, Nonaka S, Hori A, Ozaki A, Nishikawa Yo, et al. Disaster-related deaths after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident – Definition of the term and lessons learned. *Environmental Advances*. 2022;8: 100248.
21. The Demography of Disasters: Impacts for Population and Place / Ed. Karácsonyi D, Taylor A, Bird D. Cham: Springer International Publishing; 2021.
22. Malenchenko AF, Sushko SN. Uncertainties of radiation risk assessment in the conditions of the combined ionizing radiation effect with the non-radiation nature factors. *Problemy zdorovia i ekologii = Problems of health and ecology*. 2006;3(9): 22–29. (In Russian).
23. Konstantinov YuO. Protection of the public in a large-scale radiation accident: mitigation of negative social consequences of protective actions. Part 1. Interpretation of dose characteristics of emergency. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2, special issue): 20–30. (In Russian).

Received: April 18, 2025

**For correspondence: Svetlana V. Tryapitsyna** – Junior Researcher of “Database “Man” Department, Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency (Vorovsky Str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: svt174@list.ru) ORCID: 0009-0008-5701-3693

**Olga S. Kravtsova** – 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 ORCID: 0009-0008-5543-5411

**For citation: Tryapitsyna S.V., Kravtsova O.S. Determination of the actual term of relocation of representatives of the Ural cohort of accidentally irradiated population from radioactively contaminated territories. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 37–46. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-37-46**



## Оценка адекватности действующих подходов к проведению индивидуального дозиметрического контроля персонала

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

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

*Широкий диапазон задач, стоящих при организации и проведении досмотра, привёл к разработке большого количества моделей лучевых досмотровых установок, различающихся областью применения и характеристиками входящих в их состав источников ионизирующего излучения. По данным радиационно-гигиенической паспортизации в Российской Федерации в 2023 году использовалось 7 095 досмотровых рентгеновских установок. Большой аппаратный парк и отсутствие специального нормативно-методического документа, разъясняющего вопросы организации и проведения индивидуального дозиметрического контроля персонала, обеспечивающего работу рентгеновских установок по досмотру багажа и товаров, побудили к проведению исследования по оценке адекватности действующих подходов к оценке доз персонала. Материалы и методы: Проведён производственный радиационный контроль рабочих мест операторов 11 рентгеновских установок для досмотра багажа и товаров различных моделей. Представлены результаты индивидуального дозиметрического контроля персонала, обеспечивающего работу рентгеновских установок для досмотра багажа и товаров, с помощью индивидуальных термолюминесцентных дозиметров. Результаты и обсуждение: Представленные модели рентгеновских установок в условиях нормальной эксплуатации не представляют радиационной опасности для персонала и населения. Среднее значение индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  у операторов лучевых досмотровых установок практически соответствует его значению для природной фоновой компоненты дозы — техногенная компонента дозы облучения пренебрежимо мала. Для всех рассматриваемых моделей рентгеновских установок среднее значение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на рабочих местах операторов составляло: 0,14 мкЗв/ч и 0,13 мкЗв/ч для операторов рентгеновских установок для досмотра багажа и товаров 1-го и 2-го типа соответственно. Таким образом, по результатам производственного радиационного контроля представленных моделей рентгеновских установок и результатам индивидуального дозиметрического контроля можно сделать вывод о должном соблюдении условий радиационной безопасности в поле излучения этих источников для операторов и лиц, не отнесённых к персоналу.*

**Ключевые слова:** лучевые досмотровые установки, индивидуальный дозиметрический контроль, производственный радиационный контроль, индивидуальный эквивалент дозы.

### Введение

Досмотр багажа, товаров и пассажиров с помощью лучевых досмотровых установок (ЛДУ) является неотъемлемой частью мероприятий по обеспечению безопасности организованных перевозок населения и грузов, проведения массовых мероприятий, а также обеспечивает экономическую безопасность, препятствуя перевозке запрещённых и контрафактных товаров через государственную границу [1]. Широкий диапазон задач, стоящих при организации и проведении досмотра, привёл к разработке большого количества моделей ЛДУ, различающихся областью применения и характеристиками входящих в их состав источников ионизирующего излучения (ИИИ) [2]. По данным радиационно-гигиенической паспортизации в Российской Федерации

в 2023 году использовалось 7 095 досмотровых рентгеновских установок [3]. На рисунке 1 представлена динамика изменения численности досмотровых рентгеновских установок по данным радиационно-гигиенической паспортизации в Российской Федерации за период 2013–2023 гг. [3–13].

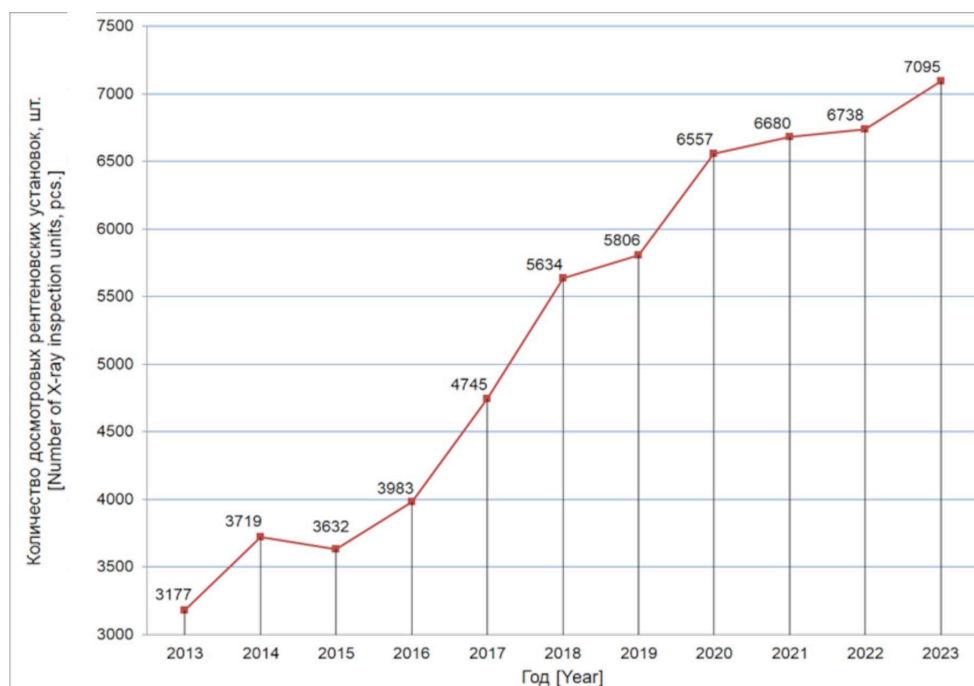
За последние 11 лет количество досмотровых рентгеновских установок в Российской Федерации увеличилось более чем в 2 раза. С расширением аппаратного парка увеличилось количество персонала, обеспечивающего работу досмотровых установок. Для данных лиц надлежащим образом должен быть организован и проведён контроль профессионального облучения для достоверного определения доз облучения персонала и подтверждения, что техногенный ИИИ находится под контролем.

**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@niirg.ru





**Рис. 1.** Количество досмотровых рентгеновских установок в Российской Федерации по данным [3–13]  
**[Fig. 1.** Number of X-ray inspection units in the Russian Federation according to data from [3–13]]

Подтверждение выполнения соответствия организации рабочего процесса установленным требованиям НРБ-99/2009<sup>1</sup> и ОСПОРБ-99/2010<sup>2</sup> осуществляется посредством радиационного контроля, включающего производственный радиационный контроль и индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК). Для организации проведения производственного радиационного контроля утверждены методические документы МУК 2.6.1.3731-21 «Радиационный контроль лучевых досмотровых установок»<sup>3</sup> и МР 2.6.1.0334-23 «Проведение радиационного контроля при использовании рентгеновских сканеров для персонального досмотра людей»<sup>4</sup>, а в отношении организации ИДК для персонала, обеспечивающего работу ЛДУ, методических документов нет. Поэтому в большинстве случаев при организации и проведении ИДК подконтрольные организации и аккредитованные лаборатории в вопросах выбора необходимых операционных величин [14–19], количества индивидуальных дозиметров на

одного работника, места их расположения на рабочей форме работника, периодичности проводимого контроля, а также трактовки полученных результатов измерений руководствуются положениями действующих для персонала медицинских организаций МУ 2.6.1.3015-12 «Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций»<sup>5</sup>. Из этого следует, что к различным специальностям и профессиональным отраслям применяются одинаковые методические подходы в организации и проведении ИДК, которые не учитывают сценарии облучения и специфику работы всех специальностей при различных условиях работы. Использование МУ 2.6.1.3015-12 к другим отраслям деятельности является некорректным также с юридическими позиций. Научная информация по оценке адекватности подходов в организации и проведении ИДК для операторов ЛДУ в отечественных научных публикациях также практически не представлена.

<sup>1</sup> 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.)].

<sup>2</sup> 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. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 11 августа 2010 г., регистрационный № 18115 [Basic sanitary rules for the provision of radiation safety (OSPORB 99/2010). Sanitary rules and norms SP 2.6.1.2612-10. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 26.04.2010 No. 40. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 11, 2010, registration No. 18115. (In Russ.)].

<sup>3</sup> Методические указания МУК 2.6.1.3731-21 Радиационный контроль лучевых досмотровых установок. М.: Роспотребнадзор, 2021. 13 с. [Methodical guidelines MUK 2.6.1.3731-21 Radiation monitoring of radiation inspection installations. Moscow: Rospotrebnadzor; 2021. 13 p. (In Russ.)].

<sup>4</sup> Методические рекомендации 2.6.1.0334-23 Проведение радиационного контроля при использовании рентгеновских сканеров для персонального досмотра людей. М.: Роспотребнадзор, 2023. 10 с. [Methodological recommendations 2.6.1.0334-23 Conducting radiation monitoring when using X-ray scanners for personal search of people. Moscow: Rospotrebnadzor; 2023. 10 p. (In Russ.)].

<sup>5</sup> МУ 2.6.1.3015-12. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 3. С. 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.)].

**Цель исследования** – оценка адекватности существующих подходов к организации и проведению индивидуального дозиметрического контроля для персонала, обеспечивающего работу досмотровых рентгеновских установок.

### Задачи исследования

1. Выбор объектов для проведения производственного радиационного контроля и индивидуального дозиметрического контроля;
2. Проведение практических измерений мощности амбиентного эквивалента дозы и индивидуального эквивалента дозы облучения персонала по согласованному списку организаций;
3. Анализ результатов измерений индивидуальных эквивалентов доз персонала, работающего на лучевых досмотровых установках;
4. Составление рекомендаций по организации и проведению индивидуального дозиметрического контроля для этой группы персонала.

### Материалы и методы

#### Объект контроля и объём исследования

При организации работы была использована классификация ЛДУ, основанная на используемых ИИИ, из СанПиН 2.6.1.3488-17<sup>6</sup>:

1. Рентгеновские установки для досмотра багажа и товаров, содержащие источник рентгеновского излучения (РУДБТ);
2. Инспекционно-досмотровые комплексы, содержащие импульсные ускорители электронов;
3. ЛДУ, содержащие радионуклидные или генерирующие источники нейтронов (НЛДУ).

В исследование были включены 11 установок РУДБТ следующих моделей:

- интроскоп рентгенотелевизионный конвейерного типа ТС-СКАН 6040;
- рентгенотелевизионная досмотровая установка HI-SCAN 145180;
- система рентгеновской инспекции «ПРОДИС.ЭЛЕКТРО»;
- настольная система микротомографии «ПРОДИС.КОМПАКТ».

Необходимо отметить, что все РУДБТ были представлены комплексами с закрытым досмотровым туннелем для рентгеновского контроля объектов, конструкция которых способна обеспечить надёжную радиационную защиту персонала и населения. То есть защита, предусмотренная на этапе создания и приёмки самого комплекса, должна обеспечивать не превышение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) рентгеновского излучения более 2,5 мкЗв/ч на расстоянии 0,1 м от внешней поверхности установки и более 0,5 мкЗв/ч на рабочих местах лиц, не от-

несённых к персоналу групп А и Б при всех возможных сценариях эксплуатации установок.

В зависимости от движения объекта контроля выделяют два типа РУДБТ:

- РУДБТ 1-го типа – движущийся объект контроля, облучение производится узким веерообразным пучком. Возможно использование нескольких пучков рентгеновского излучения различной энергии и/или направленности. Некоторые установки работают по принципу спиральной томографии и способны создавать 3D-изображение контролируемого объекта;
- РУДБТ 2-го типа – объект контроля остаётся неподвижным, облучение производится широким конусообразным пучком.

Инструментальные исследования, проводимые в рамках настоящей работы, были выполнены в соответствии с МУК 2.6.1.3731-21 «Радиационный контроль лучевых досмотровых установок» и МУ 2.6.1.3015-12 «Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций» с применением средств измерений утверждённого типа, внесённых в государственный реестр средств измерений и имеющих действующее свидетельство о поверке. Все измерения были выполнены в соответствии с требованиями к проведению измерений для аккредитованных испытательных лабораторий.

Измерения МАЭД фотонного излучения были выполнены с помощью дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123<sup>7</sup>. Дозиметр измеряет МАЭД в диапазоне от 50 нЗв/ч до 10 Зв/ч и дозу непрерывного, кратковременно действующего непрерывного и импульсного рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне от 0,1 нЗв до 100 Зв. Дозиметр способен достоверно регистрировать измеряемые параметры рентгеновского и гамма-излучения в диапазонах энергий: от 15 кэВ до 3 МэВ для режимов измерения непрерывного и кратковременно действующего непрерывного излучения; от 15 кэВ до 10 МэВ – для режима измерения импульсного излучения.

Измерения индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  были выполнены методом термолюминесцентной дозиметрии с использованием индивидуальных термолюминесцентных дозиметров типа DTU-1, откалиброванных в терминах индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  в поле источника гамма-излучения ( $^{137}\text{Cs}$ ). Индивидуальный термолюминесцентный дозиметр (ТЛ-дозиметр) представляет собой корпус (кассету), выполненный из тканеэквивалентного материала (1000 мг/см<sup>2</sup>), внутри которого размещены два детектора ДТГ-4<sup>8</sup>. Детектор ДТГ-4 представляет собой кристалл фторида лития, активированного магнием и титаном (LiF: Mg, Ti). Диапазон измерения индивидуального эквивалента дозы фотонного излучения  $H_p(10)$  составлял от 20 мкЗв до 10 Зв для энергий фотонного излучения от 15 кэВ до 18,0 МэВ. Считывание показаний с экспонированных индивидуальных ТЛ-дозиметров проводилось на термолюминесцентной дозиметрической установке Harshaw (США). Основная погрешность при проведении измерений не превышала 20 %.

<sup>6</sup> СанПиН 2.6.1.3488-17 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с лучевыми досмотровыми установками» утверждённые постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 04.09.2017 № 124, зарегистрировано Минюстом России 14.11, регистрационный номер 48883 [SanPIN 2.6.1.3488-17 "Hygienic requirements for ensuring radiation safety when handling radiation inspection units" approved by the decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 09.04.2017 No. 124, registered by the Ministry of Justice of Russia on 11/14, registration number 48883 (In Russ.)].

<sup>7</sup> Дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123. Руководство по эксплуатации ТИАЯ.412118.012 РЭ [X-ray and gamma radiation dosimeter DKS-AT1123. Operation manual ТИАЯ.412118.012 РЭ (In Russ.)].

<sup>8</sup> Термолюминесцентные монокристаллические детекторы ДТГ-4. Паспорт ТУ 95 2511-94 [Thermoluminescent monocrystalline detectors DTG-4. Passport TU 95 2511-94 (In Russ.)].

Инспекционно-досмотровые комплексы и НЛДУ в исследование не были включены из-за недостаточной достоверности существующих средств измерения для данных условий облучения. Измерение МАЭД для импульсных ИИИ высоких энергий до сих пор является нерешённой задачей в практике производственного радиационного контроля [20].

#### Измеряемые параметры и условия проведения измерений

1. Для интроскопа рентгентелевизионный конвейерного типа ТС-СКАН 6040 и рентгентелевизионной досмотровой установки HI-SCAN 145180 измерения МАЭД непрерывного рентгеновского излучения проводились с имитатором объекта контроля (бутылка воды объёмом 5 л) по периметру ЛДУ при  $U_a = 160$  кВ:

а) на всех доступных поверхностях объекта исследования (на расстоянии 0,1 м от поверхности) в контрольных точках, намеченных после предварительного сканирования интроскопа дозиметром в поисковом режиме;

б) на рабочем месте оператора на высоте 70 см от пола.

2. Для системы рентгеновской инспекции «ПРОДИС.ЭЛЕКТРО» измерения МАЭД непрерывного рентгеновского излучения проводились с имитатором объекта контроля при  $U_a = 150$  кВ и  $I_a = 150$  мкА:

а) измерения проводились на всех доступных поверхностях объекта исследования (на расстоянии 0,1 м от поверхности) в контрольных точках, намеченных после предварительного сканирования установки дозиметром в поисковом режиме;

б) измерения проводились на рабочем месте оператора на 70 см от поверхности пола.

3. Для настольной системы микротомографии «ПРОДИС.КОМПАКТ» измерения МАЭД непрерывного рентгеновского излучения проводились с имитатором объекта контроля при  $U_a = 130$  кВ и  $I_a = 250$  мкА:

а) измерения проводились на всех доступных поверхностях объекта исследования (на расстоянии 0,1 м от поверхности) в контрольных точках, намеченных после предварительного сканирования установки дозиметром в поисковом режиме;

б) измерения проводились на рабочем месте оператора на 70 см от поверхности пола.

В части индивидуального дозиметрического контроля были выполнены квартальные измерения значений  $H_p(10)$  у 31 человека из числа штатного персонала двух организаций из Санкт-Петербурга и 922 разовых измерения индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  – для лиц, привлечённых к обеспечению досмотра в период подготовки и проведения массовых мероприятий. Индивидуальный ТЛ-дозиметр размещался на рабочей одежде персонала на уровне груди слева (нагрудный карман).

Анализ полученных данных был проведён с помощью пакетов для статистической обработки данных Statistica 10 и MS Excel.

### Результаты и обсуждение

Анализ данных, полученных в результате проведения производственного радиационного контроля рабочих мест операторов РУДБТ различных моделей и результатов ИДК персонала, обеспечивающего работу РУДБТ, показал, что в условиях нормальной эксплуатации установки не представляют радиационной опасности для персонала и населения.

Для всех рассматриваемых в исследовании моделей РУДБТ по результатам производственного радиационного контроля среднее значение МАЭД фотонного излучения на рабочих местах операторов составляло:

- 0,14 мкЗв/ч (максимальное – 0,15 мкЗв/ч, минимальное – 0,12 мкЗв/ч) для операторов РУДБТ 1-го типа;
- 0,13 мкЗв/ч (максимальное – 0,14 мкЗв/ч, минимальное 0,12 мкЗв/ч) для операторов РУДБТ 2-го типа.

Полученные значения оказались всего лишь менее чем на 20 % выше фоновых значений мощности дозы природного гамма-излучения в Санкт-Петербурге [21].

В ходе радиационного контроля не было обнаружено мест превышения установленных нормативов ни в одной точке измерения по границе зоны ограничения доступа или на расстоянии 0,1 м от внешней поверхности установок и в контрольных точках.

Индивидуальный дозиметрический контроль был проведён для 31 сотрудника двух организаций, занимающихся досмотром багажа и товаров. Данные сотрудники были включены в штат и отнесены к персоналу группы А. Результаты ИДК, проводившегося в течение года, представлены в таблице.

Таблица

**Результаты индивидуального дозиметрического контроля штатного персонала, обеспечивающего работу РУДБТ**

[Table

**Results of individual dosimetric monitoring of regular personnel ensuring the operation of the X-ray systems for inspection of baggage and goods]**

| № п/п<br>[Item No.] | Специальность<br>[Speciality]                                       | $H_p(10)$ , мЗв (без вычитания природной фоновой компоненты)<br>[ $H_p(10)$ , mSv (without subtracting the natural background component)] |                            |                            |                            |               |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
|                     |                                                                     | 1 квартал<br>[1st quarter]                                                                                                                | 2 квартал<br>[2nd quarter] | 3 квартал<br>[3rd quarter] | 4 квартал<br>[4th quarter] | Год<br>[Year] |
| 1                   | Ответственный за РБ*<br>[Employee responsible for radiation safety] | 0,11                                                                                                                                      | 0,13                       | 0,11                       | 0,32                       | 0,67          |
| 2                   | Ответственный за РБ<br>[Employee responsible for radiation safety]  | 0,12                                                                                                                                      | 0,10                       | 0,11                       | –                          | 0,33          |
| 3                   | Оператор [Operator]**                                               | 0,10                                                                                                                                      | 0,23                       | 0,22                       | –                          | 0,55          |

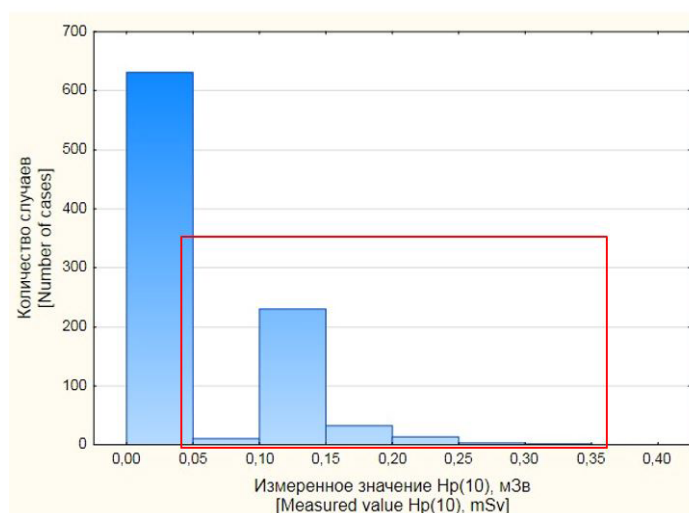
| № п/п<br>[Item No.] | Специальность<br>[Speciality] | H <sub>p</sub> (10), мЗв (без вычитания природной фоновой компоненты)<br>[H <sub>p</sub> (10), mSv (without subtracting the natural background component)] |                            |                            |                            |               |
|---------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------|
|                     |                               | 1 квартал<br>[1st quarter]                                                                                                                                 | 2 квартал<br>[2nd quarter] | 3 квартал<br>[3rd quarter] | 4 квартал<br>[4th quarter] | Год<br>[Year] |
| 4                   | Оператор [Operator]           | 0,11                                                                                                                                                       | –                          | 0,11                       | –                          | 0,22          |
| 5                   | Оператор [Operator]           | 0,12                                                                                                                                                       | 0,24                       | 0,23                       | 0,24                       | 0,83          |
| 6                   | Оператор [Operator]           | 0,10                                                                                                                                                       | 0,14                       | 0,20                       | 0,35                       | 0,79          |
| 7                   | Оператор [Operator]           | 0,12                                                                                                                                                       | 0,21                       | 0,20                       | 0,26                       | 0,79          |
| 8                   | Оператор [Operator]           | 0,11                                                                                                                                                       | 0,28                       | 0,24                       | 0,34                       | 0,97          |
| 9                   | Оператор [Operator]           | 0,11                                                                                                                                                       | 0,11                       | 0,24                       | –                          | 0,46          |
| 10                  | Оператор [Operator]           | 0,11                                                                                                                                                       | 0,13                       | 0,16                       | 0,22                       | 0,62          |
| 11                  | Оператор [Operator]           | 0,13                                                                                                                                                       | 0,14                       | 0,17                       | 0,23                       | 0,67          |
| 12                  | Оператор [Operator]           | 0,13                                                                                                                                                       | 0,17                       | 0,15                       | –                          | 0,45          |
| 13                  | Оператор [Operator]           | 0,11                                                                                                                                                       | 0,15                       | –                          | –                          | 0,26          |
| 14                  | Оператор [Operator]           | 0,12                                                                                                                                                       | 0,11                       | –                          | –                          | 0,23          |
| 15                  | Оператор [Operator]           | –                                                                                                                                                          | –                          | 0,18                       | 0,22                       | 0,40          |
| 16                  | Оператор [Operator]           | –                                                                                                                                                          | –                          | 0,14                       | 0,23                       | 0,37          |
| 17                  | Оператор [Operator]           | –                                                                                                                                                          | –                          | –                          | 0,16                       | 0,16          |
| 18                  | Оператор [Operator]           | 0,20                                                                                                                                                       | 0,16                       | 0,24                       | 0,17                       | 0,77          |
| 19                  | Оператор [Operator]           | 0,23                                                                                                                                                       | 0,23                       | 0,27                       | –                          | 0,73          |
| 20                  | Оператор [Operator]           | 0,19                                                                                                                                                       | 0,24                       | 0,22                       | 0,27                       | 0,92          |
| 21                  | Оператор [Operator]           | 0,27                                                                                                                                                       | –                          | –                          | –                          | 0,27          |
| 22                  | Оператор [Operator]           | 0,24                                                                                                                                                       | 0,22                       | 0,27                       | 0,20                       | 0,93          |
| 23                  | Оператор [Operator]           | 0,28                                                                                                                                                       | 0,22                       | 0,41                       | 0,26                       | 1,17          |
| 24                  | Оператор [Operator]           | 0,17                                                                                                                                                       | 0,18                       | 0,21                       | 0,24                       | 0,80          |
| 25                  | Оператор [Operator]           | 0,22                                                                                                                                                       | 0,20                       | 0,25                       | 0,22                       | 0,89          |
| 26                  | Оператор [Operator]           | 0,23                                                                                                                                                       | 0,25                       | 0,28                       | 0,23                       | 0,99          |
| 27                  | Оператор [Operator]           | 0,20                                                                                                                                                       | 0,17                       | 0,22                       | 0,19                       | 0,78          |
| 28                  | Оператор [Operator]           | 0,23                                                                                                                                                       | 0,26                       | 0,31                       | 0,22                       | 1,02          |
| 29                  | Оператор [Operator]           | 0,28                                                                                                                                                       | 0,25                       | 0,28                       | 0,17                       | 0,98          |
| 30                  | Оператор [Operator]           | –                                                                                                                                                          | 0,28                       | 0,36                       | 0,25                       | 0,89          |
| 31                  | Оператор [Operator]           | –                                                                                                                                                          | –                          | –                          | 0,17                       | 0,17          |

\* – Радиационная безопасность [Radiation safety].

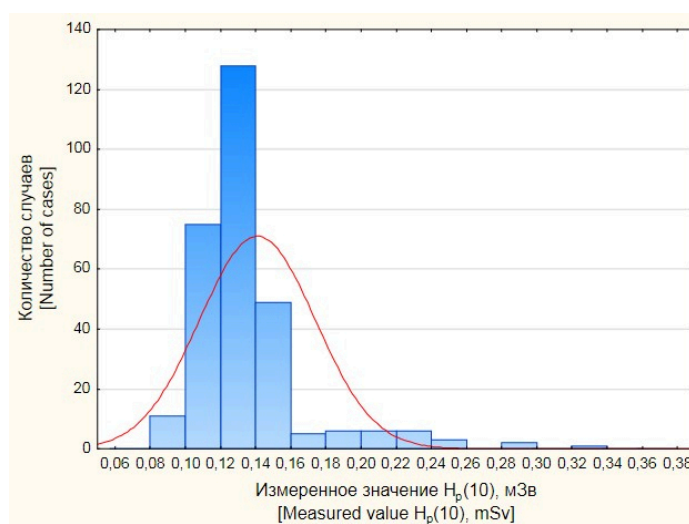
\*\* – Оператор РУДБТ [X-ray systems for inspection of baggage and goods Operator].

С учётом исключения из анализа персонала, который по различным причинам пропустил измерения индивидуального эквивалента дозы один и более кварталов, осталось 17 сотрудников, ИДК которым проводился весь год. Среднее значение годовой дозы для них составляло 0,86 мЗв (минимальное значение – 0,62 мЗв, максимальное значение – 1,17 мЗв). При этом необходимо учитывать, что представленные данные указаны без вычитания природной фоновой компоненты, которая в Санкт-Петербурге, где размещены ЛДУ двух представленных организаций, находится на уровне 0,88 мЗв/год [21]. Таким образом, техногенная компонента дозы облучения этих сотрудников практически равна нулю.

Разовые измерения индивидуального эквивалента дозы для персонала, привлеченного к обеспечению досмотра в период подготовки и проведения массовых мероприятий, по полученным результатам можно поделить на две группы. В первой группе, включающей 631 измерение, полученные значения были пренебрежимо малы (менее 0,10 мЗв). Наглядно разброс полученных значений всей выборки представлен на рисунке 2. Ко второй группе отнесено 291 измерение, значение измерений данной группы выше 0,10 мЗв (на рис. 2 эта группа выделена рамкой). Распределение результатов этих измерений отдельно масштабировано на рисунке 3.



**Рис. 2.** Распределение полученных значений  $H_p(10)$  для лиц, привлечённых к обеспечению досмотра  
**[Fig. 2.** Distribution of the obtained values of  $H_p(10)$  for persons involved in ensuring the inspection]



**Рис. 3.** Подробное распределение  $H_p(10)$  со значениями более 0,10 мЗв  
**[Fig. 3.** Detailed distribution of  $H_p(10)$  with values greater than 0.10 mSv]

При анализе результатов второй выделенной группы среднее измеренное значение составило 0,14 мЗв (максимальное значение – 0,34 мЗв, минимальное значение – 0,10 мЗв).

Среднее значение индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  у операторов РУДБТ, согласно измерениям с помощью индивидуальных ТЛ-дозиметров, практически соответствует его значению для природной фоновой компоненты дозы, что хорошо согласуется с результатами независимых измерений МАЭД гамма-излучения.

Таким образом, по результатам производственного радиационного контроля представленных моделей РУДБТ можно сделать вывод о должном соблюдении условий радиационной безопасности в поле излучения этих источников для операторов и лиц, не отнесённых к персоналу.

### Закключение

Несмотря на отсутствие нормативно-методического документа, регламентирующего проведение ИДК персонала, обеспечивающего работу РУДБТ, существующая организация такого контроля адекватна. Защита, предусмотренная на этапе

создания и приёмки самого комплекса РУДБТ конструктивно способна обеспечить надёжную радиационную защиту персонала и населения и обеспечивает не превышение МАЭД рентгеновского излучения более 2,5 мкЗв/ч на расстоянии 0,1 м от внешней поверхности установки и более 0,5 мкЗв/ч на рабочих местах лиц, не отнесённых к персоналу групп А и Б при всех возможных сценариях эксплуатации установок. При организации ИДК для персонала, обеспечивающего работу РУДБТ, достаточно применять общие принципы к такому контролю и культуру радиационной безопасности:

1. Экспонирование индивидуальных ТЛ-дозиметров в течение всего периода времени работы с ИИИ.
2. Недопущение использования одного индивидуального ТЛ-дозиметра разными лицами или обмен дозиметрами между персоналом.
3. Расположение индивидуального ТЛ-дозиметра на рабочей одежде персонала на уровне груди (нагрудный карман).
4. Недопущение умышленного или неумышленного облучения индивидуального ТЛ-дозиметра персоналом.

Изучение вопросов организации ИДК для операторов других типов ЛДУ (инспекционно-досмотровые комплексы



и НЛДУ) будет продолжено для сбора и анализа информации, необходимой для подготовки нового нормативно-методического документа, регламентирующего вопросы ИДК для различных отраслей деятельности.

#### 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 журнал.

Шлеенкова Е.Н. провела литературный поиск, осуществила подготовку средств измерения и выполнил градуировку детекторов, выполнила измерения индивидуальных эквивалентов доз, отредактировала промежуточный вариант рукописи.

Богатырёва В.Ю. провела литературный поиск и выполнила группировку и структурирование полученных данных.

Некрасов В.А. выполнил измерения мощности Ambient-ного эквивалента дозы.

#### 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. Романович И.К., Барковский А.Н., Титов Н.В. и др. Обеспечение радиационной безопасности и противодействие радиационному терроризму при проведении массовых спортивных мероприятий: монография / под ред. академика РАН Г.Г. Онищенко и профессора А.Ю. Поповой. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2016. 364 с.
2. Барковский А.Н., Воробьев Б.Ф., Добренякин Ю.П. и др. Обеспечение радиационной безопасности при использовании лучевых досмотровых установок и лучевых сканеров для персонального досмотра людей // Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 4. С. 37-41.
3. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2023 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: ФБУЗ ФЦГиЭ Роспотребнадзора, 2024. 122 с.
4. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2013 г. (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014.
5. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2014 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. 134 с.
6. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2015 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2016. 125 с.
7. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2016 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2017. 126 с.
8. 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.
9. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2018 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. 130 с.
10. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 136 с.
11. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. 135 с.
12. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год: Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2022. 132 с.
13. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 год: радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2023. 130 с.
14. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. IAEA, 2014.
15. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No (2-4).
16. 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.
17. ICRU. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988.
18. ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. 1993b.
19. ICRU. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD. 1988.
20. Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметрия импульсного излучения // АНРИ. 2018. Т. 92. № 1. С. 2-11.
21. Бажин С.Ю., Кайдановский Г.Н. Учёт вклада природного фона при контроле индивидуальных доз персонала // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 122-128. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-122-128.

Поступила: 18.03.2025

**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  
ORCID: 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 служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0009-0006-6391-1639

**Богатырёва Виктория Юрьевна** – младший научный сотрудник лаборатории радиационного контроля Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральной служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0009-0003-6863-5192

**Некрасов Владислав Аркадьевич** – младший научный сотрудник лаборатории внешнего облучения Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральной служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Бажин С.Ю., Шлеенкова Е.Н., Богатырёва В.Ю., Некрасов В.А. Оценка адекватности действующих подходов к проведению индивидуального дозиметрического контроля персонала // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 47–55. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-47-55

## Assessment of the adequacy of current approaches to individual dosimetric monitoring for personnel

Stepan Yu. Bazhin, Ekaterina N. Shleenkova, Victoria Yu. Bogatyreva, Vladislav A. Nekrasov

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

*A wide range of tasks associated with organizing and conducting inspections has led to the development of a large number of models of beam inspection units differing in their scope of application and characteristics of the ionizing radiation sources included in their composition. According to the radiation and hygienic certification, 7,095 X-ray inspection units were used in the Russian Federation in 2023. The rich hardware fleet and the lack of a special regulatory and methodological document clarifying the issues of organizing and conducting individual dosimetric monitoring of personnel ensuring the operation of X-ray units for inspecting baggage and goods prompted a study to assess the adequacy of current approaches to assessing personnel doses. Materials and methods: Industrial radiation monitoring of operator workplaces of 11 X-ray units for inspecting baggage and goods of various models was carried out. The results of individual dosimetric monitoring of personnel ensuring the operation of X-ray units for inspecting baggage and goods using individual thermoluminescent dosimeters are presented. Results and Discussion: The presented models of X-ray units under normal operating conditions do not pose a significant radiation hazard to personnel and the population. The average value of the individual dose equivalent  $H_p(10)$  for operators of radiation inspection units practically corresponds to its value for the natural background dose component – the man-made component of the radiation dose is negligible. For all the considered models of X-ray units, the average value of the ambient dose equivalent rate of gamma radiation at the operators' workplaces was: 0.14  $\mu\text{Sv/h}$  and 0.13  $\mu\text{Sv/h}$  for operators of X-ray units for inspection of baggage and goods of types 1 and 2, respectively. Conclusion: Thus, based on the results of industrial radiation monitoring of the presented models of X-ray units and the results of individual dosimetric monitoring, it can be concluded that the conditions of radiation safety in the radiation field of these sources are properly observed by operators and persons not classified as personnel.*

**Key words:** radiation inspection units, individual dosimetric control, industrial radiation control, individual dose equivalent.

### Authors' personal contribution

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.

Nekrasov V.A. performed ambient dose equivalent rate measurements.

### 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 study had no sponsorship.

**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

## References

1. Romanovich IK, Barkovsky AN, Titov NV, Shevchenko GT. Ensuring radiation safety and counteracting radiation terrorism during mass sports events: monograph / ed. by Academician of the Russian Academy of Sciences GG Onishchenko and Professor AYu Popova. Saint Petersburg: Research Institute of Radiation Protection named after prof. PV Ramzaev; 2016. 364 p. (In Russian).
2. Barkovsky AN, Vorobyev BF, Dobrenyakin YuP, Mishin AS, Titov NV. Radiation safety provisions during the use of radiation inspection installations and radiation scanners for the people personal inspection. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2010;3(4): 37-41. (In Russian).
3. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2023: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Budgetary Institution of Healthcare of the Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2024. 122 p. (In Russian).
4. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2013 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2014 (In Russian).
5. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2014: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2015. 134 p. (In Russian).
6. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2015: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2016. 125 p. (In Russian).
7. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2016: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2017. 126 p. (In Russian).
8. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2017: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2018. 128 p. (In Russian).
9. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2018: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2019. 130 p. (In Russian).
10. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2019: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2020. 136 p. (In Russian).
11. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2020: Radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2021. 135 p. (In Russian).
12. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2021: radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2022. 132 p. (In Russian).
13. Results of radiation-hygienic certification in the constituent entities of the Russian Federation for 2022: radiation-hygienic passport of the Russian Federation. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor; 2023. 130 p. (In Russian).
14. BSS. International Atomic Energy Agency, Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. IAEA; 2014.
15. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4).
16. 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.
17. ICRU. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD; 1988.
18. ICRU. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD; 1993b.
19. ICRU. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD; 1988.
20. Martyniuk YuN, Nurlybaev K, Revkov AA. Dosimetry of Pulsed Radiation. *ANRI = ANRI*. 2018;1(92): 2-11. (In Russian).
21. Bazhin SYu, Kaidanovsky GN. Consideration of the contribution of the natural background component during individual control of radiation doses to personnel. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 122-128. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-122-128.

Received: March 18, 2025

**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 (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: s.bazhin@niirg.ru)  
ORCID: 0000-0003-1778-4334

**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  
ORCID: 0009-0006-6391-1639

**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  
ORCID: 0009-0003-6863-5192

**Vladislav A. Nekrasov** – Junior Researcher of the External Irradiation 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: 0009-0003-3626-0699

**For citation: Bazhin S.Yu., Shleenkova E.N., Bogatyreva V.Yu., Nekrasov V.A. Assessment of the adequacy of current approaches to individual dosimetric monitoring for personnel. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 47–55. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-47-55**

## Моделирование острой лучевой болезни в эксперименте

Попова А.А.<sup>1</sup>, Чипига Л.А.<sup>1,2,3</sup>, Майстренко Д.Н.<sup>1</sup>, Станжевский А.А.<sup>1</sup>, Молчанов О.Е.<sup>1</sup>,  
Николаев Д.Н.<sup>1</sup>, Понежа Т.Е.<sup>1</sup>, Виноградова Ю.Н.<sup>1</sup>, Иоффе Е.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова,  
Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство  
здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

*Целью настоящего исследования является создание нового и легко воспроизводимого способа моделирования острой лучевой болезни, отражающего особенности клинического течения данной патологии. Материалы и методы: Для анализа была проведена серия экспериментов на крысах породы Вистар обоих полов массой 180 – 220 г, полученных из питомника «Рапполово» (Ленинградская область). Все крысы подвергались однократному облучению всего тела на ускорителе Elekta Precise с использованием пластин из твердотельного фантома Solid Water HE (Sun Nuclear) 30 × 30 см<sup>2</sup> в исследуемых дозах в диапазоне 6 – 10 Гр. Продолжительность наблюдения за крысами составила 30 суток. Оценивали выживаемость, среднюю продолжительность жизни погибших от лучевого воздействия крыс, динамику массы тела, потребление корма и воды, состояние видимых слизистых оболочек, шерстного покрова и подвижность. Результаты исследования и обсуждение: Результаты показали, что предложенная модель однократного облучения лабораторных крыс демонстрирует высокую степень воспроизводимости результатов и соответствует основным требованиям к экспериментальным моделям. При облучении дозой 8 Гр наблюдается летальность 75 % крыс в течение 30 дней, при облучении дозой 10 Гр достигается 100 % летальность. Результаты успешно воспроизводятся при повторных экспериментах. Заключение: Полученные данные свидетельствуют о том, что предложенная модель является надежной и может быть использована для проведения доклинических исследований противолучевых препаратов, что решает проблему вариабельности результатов, характерную для ранее существовавших моделей.*

**Ключевые слова:** острая лучевая болезнь, радиобиология, доклинические исследования, лабораторные крысы, экспериментальные модели, облучение, выживаемость, летальность.

### Введение

На сегодняшний день в области радиобиологии и радиационной фармакологии активно продолжаются работы по поиску, созданию и экспериментальному изучению безопасности, фармакодинамики и механизмов действия новых противолучевых лекарственных средств [1–8]. К числу важных, а по сути необходимых, условий успешности проведения таких исследований на доклиническом этапе относится наличие адекватных экспериментальных моделей острой лучевой болезни (ОЛБ), соответствующих следующим основным требованиям:

- возможность в опытах на лабораторных животных достаточно надежно воспроизводить основные клинические проявления развития компонентов поражения человека;
- все количественные параметры модели должны быть доступны для надежного и достаточно простого измерения и легко воспроизводимы;
- модель должна быть воспроизводима, то есть при определенной дозе облучения погибает соответствующее количество животных;

– модель должна быть экономически доступной и пригодной для широкого скрининга лекарственных средств.

В литературе описано множество способов моделирования ОЛБ на экспериментальных животных. Для моделирования чаще всего использовали мышей или крыс, облучение проводили с использованием гамма-установок с источниками <sup>60</sup>Co или <sup>137</sup>Cs (мощностью дозы 0,5–1,5 Гр/мин), а также ускорителей электронов или аппаратов рентгеновского излучения в разных дозах в диапазоне 6,5 – 9 Гр, которые позволяли достичь гибели животных в пределах 30 дней с момента облучения [9–14]. Однако недостатками изученных работ являются отсутствие детального описания методов облучения, включая параметры контейнеров для фиксации крыс, влияющих на ослабление фотонов, и методов расчета дозы облучения. Это приводит к невозможности точно воспроизвести модель на практике: сублетальная (гибель 50 % особей) и абсолютная летальная (гибель 100 % особей) дозы облучения не совпадают. Это означает, что при совершенно одинаковых условиях облучения, при одном и том же источнике, и одинаковой дозе облучения биологический эффект ионизирующего излучения может различаться. Результаты

**Попова Алена Александровна**

Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова

**Адрес для переписки:** 197758, Санкт-Петербург, поселок Песочный, ул. Ленинградская, д. 70; E-mail: aa\_popova@rrcrst.ru



повторного воспроизведения моделей зачастую сильно варьируют, что делает такие модели не применимыми.

Несмотря на наличие достаточного количества используемых способов моделирования ОЛБ, существует необходимость поиска нового, надежно и легко воспроизводимого способа моделирования с целью проведения доклинического исследования высокоэффективных средств для профилактики и лечения ОЛБ.

**Цель исследования** – создание нового и легко воспроизводимого способа моделирования острой лучевой болезни, отражающего особенности клинического течения данной патологии.

## Материалы и методы

### Экспериментальные животные

Экспериментальные работы проводились на крысах породы Вистар обоих полов массой 180-220 г, полученных из питомника «Рапполово» (Ленинградская область) [15]. Крыс содержали в стандартных условиях вивария (температура воздуха 18–24 °С, относительная влажность воздуха 40–80 %). Доступ к корму и воде не ограничивали.

Перед проведением каждого эксперимента крысы проходили карантин в течение 14 суток, после которого крыс распределяли на группы методом рандомизации по 10 особей в каждой с исключением из эксперимента больных и ослабленных крыс. Было сформировано 10 групп крыс: по 5 групп каждого пола для облучения их в разных дозах, а также по одной группе каждого пола для контроля (табл. 1).

Таблица 1

### Группы экспериментальных крыс по дозам облучения

[Table 1]

#### Groups of experimental rats by exposure doses

| Доза облучения, Гр<br>[Exposure dose, Gy] | Масса крыс*, г<br>[Mass of rats*, g] |                   |                                 |                   |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|
|                                           | Эксперимент 1<br>[Experiment 1]      |                   | Эксперимент 2<br>[Experiment 2] |                   |
|                                           | Самцы<br>[Male]                      | Самки<br>[Female] | Самцы<br>[Male]                 | Самки<br>[Female] |
| 6                                         | 205 ± 15                             | 196 ± 14          | 193 ± 11                        | 197 ± 10          |
|                                           | 183 – 221                            | 180 – 219         | 180 – 210                       | 181 – 209         |
| 7                                         | 202 ± 14                             | 194 ± 14          | 202 ± 14                        | 196 ± 12          |
|                                           | 181 – 219                            | 180 – 219         | 181 – 219                       | 180 – 216         |
| 8                                         | 206 ± 12                             | 189 ± 13          | 199 ± 8                         | 205 ± 13          |
|                                           | 192 – 225                            | 175 – 215         | 188 – 215                       | 181 – 229         |
| 9                                         | 202 ± 12                             | 192 ± 12          | 195 ± 13                        | 192 ± 12          |
|                                           | 183 – 220                            | 177 – 213         | 179 – 219                       | 177 – 212         |
| 10                                        | 198 ± 12                             | 211 ± 9           | 196 ± 11                        | 199 ± 14          |
|                                           | 180 – 222                            | 198 – 221         | 182 – 209                       | 184 – 228         |
| Контроль<br>[Control]                     | 201 ± 12                             | 196 ± 11          | –                               | –                 |
|                                           | 181 – 219                            | 181 – 216         | –                               | –                 |

\* Среднее ± СО, мин – макс [Mean ± SD, min – max].

Экспериментальную работу проводили в соответствии с принципами биоэтики и согласно требованиям нормативно-правовых документов о порядке проведения исследовательских работ с применением животных<sup>1</sup> [16].

### Метод облучения

Для проведения исследования использовался линейный ускоритель Elekta Precise и пластины фантома Solid Water HE (Sun Nuclear) из твердотельного водозэквивалентного размером 30х30 см<sup>2</sup>, толщиной 1 см и плотностью 1,032 г/см<sup>3</sup>. Перед облучением, для полного обездвиживания во время проведения облучения, крыс помещали в персональные контейнеры для облучения (рис. 1). Плотность и толщина стенок (верхней и нижней) контейнеров для экспериментальных крыс были 1,19 г/см<sup>3</sup> и 3 мм, соответственно. Контейнеры с крысами размещали между пластинами фантома (рис. 2).

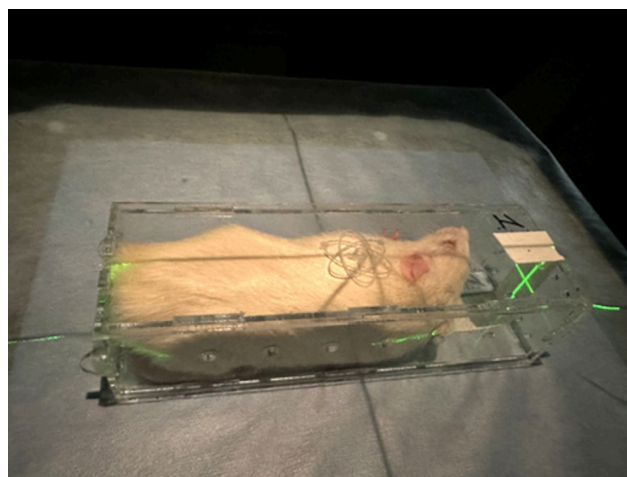


Рис. 1. Контейнер для обездвиживания крыс во время облучения

[Fig. 1. Container for rats' immobilization during the exposure]

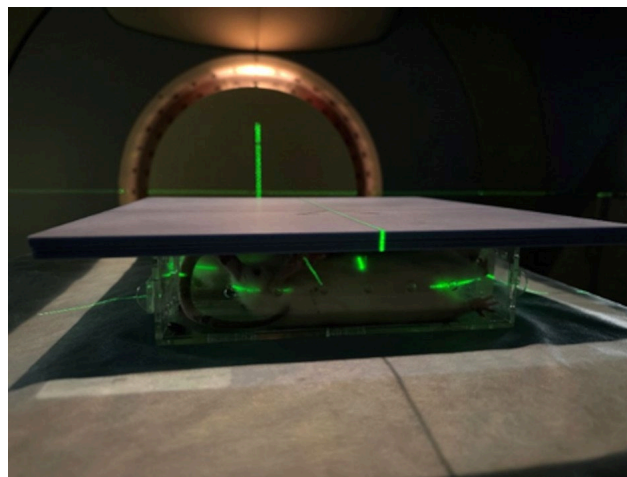


Рис. 2. Пластины твердотельного водозэквивалентного фантома

[Fig. 2. Solidstate water equivalent phantom plates]

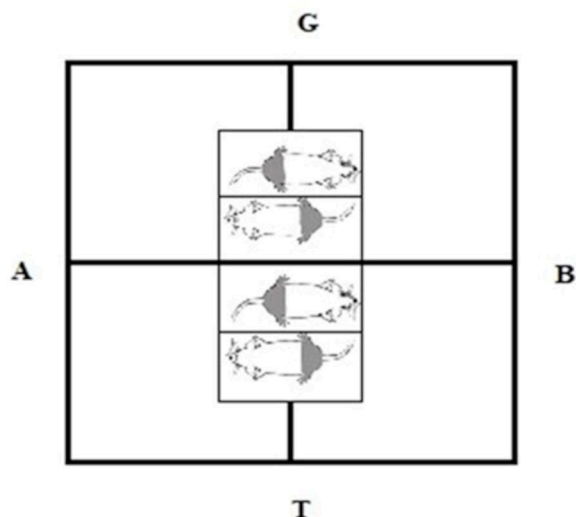
На каждую из пластин фантома из твердотельного водозэквивалентного материала наносили разметку из двух линий (в виде перекрестия), делящих пластину пополам. На линейном ускорителе Elekta Precise при значении угла гентри и угла коллиматора равными нулю устанавливали световое поле равное 40х40 см<sup>2</sup>. Позиционирование нижней

<sup>1</sup> Приказ Минздрава РФ от 19.06.2003 № 267 «Об утверждении Правил лабораторной практики» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation from 19.06.2003 № 267 "On Approval of the Rules of Laboratory Practice" (In Russ.)].



пластины на лечебном столе осуществляли так, чтобы перекрестие светового поля совпало с разметкой на пластине.

Для ускорения облучения единомоментно облучали сразу четырех крыс. Для этого контейнеры с крысами устанавливали в центре светового поля по два контейнера относительно перекрестия, симметрично вдоль линии G–T, проходящей через центр светового поля (рис. 3).



**Рис. 3.** Установка твердотельных пластин на контейнеры с крысами

[Fig. 3. Installation of solid plates on rats' containers]

Сверху устанавливали еще одну пластину фантома так, чтобы нанесенная на пластину разметка совпала с перекрестием светового поля. Изоцентр по высоте устанавливали по центру контейнеров. Далее, согласно расчету в системе

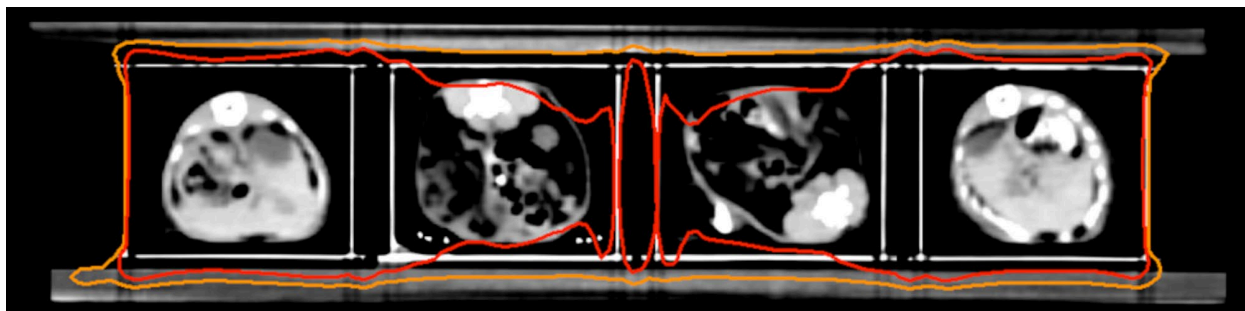
дозиметрического планирования Philips Pinnacle 16.2 для заданной дозы, последовательно отпускали рассчитанные мониторные единицы под углом облучателя 0° и 180° градусов, при мощности дозы 4,2 Гр/мин и энергии фотонов 6 МэВ. С целью ускорения облучения крыс мощность была выбрана максимально возможной, при данной энергии фотонов.

#### Дозы облучения

Крыс облучали однократно в диапазоне доз 6–10 Гр по группам в соответствии с таблицей 1. Для оценки воспроизводимости результатов и верификации способа моделирования ОЛБ был проведен второй эксперимент в тех же условиях.

Расчет доз был проведен в системе дозиметрического планирования Philips Pinnacle 16.2, алгоритмом Adaptive Convolve Superposition. Объемы облучения для расчета дозы были смоделированы, исходя из общего линейного размера контейнеров и пластин твердотельного водозэквивалентного фантома. Контейнерам была присвоена плотность 1 г/см<sup>3</sup>. Данная плотность наиболее соответствует плотности живой ткани. Плотность и толщина стенок контейнеров для экспериментальных крыс и пластин твердотельного водозэквивалентного фантома были учтены для расчета дозы с целью увеличения дозы на поверхности тела крыс, позволяя провести более равномерное облучение.

Для планирования дозы облучения крыс была проведена полная предлучевая подготовка на основании компьютерно-томографических изображений крыс в фантоме и выполнен расчет доз в системе дозиметрического планирования (рис. 4). План облучения выполнялся таким образом, чтобы все крысы получили среднюю дозу в соответствии с таблицей 1 с точностью 5 %.



**Рис. 4.** Доза-объемная гистограмма в системе дозиметрического планирования: красная линия соответствует объему, облучаемому с 100% дозы, оранжевая линия – 95% дозы

[Fig. 4. Dose-volume histogram in the dosimetric planning system: the red line corresponds to the volume exposed with 100% of the dose, the orange line - 95% of the dose]

#### Проведение эксперимента

После облучения крыс рассаживали по клеткам со свободным доступом воды и корма. Ежедневно опытных крыс клинически осматривали, фиксируя их поведение, потребление корма и воды, состояние видимых слизистых оболочек, шерстного покрова и подвижность.

Основным критерием оценки результативности эксперимента служила 30-суточная выживаемость облученных крыс. В качестве дополнительных показателей исследовали

среднюю продолжительность жизни (СПЖ) и время появления клинических симптомов, характерных для ОЛБ, таких как угнетение (снижение двигательной активности), уменьшение массы тела (кахексия), диарея, взъерошенность шерстного покрова, наличие корочек подсыхания темно-коричневого цвета в наружных уголках глаз и носовых ходах [10, 16]. Для оценки кахексического эффекта, индуцированного радиационным поражением, проводили взвешивание крыс на 3-, 7-, 10-, 14-, 21 и 28 сутки наблюдения. Для взвешивания использовали весы AND HL-400 (класс точности: III

(средний) по ГОСТ 24104-2001<sup>2</sup>) погрешность:  $\pm 0,2$  г, пределы взвешивания: 2–400 г.

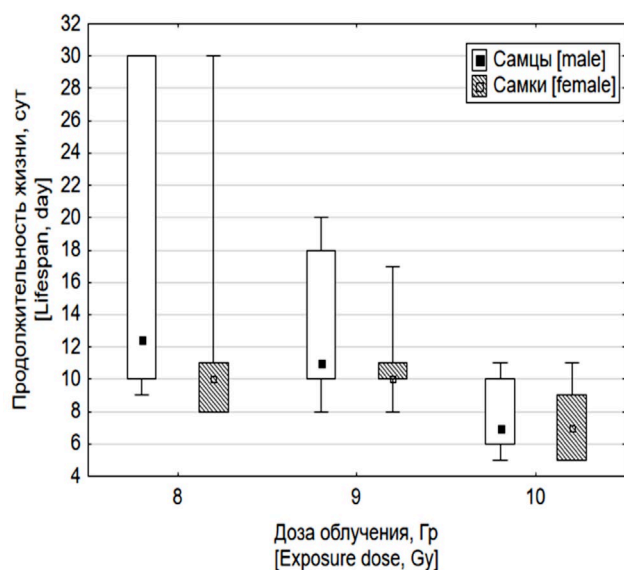
Все погибшие в 30-суточный период облученные крысы подвергались патологоанатомическому вскрытию для оценки состояния внутренних органов и определения причин гибели.

#### Обработка результатов

Статистическая обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения Statistica 12. Проверка распределений данных внутри группы на нормальность проводилась с использованием теста Шапиро-Уилка. При графическом представлении распределений использовались диаграммы «ящики с усами» (точка – медиана распределения, ящик – 25–75 % распределения, усы – мин-макс). Сравнение выборок данных проводилось с использованием теста Манна-Уитни. Для всех тестов различия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

#### Результаты и обсуждение

Полученные результаты демонстрируют, что облучение в дозах 6 и 7 Гр не привели к снижению времени жизни крыс, все они дожили до времени вывода из эксперимента (30 суток после облучения). Продолжительность жизни крыс разного пола после облучения в дозах выше 8 Гр представлена на рисунке 5. Достоверных различий в группах разного пола выявлено не было, поэтому в дальнейшем выживаемость оценивалась для общих выборок.



**Рис. 5.** Сравнение продолжительности жизни крыс разного пола при разных дозах облучения

[Fig. 5. The comparison of rats of different gender lifespan after exposure in different doses]

При дозах облучения выше 8 Гр СПЖ крыс снижалась. В таблице 2 представлены результаты выживаемости и СПЖ крыс, облученных в дозе 6–10 Гр.

Таблица 2

#### Выживаемость и средняя продолжительность жизни (СПЖ) крыс после облучения

[Table 2]

#### Survival and mean lifespan of rats after exposure

| Доза облучения, Гр<br>[Exposure dose, Gy] | Выживаемость, %<br>[Survival, %] | СПЖ (мин-макс), сут<br>[Mean lifespan (min-max), day] |
|-------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 6                                         | 100                              | 30                                                    |
| 7                                         | 100                              | 30                                                    |
| 8                                         | 25                               | 15 (8-30)                                             |
| 9                                         | 0                                | 12 (8-20)                                             |
| 10                                        | 0                                | 7 (5-11)                                              |
| Контроль<br>[Control]                     | 100                              | 30                                                    |

У выживших крыс после радиационного воздействия было выявлено дозозависимое снижение массы тела относительно контрольных значений у крыс во всех группах. На рисунке 6 представлено сравнение массы тела в разные сроки после облучения в разных дозах.

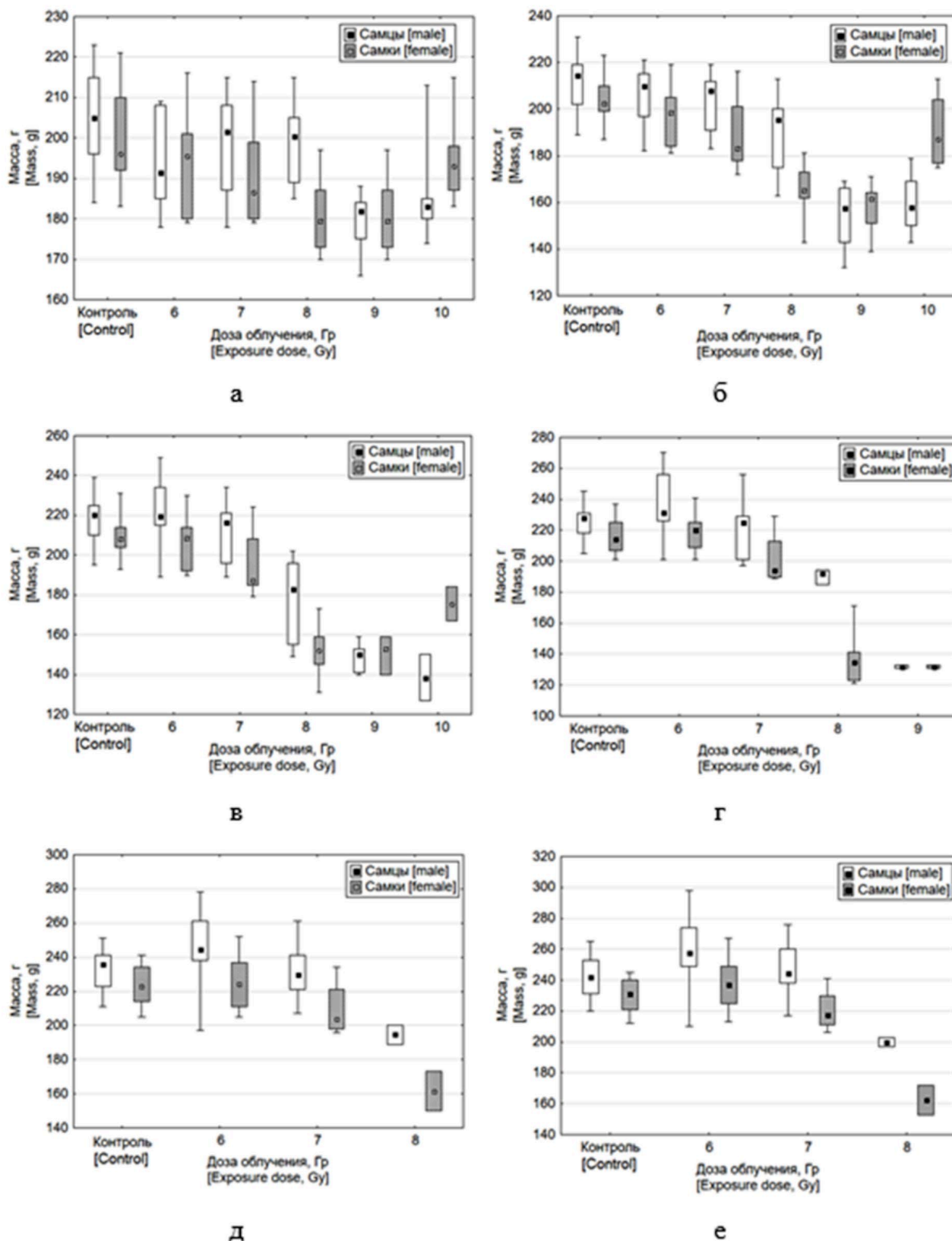
При облучении крыс в дозе 8 Гр при мощности дозы 4,2 Гр/мин на 15-е и 16-е сутки у крыс отмечалось снижение двигательной и пищевой активности, шерстный покров испачкан калом и взъерошен, имелись корочки подсыхания темно-коричневого цвета в наружных уголках глаз и носовых ходов, диарея, что соответствовало проявлению клинических симптомов ОЛБ [10]. Гибель крыс составила 75 % в течение 30 суток. При облучении в дозе 9 Гр клинические симптомы ОЛБ начинались на 10-е и 11-е сутки, гибель крыс составила 100 % в течение 30 суток. При облучении в дозе 10 Гр клинические симптомы ОЛБ начинались на 6-е и 7-е сутки, при этом гибель крыс составила 100 % в течение 30 суток.

При воспроизведении предлагаемой модели облучения были получены аналогичные результаты – достоверных различий в средней продолжительности жизни крыс при облучении в дозах выше 8 Гр выявлено не было (рис. 7). Однако при облучении крыс в дозе 9 Гр не было достигнуто 100 % летальности в течение 30 суток. Полная летальность в течение 12 суток была достигнута при 10 Гр. Поэтому для моделирования ОЛБ целесообразно использовать дозу 10 Гр.

При аутопсии у всех вскрытых животных наблюдалось следующая картина:

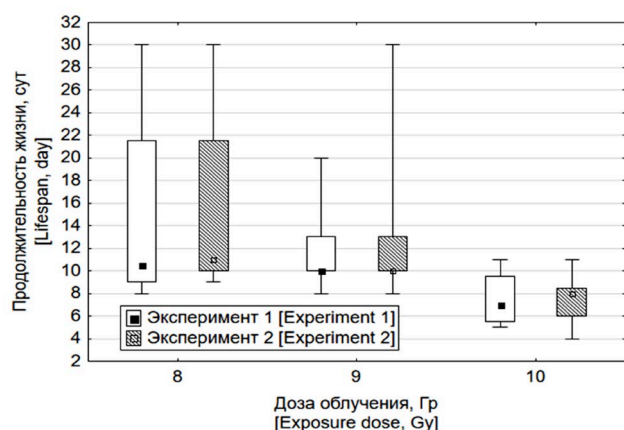
- сердце обычной величины, на срезах в миокарде мелкие кровоизлияния размерами 0,1–0,3 мм, напоминающие свежие очаги некроза (рис. 8а);
- лёгкие отёчные, бледные, на поверхности в единичных случаях отмечены пятна кровоизлияний до 3 мм диаметром, отчётливые признаки воспалительной реакции отсутствуют (рис. 8а);
- в брюшной полости экссудативный перитонит, брюшная стенка в мелких петехиях, кишечник раздут, стенка двенадцатиперстной кишки и толстого кишечника истончена (рис. 8б). На всём протяжении толстого и тонкого кишечника имеются пятна кровоизлияний и некрозов;

<sup>2</sup> ГОСТ 24104-2001. Межгосударственный стандарт. Весы лабораторные. Общие технические требования [GOST 24104-2001. Interstate standard. Laboratory scales. Laboratory scales. General technical requirements (In Russ.)].



**Рис. 6.** Сравнение массы тела крыс обоих полов при разных дозах облучения в разные сроки после облучения:  
а – 3 сутки; б – 7 суток; в – 10 суток; г – 14 суток; д – 21 сутки; е – 28 суток

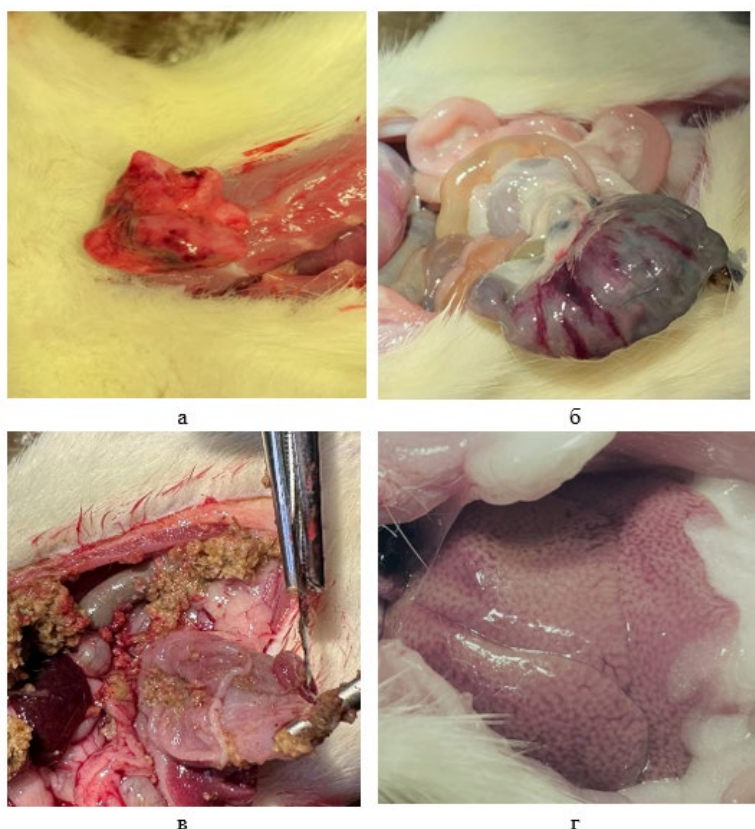
[Fig. 6. The comparison of mass of both gender rats in different time periods after exposure in different doses:  
а – 3 days; б – 7 days; в – 10 days; г – 14 days; д – 21 days; е – 28 days]



**Рис. 7.** Сравнение продолжительности жизни крыс при повторном эксперименте  
[Fig. 7. The comparison of rats' lifespan for the repeated experiment]

- желудок раздут, заполнен пищей (рис. 8в), стенка сильно истончена, слизистая с участками мелких геморрагий и обширных язв с бледной поверхностью;
- печень ровная, цвет бледный, зернистый, с яркими вкраплениями, признаки дистрофии, на срезе явных некрозов не выявлено (рис. 8д);
- почки бледные, на срезе мелкие геморрагии без привязки расположения к структуре слоёв.

Таким образом, причиной гибели крыс является интоксикация на фоне кишечной непроходимости, связанной с развитием некротических изменений в желудке и петлях кишечника. Подобная картина, со схожими геморрагическими проявлениями в паренхиматозных органах, отсутствием в них явных признаков воспалительной реакции и тотальное поражение желудочно-кишечного тракта с формированием некрозов, характерна для ОЛБ у грызунов [17].



**Рис.8.** Пример органов погибшей крысы: а – сердце и легкие; б – тонкий и толстый кишечник; в – желудок; г – печень  
[Fig. 8. Example of dead rat organs: а – heart and lungs; б – small intestine and colon; в – stomach; г – liver]

### Заключение

В работе представлена модель ОЛБ на крысах с использованием линейного ускорителя для равномерного облучения крыс фотонами энергии 6 МэВ при мощности дозы 4,2 Гр/мин. Модель предполагает облучение четырех

крыс одновременно, что позволяет существенно сократить время экспериментальной работы. При использовании данной модели ОЛБ целесообразно подводить дозу 10 Гр. Модель является легко воспроизводимой. Модель, разработанная в ходе настоящего исследования, защищена патентом на изобретение № 2811270 «Способ моделирования острой лучевой болезни в эксперименте» [18].



### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Попова А.А. – разработка дизайна исследования, организация и проведение экспериментальных исследований, мониторинг состояния животных, ведение документации, поиск и анализ литературы, обработка и анализ полученных результатов, обсуждение результатов исследования, написание текста статьи, редактирование текста статьи.

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, обработка и анализ полученных результатов, проведение расчетов, обсуждение результатов исследования, написание текста статьи, редактирование текста статьи, перевод.

Майстренко Д.Н. – общее руководство исследованием, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, формулировка цели и задач работы, анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

Станжевский А.А. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования, редактирование текста статьи.

Молчанов О.Е. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Николаев Д.Н. – проведение экспериментальных исследований, контроль условий содержания животных, мониторинг состояния животных, проведение расчетов, поиск и анализ литературы, обсуждение результатов исследования.

Понежа Т.Е. – проведение процедур облучения, контроль параметров облучения, обработка технических данных, обсуждение результатов исследования.

Виноградова Ю.Н. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Иоффе Е.Б. – 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 государственного задания «Разработка радиопротектора на основе водорастворимых форм наноуглерода, модифицированных L-аминокислотами».

### Литература

- Гребенюк А.Н., Гладких В.Д. Современное состояние и перспективы разработки лекарственных средств для профилактики и ранней терапии радиационных поражений // Радиационная биология. Радиозология. 2019. Т. 59, № 2. С. 132-149. – DOI: 10.1134/S0869803119020085.
- Kamran Mohammad Zahid, Atul Ranjan, Navrinder Kaur et al. Radioprotective Agents: Strategies and Translational Advances // Medicinal research reviews. 2016. Vol. 36, No 3. P. 461-493. DOI: 10.1002/med.21386.
- Saaya F.M., Katsube T., Xie Y. et al. Research and development of radioprotective agents: a mini-review // International Journal of Radiology. 2017. Vol. 4, No 2–3. P. 128–138. DOI: 10.17554/j.issn.2313-3406.2017.04.41.
- Smith T.A. Kirkpatrick D.R., Smith S., et al. Radioprotective agents to prevent cellular damage due to ionizing radiation // The Journal of Translational Medicine. 2017. Vol. 15. P. 232. DOI: 10.1186/s12967-017-1338-x.
- Singh V.K., Seed T.M. A review of radiation countermeasures focusing on injury-specific medicinals and regulatory approval status: part I. Radiation sub-syndromes, animal models and FDA-approved countermeasures // The International Journal of Radiation Biology. 2017. Vol. 93, No 9. P. 1–19. DOI: 10.1080/09553002.2017.1332438.
- Гудков С.В., Попова Н.Р., Брусков В.И. Радиозащитные вещества: история, тенденции и перспективы // Биофизика. 2015. Т. 60, № 4. С. 801-811.
- Васин М.В. Препарат Б-190 (индралин) в свете истории формирования представлений о механизме действия радиопротекторов // Радиационная биология. Радиозология. 2020. Т. 60, № 4. С. 378-395. DOI: 10.31857/S0869803120040128.
- Rosen EM, Day R, Singh VK. New approaches to radiation protection / Eliot M. Rosen // Frontiers in oncology. 2015. Vol. 20, №4. P. 381. doi: 10.3389/fonc.2014.00381.
- Иванов А.А., Григорьев А.И., Ушаков И.Б. и др. Пат. № 2498807 Российская Федерация, МПК А61К33.00, А61Р43.00. Средство лечения острой лучевой болезни. опубл. 20.11.2012.
- Гайнутдинов Т.Р., Вагин К.Н., Идрисов А.М. и др. Выбор оптимальной модели двухфакторной патологии, вызванной термическим поражением на фоне внешнего гамма-облучения // Ветеринарный врач. 2021. № 1. С. 4-9. DOI: 10.33632/1998-698X.2021-1-4-9.
- Богачев С.С., Долгова Е.В., Поттер Е.А. и др. Пат. № 2701155 Российская Федерация, МПК А61К 31.7105, А61К35.66, А61Р39.00. Способ защиты животных от высокодозового ионизирующего излучения; опубл. 25.09.2019.
- Котенко К.В., Бушманов А.Ю., Иванов А.А. и др. Пат. № 2551619 Российская Федерация, МПК G09B23.28, А61К38.02, А61Р17.18. Способ профилактики и лечения острой лучевой болезни в эксперименте; опубл. 27.05.2015.
- Sanja T., Dobrić S., Jačević V. et al. Tissue-protective effects of fullerene C60(OH)24 and amifostine in irradiated rats // Colloids and surfaces. B Biointerfaces. 2007. Vol. 58, No 1. P. 39-43. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2007.01.005.
- Xiaoqing C., Hao J., Zhang X. et al. The polyhydroxylated fullerene derivative C60(OH)24 protects mice from ionizing-radiation-induced immune and mitochondrial dysfunction // Toxicology and applied pharmacology. 2010. Vol. 243, No 1. P. 27-34. DOI: 10.1016/j.taap.2009.11.009.
- Официальный сайт Филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ПЛЖ «Рапполово». URL: <https://rappolovo.org/> (дата обращения 09.04.2025 г.).
- Костеша Н.Я., Даренская Н.Г. Кишечная форма лучевой болезни и роль поражения желудка в ее развитии. Томск: Издательство Томского университета, 1990. 123 с.
- Торопцев И.В., Соколова Н.В. Патологическая анатомия острой лучевой болезни в эксперименте // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического Института имени С.М. Кирова. 1957. Т. 57. С. 17-27.
- Майстренко Д.Н., Молчанов О.Е., Попова А.А. и др. Пат. № 2811270 Российская Федерация, МПК А61Н 5/10, G09B 23/28. Способ моделирования острой лучевой болезни в эксперименте. опубл. 11.01.2024.

Поступила: 27.05.2025

**Попова Алена Александровна** – научный сотрудник отдела фундаментальных исследований Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации. **Адрес для переписки:** 197758, Санкт-Петербург, поселок Песочный, улица Ленинградская, дом 70; E-mail: aa\_popova@rrcrst.ru

ORCID: 0000-0001-8077-9832

**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

**Майстренко Дмитрий Николаевич** – доктор медицинских наук, доцент, директор Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0001-8174-7461

**Станжевский Андрей Алексеевич** – доктор медицинских наук, доцент, 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

**Молчанов Олег Евгеньевич** – доктор медицинских наук, руководитель отдела фундаментальных исследований Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-3882-1720

**Николаев Дмитрий Николаевич** – кандидат медицинских наук, руководитель группы, старший научный сотрудник группы медицинского приборостроения отдела фундаментальных исследований Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0003-0501-7007

**Понежа Тамара Евгеньевна** – старший медицинский физик радиотерапевтического отделения №1 с группой радионуклидной терапии (дневной стационар) Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-0901-5175

**Виноградова Юлия Николаевна** – доктор медицинских наук, доцент, главный научный сотрудник отдела лучевых и комбинированных методов лечения Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-0938-5213

**Иоффе Екатерина Борисовна** – ординатор первого года обучения кафедры радиологии, хирургии и онкологии года Российского научного центра радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0009-0002-5129-7580

**Для цитирования:** Попова А.А., Чипига Л.А., Майстренко Д.Н., Станжевский А.А., Молчанов О.Е., Николаев Д.Н., Понежа Т.Е., Виноградова Ю.Н., Иоффе Е.Б. Моделирование острой лучевой болезни в эксперименте // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 56–65. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-56-65

## Modeling of acute radiation syndrome in experiment

Alena A. Popova<sup>1</sup>, Larisa A. Chipiga<sup>1,2,3</sup>, Dmitriy N. Maystrenko<sup>1</sup>, Andrey A. Stanzhevskiy<sup>1</sup>, Oleg E. Molchanov<sup>1</sup>, Dmitriy N. Nikolaev<sup>1</sup>, Tamara E. Ponezha<sup>1</sup>, Yuliia N. Vinogradova<sup>1</sup>, Ekaterina B. Ioffe<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

*The aim of the current study was to create a new and easily reproducible method of modeling acute radiation syndrome, representing the features of the clinical flow of this disease. Materials and Methods: A series of experiments on Wistar rats, both genders (nursery "Rappolovo" (Leningrad region), weight 180–220 g), were*

**Alena A. Popova**

A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies

**Address for correspondence:** Leningradskaya Str., 70, Pesochny settlement, Saint Petersburg, 197758, Russia;

E-mail: aa\_popova@rrcrst.ru

performed. Rats were divided into groups and one time exposed at the investigated dose (range of 6–10 Gy) on Elekta Precise accelerator using Solid Water HE (Sun Nuclear) 30430 cm<sup>2</sup> phantom plates. The duration of animal observation was 30 days. Survival, mean lifespan, body weight dynamics, feed and water consumption, state of visible mucous membranes, hair coat and mobility were evaluated. Results and Discussion: The results showed that the proposed model of single exposure of laboratory rats demonstrates a good level of results reproducibility and complies with the basic requirements for experimental models. The lethality of rats within 30 days was 75% with a dose of 8 Gy, the 100% lethality of rats was with a dose of 10 Gy. The results are successfully reproduced in repeated experiments. Conclusion: The obtained data indicated that the proposed model is reliable and can be used for preclinical studies of radioprotectors without existing models' problem of variability of results.

**Key words:** acute radiation syndrome, radiobiology, preclinical study, laboratory rats, experimental models, irradiation, survival time, lethality.

### Authors' personal contribution

Alena A. Popova – development of the study design, organization and performance of experimental studies, monitoring of animal condition, keeping documentation, search and analysis of literature, analysis and discussion of the results, writing the text of the article, editing the draft of the article.

Larisa A. Chipiga – scientific management of the study, calculations, analysis and discussion of the results, writing the text of the article, editing the draft of the article.

Dmitriy N. Maystrenko – management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, analysis and discussion of the results, editing the draft of the article.

Andrey A. Stanzhevskiy – analysis and interpretation of the results, discussion of the results, editing the draft of the article.

Oleg E. Molchanov – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Dmitriy N. Nikolaev – experimental research, controlling animal holding conditions, monitoring animal condition, performing calculations, searching and analyzing literature, discussion of the results.

Tamara E. Ponezha – exposure procedures, control of exposure parameters, processing of technical data, discussion of the results.

Yuliia N. Vinogradova – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Ekaterina B. Ioffe – search and analysis of literature, discussion of the results, editing the draft of the article.

### Conflict of interests

Authors declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The study was not supported by sponsorship. The study was performed within framework of research project "Development and scientific justification of applied methods for assessment of radiation risks to public health under different situations and exposure scenarios based on modern approaches to radiation detriment assessment".

### References

- Grebenyuk AN. Current status and prospects for the development of drugs for the prevention and early treatment of radiation injuries. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2019;59(2): 132-149 (In Russian).
- Mohammad Zahid Kamran, Atul Ranjan, Navrinder Kaur, Souvik Sur, Vibha Tandon. Radioprotective Agents: Strategies and Translational Advances. *Medicinal research reviews*. 2016;36(3): 461-493. DOI: 10.1002/med.21386.
- Saaya FM, Katsube T, Xie Y, Tanaka K, Fujita K, Wang B. Research and development of radioprotective agents: a mini-review. *International Journal of Radiology*. 2017;4(2–3): 128–138.
- Smith TA, Kirkpatrick DR, Smith S, Smith TK, Pearson T, Kailasam A, et al. Radioprotective agents to prevent cellular damage due to ionizing radiation. *The Journal of Translational Medicine*. 2017;15: 232. – DOI: 10.1186/s12967-017-1338-x.
- Singh VK, Seed TM. A review of radiation countermeasures focusing on injury-specific medicinals and regulatory approval status: part I. Radiation sub-syndromes, animal models and FDA-approved countermeasures. *The International Journal of Radiation Biology*. 2017;93(9): 1–19. DOI: 10.1080/09553002.2017.1332438.
- Gudkov SV. Radioprotective substances: history, trends and prospects // *Biofizika = Biophysics*. 2015;60(4): 801-811. (In Russian).
- Vasin MV. The drug B-190 (indralin) in light of the history of the formation of ideas about the mechanism of action of radioprotectors. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation biology. Radioecology*. 2020;60(4): 378-395 (In Russian).
- Rosen EM, Day R, Singh VK. New approaches to radiation protection. *Frontiers in oncology*. 2015;4: 381. DOI: 10.3389/fonc.2014.00381.
- Ivanov AA, Grigoriev AI, Ushakov IB, Sinyak YuE. Treatment for acute radiation sickness. Russian Federation patent RU 2498807; 2012 Nov 20 (In Russian).
- Gaynutdinov TR. Selection of the optimal model of two-factor pathology caused by thermal damage against the background of external gamma irradiation. *Veterinarnyi vrach = Veterinarian*. 2021;1: 4-9 (In Russian).
- Bogachev SS, Dolgova EV, Potter EA, Proskurina AS, Nikolas VP, Ritter GS. Ability to protect animals from high-dose ionizing radiation. Russian Federation patent RU 2701155; 2019 Sep 25 (In Russian).
- Kotenko KV, Bushmanov AYU, Ivanov AA. Method of prevention and treatment of acute radiation sickness in an experiment. Russian Federation patent RU 2551619; 2015 May 27 (In Russian).
- Sanja T, Dobrić S, Dragojević-Simić VJV, Milovanović Z, Dordević A. Tissue-protective effects of fullerene C60(OH)<sub>24</sub> and amifostine in irradiated rats. *Colloids and surfaces. B Biointerfaces*. 2007;58(1): 39-43. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2007.01.005.
- Xiaoqing C, Hao J, Zhang X, Bozhang Yu, Jinming R, Cheng L, et al. The polyhydroxylated fullerene derivative C60(OH)<sub>24</sub> protects mice from ionizing-radiation-induced immune and mitochondrial dysfunction. *Toxicology and applied pharmacology*. 2010;243(1): 27-34. DOI: 10.1016/j.taap.2009.11.009.
- Official website of the Branch of the National Research Center "Kurchatov Institute" St. PINM – LAN "Rappolovo". Available from: <https://rappolovo.org/> [Accessed 2025 Apr 9]. (In Russian).
- Kostesha NYA, Darenskaya NG. Tomsk Intestinal form of radiation sickness and the role of stomach damage in its development. Tomsk University Publishing House; 1990. P. 123. (In Russian).

17. Toroptsev IV, Sokolova NV. Pathologic anatomy of acute radiation sickness in experiment. *Izvestiya Tomskogo Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Politeknicheskogo Instituta Imeni S.M. Kirova* = Proceedings of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor Polytechnic Institute named after S.M. Kirov. 1957;57: 17-27. (In Russian).

18. Maistrenko DN, Molchanov OE, Popova AA, Nikolaev DN, Vinogradova YN, Popova EA, et al. inventors; Method for modeling acute radiation sickness in an experiment. Russian Federation patent RU 2811270; 2024 Jan 11 (In Russian).

Received: May 27, 2025

**For correspondence: Alena A. Popova** – Research Fellow A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation (Leningradskaya Str., 70, Pesochny settlement, Saint Petersburg, 197758, Russia; E-mail: aa\_popova@rrcrst.ru)

ORCID: 0000-0001-8077-9832

**Larisa A. Chipiga** – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Research Fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; Docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0001-9153-3061

**Dmitriy N. Maystrenko** – Doctor of Medical Sciences, Docent, 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: 0000-0001-8174-7461

**Andrey A. Stanzhevskiy** – Doctor of Medical Sciences, Deputy Director for Research, Docent, 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

**Oleg E. Molchanov** – Doctor of Medical Sciences, Head of Fundamental Research Department, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-3882-1720

**Dmitriy N. Nikolaev** – Doctor of Medical Sciences, group leader, senior researcher, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0003-0501-7007

**Tamara E. Ponezha** – Senior Medical Physicist, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-0901-5175

**Yuliia N. Vinogradova** – Doctor of Medical Sciences, Docent, Senior Scientist, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-0938-5213

**Ekaterina B. Ioffe** – Resident, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0002-5129-7580

**For citation: Popova A.A., Chipiga L.A., Maystrenko D.N., Stanzhevskiy A.A., Molchanov O.E., Nikolaev D.N., Ponezha T.E., Vinogradova Yu.N., Ioffe E.B. Modeling of acute radiation disease in experiment. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 56–65. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-56-65**



## Выбор оборудования для флюорографии и рентгенографии органов грудной клетки на основе оценки качества изображения и уровней облучения пациентов

Солдатов И.В.<sup>1</sup>, Водоватов А.В.<sup>2</sup>, Лантух З.А.<sup>1</sup>, Соловьёв А.В.<sup>1,3</sup>, Сморгочкова А.К.<sup>1</sup>, Артюкова З.Р.<sup>1</sup>, Дружинина П.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия

*Современная лучевая диагностика ввиду своего стремительного развития и совершенствования применяемых методов и технологий требует постоянного контроля, в том числе в контексте уровней облучения пациентов. Выбор подходящего рентгенодиагностического оборудования является одним из ключевых аспектов обеспечения радиационной безопасности. Материалы и методы: В исследовании были проанализированы рентгеновские диагностические аппараты и цифровые флюорографы с различными технологиями получения изображения (типами детекторов), на примере исследований лёгких. Оценка аппаратов проводилась с использованием специально разработанной 5-балльной шкалы в отношении ключевых параметров качества и безопасности. Результаты исследования и обсуждение: Результаты исследования показывают, что цифровые рентгенодиагностические аппараты со штативом типа U-дуга и цифровые рентгенографические аппараты с плоскостной панелью детектора демонстрируют более высокое качество изображений по сравнению с другими технологиями при относительно низких уровнях облучения пациента. Дополнительным преимуществом таких аппаратов для городских поликлиник, по сравнению с «классическими» флюорографами, является их универсальность и возможность проведения различных рентгенологических исследований (не только исследований лёгких), что обеспечивает взаимозаменяемость аппаратов и эффективное перенаправление потока пациентов на время ремонта аппарата. Заключение: Результаты данного исследования выделяют важность оптимизации выбора рентгенодиагностического оборудования для достижения наилучших клинических результатов и обеспечения безопасности пациентов при проведении рентгенологических исследований и могут быть применены в систематизации оснащения медицинских организаций, оказывающих первичную медико-санитарную помощь взрослому населению.*

**Ключевые слова:** аппараты для флюорографии, рентгенографии органов грудной клетки, качество изображения, эффективная доза пациентов.

### Введение

В последние десятилетия заболевания органов дыхания, включая туберкулез, стали одной из важнейших проблем общественного здоровья [1]. Раннее выявление и диагностика этих заболеваний могут существенно сократить риск для жизни и улучшить качество жизни пациентов [2].

Флюорография и рентгенография органов грудной клетки используются для диагностики туберкулеза легких, пневмонии, гидроторакса, пневмоторакса, ателектаза легкого, объемных образований легких, переломов ребер, кардиомегалии и иных заболеваний средостения [3, 4]. В Российской Федерации основным методом выявления туберкулеза является флюорография. Приблизительно 89 % всех

обнаруженных случаев туберкулеза были выявлены при проведении флюорографии [5].

В г. Москве в период с 2017 по 2021 гг. наблюдается снижение числа флюорографических и рентгенографических исследований с 28,4 % и 63,9 % в 2017 году до 22,7 % и 61,7 % в 2021 году соответственно (% от общего числа рентгенологических исследований). Количественная оценка проведенных рентгенографических исследований между 2017 и 2021 гг. составляет: для аналоговых аппаратов – с 5 095 403 до 2 032 306, для цифровых аппаратов – с 12 238 678 до 14 925 505. При этом исследования органов грудной клетки сохраняют свою важность, занимая 20,1 % в 2017 году и 18,4 % в 2021 году [6] (от общего числа исследований). В то же время, согласно статистике Росстата в целом по Рос-

**Солдатов Илья Владимирович**

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы

**Адрес для переписки:** 127051, Россия, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; E-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

сии, ежегодно количество людей прошедших флюорографическое обследование возросло с 70 миллионов человек в 2017 году до 87,7 миллионов в 2023 году [7, 8]. В то же время уверенную лидирующую позицию занимают рентгенодиагностические, в том числе профилактические, исследования, проведенные в амбулаторных медицинских организациях [9].

Парк рентгенографического и флюорографического оборудования в медицинских организациях Департамента здравоохранения г. Москвы в 2022 г составлял 685 рентгеновских диагностических аппаратов и 230 флюорографов и U-дуг [10]. Однако аппаратура, используемая для флюорографии и рентгенографии органов грудной клетки, значительно различается по ряду параметров, что создает потребность в объективном сравнении и анализе, особенно при планировании оснащения.

Обычно необходимость оснащения (пере- или дооснащения) парка оборудования лучевой диагностики просто утверждается. Конкретные подходы, принципы предлагаются крайне редко и в очень ограниченном виде. В научных работах по проблемам совершенствования служб лучевой диагностики вопросы оснащения рассматривались лишь как один из аспектов, причем далеко не самый первоочередной. Примечательно, что даже в случаях многофакторного изучения показателей лучевой диагностики [11] вопросы оснащения (тем более перспективного его плана) и радиационной безопасности исследований рассматривались параллельно, без попыток оценки взаимного влияния.

Сравнение качества изображения рентгеновских аппаратов является важным аспектом в области медицинской диагностики. Определение оптимального аппарата для оснащения играет решающую роль в точности диагностики, принятии клинических решений и, как следствие, лечении пациента. Поэтому при выборе оборудования критически важно провести всестороннее сравнение между различными аппаратами и выявить их преимущества и недостатки с точки зрения визуализации.

**Цель исследования** – разработка и апробация методики объективного количественного сравнения рентгеновских аппаратов, применяемых для диагностики органов грудной клетки.

## Материалы и методы

С позиции выполнения требований ОСПОРБ 99/2010 важным при медицинском облучении в диагностике является использование надлежащего оборудования с возможностью получения изображения такого качества и информативности, которого достаточного для описания исследования врачом-рентгенологом, с учетом минимизации уровней облучения пациента насколько это возможно. В качестве ключевых характеристик аппаратов были выбраны эффективная доза за процедуру (единичный рентгеновский снимок органов грудной клетки), параметры качества изображения и оценка качества изображения врачом-рентгенологом. Эффективная доза показывает меру возникновения риска отдаленных последствий от воздействия ионизирующего излучения на пациента. Оценки качества изображения

(техническая на основе измерений и экспертная оценка врачами-рентгенологами) напрямую характеризуют качество визуализации и, как следствие, возможность точной диагностики по результатам исследования.

### Определение эффективной дозы пациента

Для определения эффективной дозы проводились измерения произведения дозы на площадь с помощью клинического дозиметра ДРК-1Э, определение радиационного выхода с помощью дозиметра универсального для контроля характеристик рентгеновских аппаратов Piranha модификации R&F/M 657. Также использовался многофункциональный грудной фантом LUNGMAN, Ref/PH-1 Multipurpose Chest Phantom N1, с его помощью определялись параметры исследования, характерные для съемки легких в автоматическом режиме. Параметры проведения рентгенографии органов грудной клетки или флюорографии на различных аппаратах выбирались согласно протоколам, рекомендованным производителем или в автоматическом режиме съемки в задне-передней проекции (ЗП). Коэффициенты перехода и эффективные дозы рассчитывались с помощью компьютерной программы РСХМС 2.0, соответствующей методике, обозначенной в МУ 2.6.1.2944-11<sup>1</sup>.

### Определение параметров изображения

Ввиду того, что в выборку аппаратов с различными технологиями, характерными для парка московского здравоохранения, попали аналоговые и цифровые рентгенографические аппараты и флюорографы, а также необходимости простоты применения параметра для интерпретации врачами-рентгенологами, для определения качества изображения были выбраны: максимальный размер облучаемого поля детектора (см x см), контрастная чувствительность (%) и пространственная разрешающая способность (пар.лин/мм). В дальнейшее исследование включались аппараты с максимальным размером облучаемого поля детектора не менее 35 x 38 см. У аппаратов с полем меньшего размера есть риск непопадания на детектор всей необходимой области интереса при исследовании лёгких у крупных пациентов.

Контрастная чувствительность оценивалась по изображению тест-объекта, содержащего детали заданного контраста, расположенного во входной плоскости приемника рентгеновского изображения, при съемке тест-объекта ТКЧ-05<sup>2</sup>. Ввиду близких значений контрастной чувствительности у выбранных технологий было принято решение установить условную величину контрастной чувствительности не более 1,0 % при дозе во входной плоскости (далее – D) не более 5 мкГр. При выполнении указанного условия аппарат включался в исследование. Далее по изображению тест-объекта ТПР-4-2 у аппаратов определялась пространственная разрешающая способность. Таким образом, для оценки качества изображения в баллах были допущены аппараты, у которых по результатам измерений выполняются требования по максимальному размеру облучаемого поля и контрастной чувствительности; аппараты, не удовлетворяющие требованиям до оценки, не допускались.

<sup>1</sup> МУ 2.6.1.2944-11 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований». [МУ 2.6.1.2944-11 "Control of effective radiation doses to patients during medical X-ray examinations". Methodological guidelines (In Russ.)].

<sup>2</sup> МР № 16 Методы и аппаратно-программные средства оценки параметров и характеристик цифровой рентгенодиагностической аппаратуры в условиях эксплуатации [MP №16 Methods and hardware-software means of estimation of parameters and characteristics of digital X-ray diagnostic equipment under operating conditions (In Russ.)].

### Определение качества изображения

Основываясь на опыте аудита рентгенологических исследований [12], было принято решение выполнения независимой оценки изображений врачами-рентгенологами.

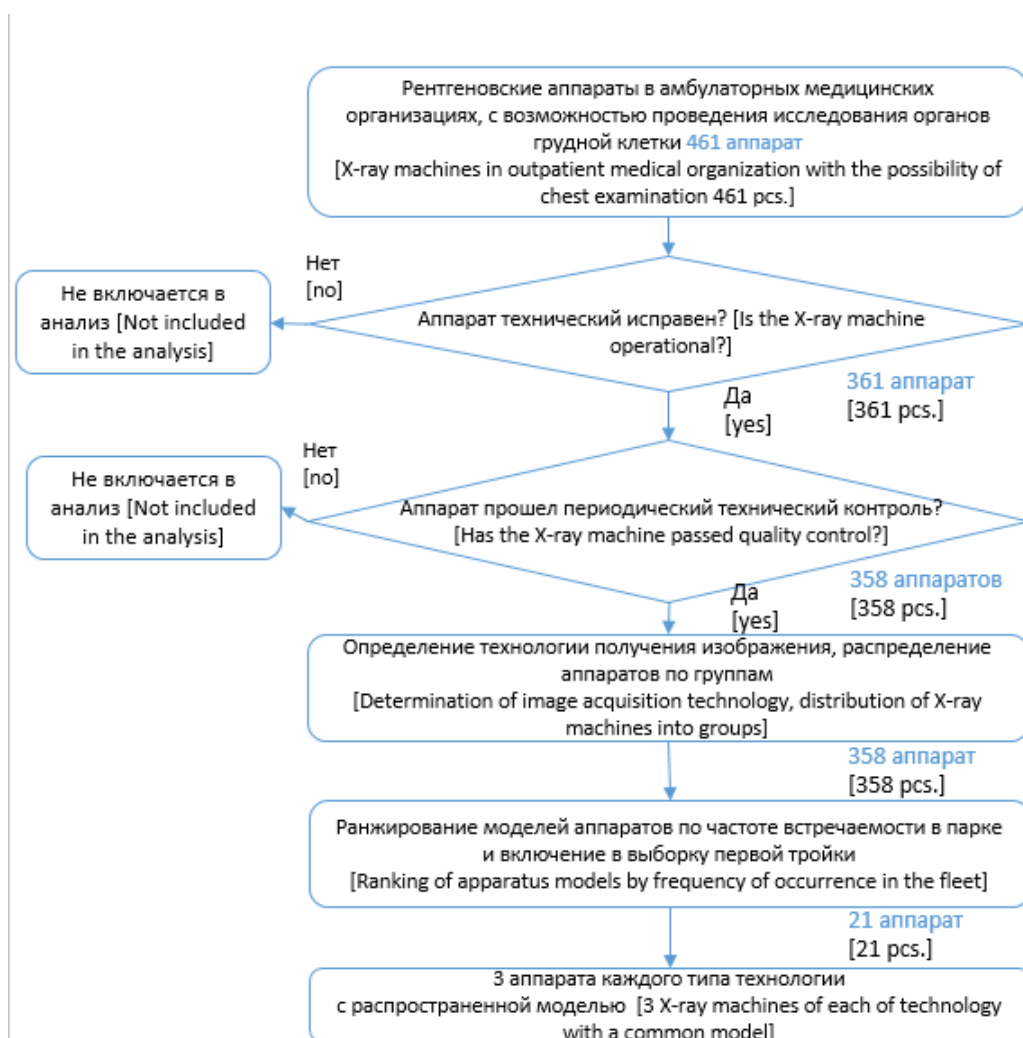
Три доступных эксперта-рентгенолога со стажем работы более 5 лет независимо просматривали по 10 исследований органов грудной клетки с каждого аппарата и оценивали качество по 5-бальной шкале. Данные врачи на постоянной основе занимаются аудитом флюорографических исследований и имеют высокую квалификацию. Все исследования (за исключением исследований на пленке) оценивались на идентичных диагностических мониторах BARCO Nio Color 3MP (MDNC-3421). Исследования на пленке рассматривались с помощью негатоскопа.

### Выбор технологий детектирования и аппаратов

Для апробации была составлена выборка рентгеновских аппаратов. Был проведен анализ информационной системы учета медицинского оборудования единой медицинской информационно-аналитической системы - УМО ЕМИАС, со-

державшей информацию о функционирующем в медицинских организациях Департамента здравоохранения г. Москвы (далее - ДЗМ) оборудовании.

По результатам анализа рынка оборудования для лучевой диагностики и литературных источников [13, 14, 15] были выделены 6 самых распространенных технологий типов приемников, используемых в рентгенодиагностике легких: плоскостной детектор, линейный сканирующий детектор, детектор на основе ПЗС-матрицы, приемник, состоящий из 4 чувствительных полей детекторов с технологией сшивки изображения, систем компьютерной радиографии, кассета с пленкой. При этом, в сегменте аппаратов с плоскостным детектором, исходя из типа штативного устройства, подходящего для быстрого проведения исследования (по сравнению с рентгенодиагностическим аппаратом на 2 рабочих места), целесообразно выделить в отдельную группу аппараты со штативом типа U-дуга, что может быть важным для проведения профилактических осмотров. Таким образом в зависимости от приёмника и штативного устройства были выбраны 7 типов аппаратов. В выборку апробации включались аппараты согласно схеме, указанной на рисунке 1.



**Рис. 1.** Схема выбора аппаратов для исследования  
[Fig. 1. The scheme of selection of devices for the research]

В представленном на рисунке 1 парке оборудования присутствовали все 7 типов аппаратов; для каждого типа были выбраны по 3 аппарата самой распространённой модели (итого 21 аппарат). Аппараты выбранных моделей составляли более 70 % от всего парка. Сперва проводилась оценка выбранных аппаратов по указанным критериям, далее она усреднялась для получения оценки технологии приемника.

Для разработки модели оценки был проведен

опрос 20 врачей-рентгенологов [16] по вопросу определения весовых коэффициентов (от 0 до 1) между параметрами качества изображения и уровнем облучения при профилактическом исследовании органов грудной клетки.

### Результаты

Результаты измерений параметров, указанных в материалах и методах, представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Результаты

[Table 1

### Results]

| №  | Тип аппарата<br>[Type of X-ray machine]                                                           | Максимальный размер облучаемого поля детектора (кассеты), см x см<br>[Maximum size of the irradiated detector field, cm x cm] | Контрастная чувствительность, % при D < 5 мкГр<br>[Contrast sensitivity, %] | Пространственное разрешение, пар. лин./мм<br>[Spatial resolution, pairs/mm] | Эффективная доза, мЗв<br>[Effective dose, mSv] |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | Аналоговый рентгеновский аппарат с системой компьютерной радиологии                               | 35 x 43                                                                                                                       | 0,5                                                                         | 3,0                                                                         | 0,012                                          |
| 2  |                                                                                                   | 35 x 43                                                                                                                       | 0,5                                                                         | 3,0                                                                         | 0,016                                          |
| 3  | [X-ray machine with a computed radiography system]                                                | 35 x 43                                                                                                                       | 0,5                                                                         | 2,8                                                                         | 0,088                                          |
| 4  | Аналоговый рентгеновский аппарат с пленкой                                                        | 35 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,3                                                                         | 0,034                                          |
| 5  |                                                                                                   | 35 x 43                                                                                                                       | 0,5                                                                         | 4,0                                                                         | 0,172                                          |
| 6  | [X-ray machine with film processing]                                                              | 35 x 43                                                                                                                       | 0,5                                                                         | 4,0                                                                         | 0,073                                          |
| 7  | Цифровой флюорограф с ПЗС-матрицей                                                                | 39 x 39                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 2,2                                                                         | 0,019                                          |
| 8  |                                                                                                   | 39 x 39                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 1,8                                                                         | 0,052                                          |
| 9  | [Digital x-ray chest survey units based on CCD-camera]                                            | 39 x 39                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 2,2                                                                         | 0,029                                          |
| 10 | Цифровой рентгенодиагностический аппарат со штативом типа U-дуга с плоскостной панелью детектором | 43 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,0                                                                         | 0,049                                          |
| 11 |                                                                                                   | 43 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,0                                                                         | 0,021                                          |
| 12 | [Digital X-ray diagnostic machine with U-arc tripod with a flat panel detector]                   | 43 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,0                                                                         | 0,035                                          |
| 13 | Цифровой рентгенографический аппарат с плоскостной панелью детектором                             | 43 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,0                                                                         | 0,037                                          |
| 14 |                                                                                                   | 43 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,3                                                                         | 0,047                                          |
| 15 | [Digital X-ray diagnostic machine with a flat panel detector]                                     | 43 x 43                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 4,3                                                                         | 0,025                                          |
| 16 | Цифровой флюорограф с технологией сшивки                                                          | 40 x 40                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 1,8                                                                         | 0,006                                          |
| 17 |                                                                                                   | 40 x 40                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 1,8                                                                         | 0,008                                          |
| 18 | [Digital x-ray chest survey units with slot-scan digital radiography]                             | 40 x 40                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 2,2                                                                         | 0,006                                          |
| 19 | Цифровой флюорограф со сканирующей системой                                                       | 39 x 39                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 2,0                                                                         | 0,014                                          |
| 20 |                                                                                                   | 39 x 39                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 2,2                                                                         | 0,011                                          |
| 21 | [Scanning digital X-ray chest survey units]                                                       | 39 x 39                                                                                                                       | 1,0                                                                         | 2,0                                                                         | 0,017                                          |



Для количественной оценки различных характеристик было принято решение приведения всех значений к относительным единицам за счет введения 5-бальной шкалы.

Для оценки эффективной дозы  $A(D_{эф.})$  на шкале должна сохраняться зависимость: чем больше, полученное значение в баллах, тем меньше лучевая нагрузка облучения пациента. Максимальное значение составило 0,172 мЗв; оно характеризуется высокими дозами для выбранных технологий и вида исследования флюорография или рентгенография легких, поэтому эффективной дозе 0,172 мЗв была присвоена оценка в 1 балл. Минимальное значение эффективной дозы составило 0,006 мЗв, что является низкодозовой характеристикой и может быть принято за 5 баллов. Все измеренные значения лежат в диапазоне 0,006 и 0,172 виду и отличаются более чем на 2 порядка, поэтому зависимость «эффективная доза–оценка» была представлена в виде десятичного логарифма дозы от оценки, при этом линия тренда–линейная (рис. 2а). Линейная зависимость дает правильную оценку взаимосвязи двух величин. Далее каждому

определенному значению эффективной дозы присваивается оценка от 1 до 5. Данный подход позволит объективно сравнить между собой 21 аппарат по величине эффективной дозы, приведённой к 5-ти бальной шкале.

Для проверки полученных результатов измерения и подтверждения релевантности выбранной зависимости «доза–оценка» было проведено измерения на 361 исправном аппарате парка во взрослых поликлиниках ДЗМ по измерениям аккредитованной испытательной лаборатории ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ». Диапазон эффективных доз при исследовании органов грудной клетки составил от 0,001 до 0,530 мЗв за процедуру, что подтверждается также литературными данными [13, 17], а также руководствами по эксплуатации на аппараты. При этом, исходя из распределения, значения до 0,01 мЗв можно характеризовать как дозы значительно ниже средних, а значения свыше 0,15 мЗв можно характеризовать как дозы значительно выше средних. По результатам измерений максимальное и минимальное значения эффективной дозы соответствовали указанным выше диапазонам и литературным данным.

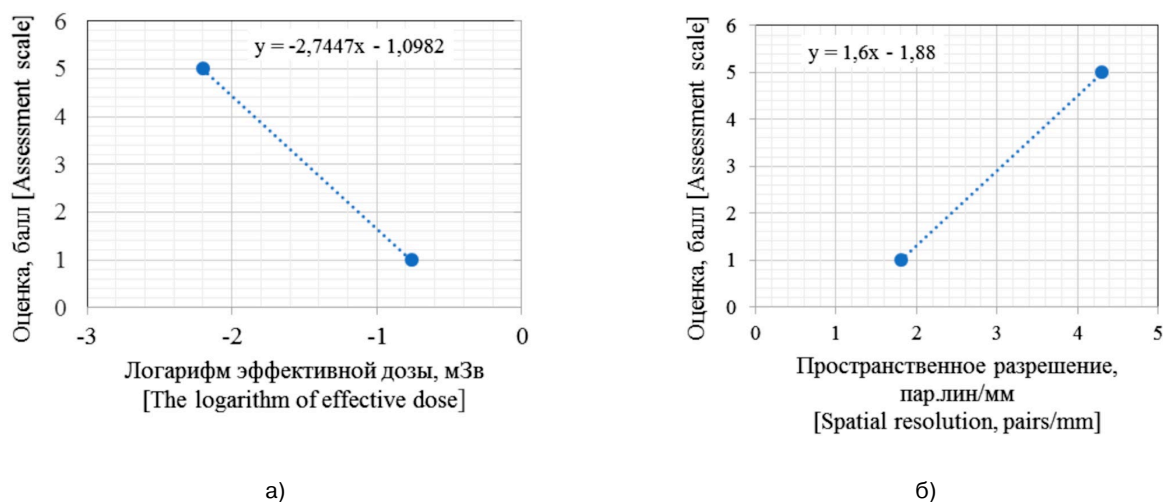


Рис. 2. Шкалы оценки: а) шкала оценки эффективной дозы; б) шкала оценки качества изображения  
[Fig. 2. Assessment scale: a) effective dose assessment scale; б) image quality rating scale]

Пространственная разрешающая способность 1,4–1,6 пар.лин/мм, на которую ориентировались более 20 лет назад [18] в настоящее время считается недостаточной для качественной диагностики заболеваний лёгких. При низком уровне разрешения аппарат не способен различать мелкие детали, что критически важно для выявления патологий, таких как мелкие опухоли, микрокальцинаты, тонкие костные переломы. Недостаточная детализация может привести к ошибкам в диагностике, пропуску заболеваний и необходимости повторных исследований, что увеличивает дозу облучения для пациента. По результатам протоколов контроля эксплуатационных параметров аппаратов, выполненных ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», для 361 аппарата значения ниже 2,2 пар.лин/мм можно считать группой аппаратов с низким качеством изображения<sup>3</sup> [14], свыше 4 пар.лин/мм можно считать высоким качеством изображения по данному параметру, что подтверждается [19].

Для оценки пространственной разрешающей способности  $B$  (пр.р.) среди измеренных значений минимальное составляло 1,8 пар.лин/мм, что соответствует указанным выше диапазонам и соответствует 1 баллу. Максимальное

из измеренных значений в 4,3 пар.лин/мм соответствует 5 баллам. Результирующая шкала представлена на рисунке 2б. Ввиду значений одного порядка измерений зависимость «разрешающая способность – оценка» была представлена в виде линейной прямой. Далее каждому определённому значению пространственной разрешающей способности присваивается оценка от 1 до 5.

Для оценки качества исследования врачом–рентгенологом  $C$  (о.вр.) была использована 5-бальная шкала, предложенная в работе [18], которая, фактически, представляет собой адаптированную шкалу Лайкерта и учитывает общую характеристику изображения, визуализацию нормальной анатомии, патологий и наличие артефактов. Одним из основных параметров в данном исследовании является качество визуализации рентгеновского аппарата методом экспертной оценки, которая оценивается в баллах по шкале от 1 до 5. Стандартное отклонение для данного показателя может быть оценено как 0,67 балла. Анализ показал, что для достижения точности оценки (полуширины 95 % доверительного интервала) качества визуализации рентгеновского

аппарата в 0,5 балла для каждого аппарата необходимо провести оценку не менее чем на 10 изображениях.

*Разработка интегральной оценки качества изображения и уровней облучения*

Показатели  $A(Dэф.)$ ,  $B(пр.р.)$  и  $C(о.вр.)$  для технологии были рассчитаны как среднее значение между оценками каждого аппарата в выборке. Для оценки качества изображения исследования с применением  $B(пр.р.)$  и  $C(о.вр.)$  был выбран весовой коэффициент 0,7. А для оценки воздействия ионизирующего излучения на организм пациента  $A(Dэф.)$  был выбран весовой коэффициент 0,3. Весовые коэффициенты значимости определены по оценкам экспертов в области лучевой диагностики с учетом того, что качество диагностического изображения наиболее важно и является более значимой величиной,

чем уровень лучевой нагрузки пациента; однако оценка лучевой нагрузки также вносит весомый вклад в результирующую оценку.

Интегральная оценка технологии приемника рентгеновских аппаратов  $Q$  в данном исследовании оценивалась по формуле:

$$Q = 0,3 \times A(Dэф.) + 0,7 \times \frac{B(пр.р.) + C(о.вр.)}{2},$$

где  $A(Dэф.)$  – оценка эффективной дозы;

$B(пр.р.)$  – оценка качества изображения;

$C(о.вр.)$  – оценка врачей-рентгенологов.

Сводные результирующие данные по сравнению оборудования и результаты интегральной оценки приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Сравнительная оценка рентгеновских аппаратов**

[Table 2]

**Comparative evaluation of X-ray machines**

| № | Технология приемника<br>[Detector technology]                                                                                                                                 | Оценка эффективной дозы $A(Dэф.)$<br>[Effective dose assessment] | Оценка качества изображения $B(пр.р.)$<br>[Image quality assessment] | Оценка врачей-рентгенологов $C(о.вр.)$<br>[Radiologists assessment] | Интегральная оценка технологии $Q$<br>[Integrated assessment of technology] |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Аналоговый рентгеновский аппарат с системой компьютерной радиографии<br>[X-ray machine with a computed radiography system]                                                    | 3,27                                                             | 2,81                                                                 | 4,37                                                                | 3,49                                                                        |
| 2 | Аналоговый рентгеновский аппарат с пленкой<br>[X-ray machine with film processing]                                                                                            | 1,97                                                             | 4,68                                                                 | 3,24                                                                | 3,36                                                                        |
| 3 | Цифровой флюорограф с ПЗС-матрицей<br>[Digital x-ray chest survey units based on CCD-camera]                                                                                  | 3,06                                                             | 1,43                                                                 | 3,48                                                                | 2,63                                                                        |
| 4 | Цифровой рентгенодиагностический аппарат со штативом типа U-дуга с плоскпанельным детектором<br>[Digital X-ray diagnostic machine with U-arc tripod with flat panel Detector] | 2,97                                                             | 4,52                                                                 | 4,76                                                                | 4,14                                                                        |
| 5 | Цифровой рентгенографический аппарат с плоскпанельным детектором<br>[Digital X-ray diagnostic machine with flat panel detector]                                               | 2,89                                                             | 4,84                                                                 | 4,58                                                                | 4,16                                                                        |
| 6 | Цифровой флюорограф с технологией сшивки<br>[Digital x-ray chest survey units with slot-scan digital radiography]                                                             | 4,89                                                             | 1,21                                                                 | 3,46                                                                | 3,10                                                                        |
| 7 | Цифровой флюорограф со сканирующей системой<br>[Scanning digital X-ray chest survey units]                                                                                    | 4,01                                                             | 1,43                                                                 | 4,22                                                                | 3,18                                                                        |

*Ограничения*

К ограничениям данной работы следует отнести число экспертов, проводящих оценку качества изображения, использовалось максимальное число экспертов, доступное на момент проведения исследования. Данные подходы обусловлены необходимостью упрощения методики сравнения технологий рентгеновских аппаратов и обеспечения воспроизводимости

результатов оценки. Кроме того, для решения подобных задач большее влияние оказывает наличие системы арбитража [19].

**Обсуждение**

В результате проведенного исследования были составлены оценки 7 технологий проведения флюорографии и рентгенографии органов грудной клетки. По эф-

фективной дозе максимальную оценку 4,89 баллов получил аппарат с технологией шивки. Оценка качества изображения показала максимальный балл (4,84 балла) при использовании цифрового рентгенографического аппарата с плоскпанельным детектором. Экспертная оценка качества изображения врачами-рентгенологами присудила максимальный балл цифровому рентгенодиагностическому аппарату со штативом типа U-дуга с плоскпанельным детектором – 4,76 балла. Интегральная оценка показала, что ведущей технологией с количеством 4,16 балла стала технология, заложенная в цифровой рентгенографический аппарат с плоскпанельным детектором.

По результатам исследования следует отметить универсальность аппаратов типа U-дуга или цифрового рентгенографического аппарата с плоскпанельным детектором, что позволяет проводить все основные виды рентгенодиагностических исследований. Это делает их более удобными и эффективными для медицинских учреждений, оказывающих первичную медико-санитарную помощь взрослому населению. В то же время использование цифровых флюорографов необходимо и обоснованно прежде всего в центрах борьбы с туберкулезом, туберкулезных диспансерах, центрах проведения массовых обследований населения, то есть там, где необходима высокая пропускная способность приемлемом качестве изображения с минимальными уровнями облучения и где не требуется проведение других видов исследований.

Представленный результат оценки технологии может быть применен только к рассматриваемой генеральной совокупности аппаратов амбулаторно-поликлинических медицинских организаций г. Москвы. Однако разработанная методика может быть уверенно приложена к любому составу и размеру выборки аппаратов в других регионах.

В исследовании Жунхуа Сун и соавторов [22] были подтверждены результаты исследования ученых из Люксембурга [23], которые указывают на невозможность стандартизации рентгенологических исследований из-за разнообразия рентгеновских аппаратов, используемых в клинической практике. Следовательно, требуется оптимизация для каждого конкретного рентгеновского аппарата и каждого рентгенологического исследования в связи с различными параметрами цифровых систем. Подобные выводы были сделаны также в работе Крофта и соавторов [23], которые проанализировали исследования, полученные на антропоморфном фантоме грудной клетки. В их исследовании было оценено восемь различных цифровых систем для диагностики заболеваний грудной клетки, и были выявлены значительные различия между ними. Также отмечалось варьирование дозы облучения в зависимости от применяемых цифровых систем.

Связь между дозой излучения и качеством изображения оценивается как количественно (через физические измерения, такие как функция передачи модуляции и квантовая эффективность), так и качественно (через экспертную оценку). Однако качественные оценки могут варьироваться в зависимости от восприятия и опыта рентгенолога и от того, насколько они отражают клиническую ситуацию [22]. Качество изображения зависит от специфики клинического вопроса, размера, плотности и контрастности объектов, а также от принципа ALARA, нацеленного на снижение воздействия ионизирующего излучения [25].

Методика оценки технологий рентгеновских аппаратов актуальна для определения оптимального оснащения общегородской сети медицинских организаций или службы здравоохранения региона. При массовом оснащении без системного и научного подхода наличие оборудования вовсе не решает проблемы доступности и качества медицинской помощи. Пример системы планирования оснащения оборудования отделения лучевой диагностики, представлен на рисунке 3. Циклический процесс, состоящий из 4 этапов, учитывает необходимые для успешного оснащения отделения лучевой диагностики факторы и обеспечивает эффективность, качество и безопасность, доступность и удовлетворенность оснащением.



**Рис. 3.** Система планирования оснащения оборудования лучевой диагностики медицинской организации

**[Fig. 3.** The planning system for equipping radiation diagnostics equipment of a medical organization]

На первом этапе формулируется «Клиническая потребность» медицинской организации в проведении рентгенологических исследований, виды которых, удовлетворяют диагностическому запросу прикрепленного населения, отвечают задачам службы лучевой диагностики города и соответствуют современным методам и лучшим мировым практикам лучевой диагностики. Второй этап – выбор технологий, который обеспечивает качество и безопасность будущей эксплуатации оборудования (наглядно продемонстрирован в рамках данной статьи). Применение разработанной методики оценки технологий рентгеновских аппаратов позволяет сформировать требования к закупке оборудования с учетом клинической потребности, радиационной безопасности и качества визуализации. В рамках этапа «Оснащение» выполняется анализ имеющегося парка оборудования по критериям COCIR [26] и/или стандарту оснащения отделения лучевой диагностики, принятому в регионе (или стране). На этапе мониторинга и онлайн прогнозирования оценивается удовлетворенность и эффективность по результатам оснащения. Внедрение в практику цифрового мониторинга и информационных технологий: радиологических информационных систем, аналитических систем мониторинга эффективности оборудования обеспечивает оперативное реагирование на изменения в видах и динамике ко-

личества исследований, в клинической потребности, в дозовых показателях путем ежегодного пересмотра планирования оснащения с горизонтом не менее 4–5 лет.

### Заключение

Разработана методика объективного количественного сравнения рентгеновских аппаратов, применяемых для диагностики органов грудной клетки. Методика, апробированная на 21 рентгеновском аппарате, позволила определить аппарат с оптимальным соотношением показателей обеспечения радиационной безопасности и качества изображения – цифровой рентгенографический аппарат с плоскопанельным детектором. Было проведено сравнение оборудования для лучевой диагностики органов грудной клетки, в том числе цифровых рентгенодиагностических аппаратов со штативом типа U-дуга и флюорографов, использующих различные технологии формирования рентгеновского изображения. Высокое качество изображений на аппаратах типа U-дуга (с плоскопанельным детектором) обеспечивает более точную диагностику, а больший, по сравнению с флюорографами, размер детектора (43 x 43, см x см) уменьшает вероятность обрезки области исследования.

Кроме того, значения эффективной дозы облучения пациентов при рентгенографии органов грудной клетки на цифровом оборудовании соответствуют установленному НРБ 99/2009 годовому ограничению эффективной дозы в 1 мЗв для профилактических исследований, что подтверждает безопасность использования данных аппаратов для рентгенографических профилактических медицинских процедур.

Разработанная в результате исследования методика оценки рентгеновских аппаратов может быть применена при выборе оборудования как для муниципальных, так и для коммерческих организаций.

Таким образом, результаты данного исследования дают готовый инструмент для оптимизации выбора оборудования для лучевой диагностики. Представленная методика описывает как объективные технические параметры оборудования, так и субъективные оценки врачей-рентгенологов, что позволяет описать функциональные возможности аппарата в комплексе. Результат работы найдет применение в систематизации оснащения медицинских организаций, оказывающих первичную медико-санитарную помощь взрослому населению.

### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Солдатов И.В. – дизайн исследования, поиск публикаций по теме, анализ литературы, проведение измерений, обработка полученных результатов, написание текста;

Водоватов А.В. – дизайн исследования, систематизация и редактирование статьи;

Лантух З.А. – проведение измерений, обработка полученных результатов, систематизация и редактирование статьи;

Соловьёв А.В. – проведение оценки качества изображения, поиск публикаций по теме;

Сморчкова А.К. – проведение оценки качества изображения;

Артюкова З.Р. – проведение оценки качества изображения;

Дружинина П.С. – обработка результатов измерения.

### Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### Сведения об источнике финансирования

Данная статья подготовлена авторским коллективом в рамках НИР «Научное развитие медико-технологических и организационных аспектов обеспечения радиационной безопасности при оказании медицинской помощи», (№ ЕГИСУ: №123031500006-9).

### Литература

1. Kim S. Deep Learning in Multi-Class Lung Diseases' Classification on Chest X-ray Images // *Diagnostics* 2022. Vol. 12. P. 915. DOI: 10.3390/diagnostics12040915.
2. Hwa Kieu S.T. A Survey of Deep Learning for Lung Disease Detection on Medical Images: State-of-the-Art, Taxonomy, Issues and Future Directions // *Journal of Imaging*. 2020. Vol. 6. P. 131. DOI: 10.3390/jimaging6120131.
3. Hansell D.M. Fleischner Society: glossary of terms for thoracic imaging // *Radiology*. 2008. Vol. 246, No 3, P. 697–722.
4. Лучевая диагностика органов грудной клетки?: национальное руководство / гл. ред. тома В.Н. Троян, А.И. Шехтер. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 584 с. URL: [https://www.geotar.ru/lots/Q0124609.html?ysclid=lw7trupp\\_hh701709187](https://www.geotar.ru/lots/Q0124609.html?ysclid=lw7trupp_hh701709187) (дата обращения: 15.05.2024).
5. Стерликов С.А., Руднев С.Г., Обухова О.В. Медико-экономическая эффективность выявления больных туберкулёзом методом флюорографии с использованием двойного независимого чтения // *Социальные аспекты здоровья населения*. 2013. № 34 (6). С. 13.
6. Алехнович А.В. Ретроспективный анализ доз облучения пациентов при рентгенорадиологических исследованиях в многопрофильных медицинских организациях московского региона // *Госпитальная медицина*. 2023. Т. 6, № 3. С. 50–58.
7. Gogoberidze Y.T. PhthisisBioMed Artificial Medical Intelligence: Software for Automated Analysis of Digital Chest X-ray/Fluorograms // *Modern Technologies in Medicine*. 2023. Vol. 15, No 4. P. 5.
8. Здравоохранение URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> (дата обращения: 15.02.2024).
9. Шахабов И.В., Мельников Ю.Ю., Смышляев А.В. Трендовый анализ деятельности подразделений лучевой диагностики в медицинских организациях, оказывающих помощь в амбулаторных условиях // *Вестник Ивановской медицинской академии*. 2020. Т. 25, № 1. С. 17–19.
10. Васильев Ю.А., Кудрявцев Н.Д., Мухортова А.Н. и др. Показатели деятельности отделений лучевой диагностики Департамента здравоохранения города Москвы в 2016–2022 гг. // *Менеджер здравоохранения*. 2024. № 5. С. 36–48.
11. Власова М.М. Научное обоснование организации службы лучевой диагностики и лучевой терапии в условиях отдельного региона в период реорганизации здравоохранения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук / С.-Петербург. гос. мед. ун-т им. И.П. Павлова. Санкт-Петербург, 2001. С. 37.
12. Schaefer-Prokop C. Digital chest radiography: An update on modern technology, dose containment and control of image quality // *European Radiology*. 2008. Vol. 18, No 9. P. 1818–1830.
13. Зеликман М.И. Цифровые системы в рентгенодиагностике. М.: ОАО «Издательство «Медицина», 2007. 208 с.:ил.
14. Леонов Б.И., Козловский Э.Б., Блинов Н.Н. Сравнительная характеристика отечественных цифровых флюорографов // *Конъюнктура и исследования*. 2005. С. 75–77.



15. Бехтерев А.В., Лабусов В.А., Путьмаков А.Н., Строков И.И. О флюорографии, цифровой рентгенографии, скрининге и эффективности // Журнал Поликлиника. 2019. Т. 18, № 9. С. 1818-1830.
16. Постников В.М. Анализ подходов к формированию состава экспертной группы, ориентированной на подготовку и принятие решений / Наука и образование. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2012. № 5.
17. Дружинина Ю.В., Лантух З.А., Толкачев К.В. и др. Референтные диагностические уровни при проведении рентгенографических исследований в г. Москве // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 103-113. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-103-113.
18. Гуржиев А.Н. Что интересует рентгенолога в цифровой флюорографии? // Радиология и практика. 2002. Т. 4, № 1. С. 53-57.
19. Бехтерев А.В., Лабусов В.А., Лохтин Р.А. и др. Поиск объективных критериев качества цифровых рентгеновских изображений для оптимизации режимов их регистрации по отношению качество/доза // Российский электронный журнал лучевой диагностики. 2019. Т. 9, № 1. С. 160-176. DOI: 10.21569/22227415201991160176. - EDN IYRPV.
20. Камышанская И.Г., Черемисин В.М., Водоватов А.В., Борискина А.Н. Результаты клинической апробации низкодозовых протоколов проведения цифровой линейной томографии органов грудной клетки // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 1. С. 47-59. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-47-59.
21. Kulberg N.S., Reshetnikov R.V., Novik V.P. Elizarov A.B. Вариативность заключений при интерпретации КТ-снимков: один за всех и все за одного // Digital Diagnostics. 2021. Т. 2, № 2. С. 105-118.
22. Sun Z. Optimization of chest radiographic imaging parameters: A comparison of image quality and entrance skin dose for digital chest radiography systems // Clinical Imaging. 2012. Vol. 36, No 4. P. 279-286.
23. Blanc D. European guidelines on quality criteria for diagnostic images // Radioprotection. 1998. Vol. 32, No 1. P. 73-74.
24. Kroft L.J.M. Comparison of eight different digital chest radiography systems: Variation in detection of simulated chest disease // American Journal of Roentgenology. 2005. Vol. 185, No 2. P. 339-346.
25. Busch H.P. Image quality and dose management in digital radiography: a new paradigm for optimisation // Radiation Protection Dosimetry. 2005. Vol. 117, No 1-3. P. 143-147.
26. COCIR Medical Imaging Equipment Age Profile & Density 2021. URL: [https://www.cocir.org/fileadmin/Publications\\_2021/COCIR\\_Medical\\_Imaging\\_Equipment\\_Age\\_Profile\\_Density\\_-\\_2021\\_Edition.pdf](https://www.cocir.org/fileadmin/Publications_2021/COCIR_Medical_Imaging_Equipment_Age_Profile_Density_-_2021_Edition.pdf) (дата обращения: 15.02.2024).

Поступила: 11.02.2025

**Солдатов Илья Владимирович** – начальник испытательной лаборатории, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы. **Адрес для переписки:** 127051, Россия, Москва, ул. Петровка, д. 24, стр. 1; E-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru  
ORCID: 0000-0002-4867-0746

**Водоватов Александр Валерьевич** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0002-5191-7535

**Лантух Зоя Александровна** – начальник отдела дозиметрического контроля и медицинской физики, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0001-6623-9610

**Соловьёв Александр Владимирович** – младший научный сотрудник отдела стандартизации и контроля качества, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы; врач-рентгенолог, Морозовская детская городская клиническая больница Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0003-4485-2638

**Сморчкова Анастасия Кирилловна** – младший научный сотрудник отдела стандартизации и контроля качества, врач-рентгенолог отдела сопровождения проектов по внедрению технологий искусственного интеллекта, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0002-9766-3390

**Артюкова Злата Романовна** – младший научный сотрудник отдела стандартизации и контроля качества, врач-рентгенолог отдела сопровождения проектов по внедрению технологий искусственного интеллекта, Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Россия  
ORCID: 0000-0003-2960-9787

**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, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0003-2921-067X

**Для цитирования:** Солдатов И.В., Водоватов А.В., Лантух З.А., Соловьёв А.В., Сморгчкова А.К., Артюкова З.Р., Дружинина П.С. Выбор оборудования для флюорографии и рентгенографии органов грудной клетки на основе оценки качества изображения и уровней облучения пациентов // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 66–76. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-66-76

## Selection of equipment for fluorography and chest radiography based on assessment of image quality and patient exposure levels

Ilya V. Soldatov<sup>1</sup>, Aleksandr V. Vodovotov<sup>2</sup>, Zoya A. Lantukh<sup>1</sup>, Alexander V. Solovet<sup>1,3</sup>, Anastasia K. Smorchkova<sup>1</sup>, Zlata R. Artyukova<sup>1</sup>, Polina S. Druzhinina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> Morozovskaya Children's City Clinical Hospital, Moscow, Russia

*Modern radiation diagnostics, due to its rapid development and improvement of the methods and technologies used, requires constant monitoring, including in the context of patient irradiation levels. The choice of appropriate X-ray diagnostic equipment is one of the key aspects of ensuring radiation protection. Materials and Methods: The study analyzed X-ray diagnostic machines and digital fluorographs with different imaging technologies (detector types), using the example of lung surveys. The evaluation of the machines was carried out using a specially developed 5-point scale in relation to key parameters of quality and safety. Results and Discussion: The results of the study show that digital X-ray diagnostic machines with a U-arc stand and digital X-ray machines with a flat panel detector demonstrate higher image quality compared to other technologies at relatively low levels of patient irradiation. An additional advantage of such devices for city clinics, compared to "classic" fluorographs, is their versatility and the ability to conduct various X-ray examinations (not only lung examinations), which ensures the interchangeability of devices and the effective redirection of the patient flow during the repair of the device. Conclusion: The results of the study emphasize the importance of choosing the appropriate X-ray equipment to ensure high quality diagnostics and patient protection, taking into account the profile of the organization's medical care.*

**Key words:** chest X-ray devices, fluorography, image quality, effective dose of patients.

### Authors' personal contribution

Ilya V. Soldatov – research design development, search for relevant publications, literature analysis, data processing, writing;

Aleksandr V. Vodovotov – research design development, systematization and editing of the review;

Zoya A. Lantukh – data processing, systematization and final editing of the review;

Alexander V. Solovet – image quality assessment, search for relevant publications;

Anastasia K. Smorchkova – image quality assessment;

Zlata R. Artyukova – image quality assessment;

Polina S. Druzhinina – data processing.

### Conflict of interests

Authors declare the absence of conflict of interest.

### Sources of funding

This paper was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled "Scientific advances in medical, technological and organizational aspects of radiation safety in health care" (USIS No: №123031500006-9).

### References

- Kim S, Rim B, Choi S, Lee A, Min S, Hong M. Deep Learning in Multi-Class Lung Diseases' Classification on Chest X-ray Images. *Diagnostics*. 2022;12(4): 915.
- Hwa Kieu ST, Bade A, Ahmad Hijazi MH, Kolivand H. A Survey of Deep Learning for Lung Disease Detection on Medical Images: State-of-the-Art, Taxonomy, Issues and Future Directions. *Journal of Imaging*. 2020;6(12): 131.
- Hansell DM, Bankier AA, MacMahon H, McLoud TC, Müller NL, Remy J. Fleischner Society: glossary of terms for thoracic imaging. *Radiology*. 2008;246(3): 697–722.
- Troyan VN. Radiation diagnostics of the chest organs: National guidelines for radiodiagnosis and therapy. Moscow: GEOTAR-Media; 2014. Available from: <https://www.geotar.ru/lots/Q0124609.html> [Accessed May 15, 2024] (In Russian).
- Sterlikov SA, Rudnev SG, Obukhova OV. Medical and cost-effectiveness of TB detection by fluorography using double reading of chest films. *Sotsialnye aspekty zdorovya naseleniya = Social aspects of public health*. 2013;34(6): 13.
- Alekhnovich AV, Druzhinina YuV, Lantukh ZA, Dmitrashchenko AA, Belyakin SA. Associated diseases of the liver and cardiovascular system. *Gospitalnaya meditsina = Hospital medicine*. 2023;6(3): 50–58.
- Gogoberidze YT, Klassen VI, Natenson MY, Prosvirkin IA, Vladimirov AV, Sharova DE, et al. PhthisisBioMed Artificial Medical Intelligence: Software for Automated Analysis of Digital Chest X-ray/Fluorograms. *Modern Technologies in Medicine*. 2023;15(4): 5.
- Health care. Available from: <https://rosstat.gov.ru/folder/13721> [Accessed May 15, 2024].
- Shakhabov IV, Melnikov YU, Smyshlayev AM. Trend analysis of radiological diagnosis units activity in out-patient medical facilities. *Vestnik Ivanovskoy meditsinskoy akademii = Vestnik of the Ivanovo Medical Academy*. 2020;25(1): 17–19.
- Vasilev YuA, Kudryavtsev ND, Mukhortova AN, Soldatov IV, Vladymyrsky AV. Operation results of radiology departments of the Moscow Health Care Department in 2016–2022. *Menedzher zdravookhraneniya = Health care manager*. 2024;5: 36–48. DOI: 10.21045/1811-0185-2024-5-36-48.
- Vlasova MM. Scientific substantiation of the organization of the service of radiation diagnostics and radiation therapy in the conditions of a separate region during the reorganization of health care. Doct. Diss. St. Petersburg; 2001. 37 p.

Ilya V. Soldatov

Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Healthcare Department

**Address for correspondence:** Petrovka Str. 24, p. 1. bldg. 1, Moscow, 127051, Russia; E-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru

12. Schaefer-Prokop C, Neitzel U, Venema HW, Uffmann M, Prokop M. Digital chest radiography: An update on modern technology, dose containment and control of image quality. *European Radiology*. 2008;18(9): 1818–1830.
13. Zelikman MI. Digital systems in medical X-ray diagnostics: monograph. Moscow: Medicine; 2007.
14. Leonov BI, Blinov NN, Kozlovsky EB, Gurchiev AN. Comparative Characteristics of Domestic Digital Photofluorographs. Business environment and research; 2005. P. 75–77.
15. Bekhterev AV, Labusov VA, Pulmakov AN, Stokov II. Radiologic Diagnostic Methods in Lung Cancer Screening: Literature Review. *Zhurnal Poliklinika = Polyclinic Magazine*. 2019;18(9): 1818–1830.
16. Postnikov VM. Analysis of approaches to forming the composition of an expert group focused on preparation and decision-making. Science and education. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2012. No 5.
17. Druzhinina YuV, Lantukh ZA, Tolkachev KV, Soldatov IV, Shatenok MP, Vodovotov AV, et al. Diagnostic reference levels for the city of Moscow during X-ray examinations. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(3): 103–113. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-103-113.
18. Gurchiev AN. What interests a radiologist in digital fluorography? *Radiologiya i praktika = Radiology and Practice*. 2002;4(1): 53–57.
19. Bekhterev AV, Labusov VA, Iokhtin RA, Pyanov DA, Stokov II, Khramov MS. Search for objective quality criteria for digital x-ray images to optimize their acquisition modes in terms of the quality/dose ratio. *Rossiyskiy elektronnyy zhurnal luchevoj diagnostiki = Russian electronic journal of radiology*. 2019; 9(1): 160–176. DOI: 10.21569/2227415201991160176.
20. Kamyshanskaya IG, Cheremisin VM, Vodovotov AV, Boriskina AN. Results of the clinical evaluation of the low-dose protocols of the digital linear tomography of the chest. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 47–59. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-47-59.
21. Kulberg NS, Reshetnikov RV, Novik VP, Elizarov AB, Gusev MA, Gombolevisky VA, et al. Inter-observer variability between readers of CT images: all for one and one for all. *Digital Diagnostics*. 2021;2(2): 105–118.
22. Sun Z, Lin C, Tyan YS, Ng KH. Optimization of chest radiographic imaging parameters: A comparison of image quality and entrance skin dose for digital chest radiography systems. *Clinical Imaging*. 2012;36(4): 279–286.
23. Blanc D. European guidelines on quality criteria for diagnostic images. *Radioprotection*. 1998;32(1): 73–74.
24. Kroft LJM, Veldkamp WJH, Mertens BJA, Boot MV, Geleijns J. Comparison of eight different digital chest radiography systems: Variation in detection of simulated chest disease. *American Journal of Roentgenology*. 2005; 185(2): 339–346.
25. Busch HP, Faulkner K. Image quality and dose management in digital radiography: a new paradigm for optimisation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2005;117(1–3): 143–147.
26. COCIR Medical Imaging Equipment Age Profile & Density 2021 Available from: [https://www.cocir.org/fileadmin/Publications\\_2021/COCIR\\_Medical\\_Imaging\\_Equipment\\_Age\\_Profile\\_Density\\_-\\_2021\\_Edition.pdf](https://www.cocir.org/fileadmin/Publications_2021/COCIR_Medical_Imaging_Equipment_Age_Profile_Density_-_2021_Edition.pdf) [Accessed February 15, 2024].

Received: February 11, 2025

**Ilya V. Soldatov** – Head of Laboratory, Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health, (Petrovka Str. 24, p. 1. bldg. 1, Moscow, 127051, Russia; E-mail: SoldatovIV2@zdrav.mos.ru) ORCID: 0000-0002-4867-0746

**Aleksandr V. Vodovotov** – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia ORCID: 0000-0002-5191-7535

**For correspondence: Zoya A. Lantukh** – Head of the Department of Dosimetry and Medical Physics, Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health ORCID: 0000-0001-6623-9610

**Alexander V. Solovev** – Junior Researcher of the Department of Standardization and Quality Control, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department; Radiologist, Morozovskaya Children's City Clinical Hospital, Moscow, Russia ORCID: 0000-0003-4485-2638

**Anastasia K. Smorchkova** – Junior Researcher of the Department of Standardization and Quality Control, Radiologist of Department of Project Support for the implementation of artificial Intelligence technologies, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russia ORCID: 0000-0002-9766-3390

**Zlata R. Artyukova** – Junior Researcher of the Department of Standardization and Quality Control, Radiologist of Department of Project Support for the implementation of artificial Intelligence technologies, Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department, Moscow, Russia ORCID: 0000-0003-2960-9787

**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, Saint Petersburg, Russia ORCID: 0000-0003-2921-067X

**For citation: Soldatov I.V., Vodovotov A.V., Lantukh Z.A., Solovev A.V., Smorchkova A.K., Artyukova Z.R., Druzhinina P.S. Selection of equipment for fluorography and chest radiography based on assessment of image quality and patient exposure levels. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 66–76. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-66-76**

## Преко́нцептивное облучение матерей: Обзор эпидемиологических исследований

Соснина С.Ф.

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики  
Федерального медико-биологического агентства, Озёрск, Россия

*Представлен обзор эпидемиологических исследований эффектов преко́нцептивного (до зачатия) радиационного воздействия на материнский организм. Освещены анатомо-физиологические особенности, влияющие на радиочувствительность и радиорезистентность женской репродуктивной системы. Отмечены биологические предпосылки, объясняющие различия в эффектах радиационного воздействия на человека и животных. На примере различных когорт описаны результаты опубликованных в открытой печати эпидемиологических оценок последствий преко́нцептивного облучения матерей для здоровья потомков. Проведен анализ исследований в когорте потомков жертв атомной бомбардировки в Японии; среди пострадавших от аварийных радиационных инцидентов и испытаний ядерного оружия; среди населения местностей с высоким уровнем естественного радиационного фона. Представлены результаты исследований среди потомков пациенток, подвергшихся терапевтическому и диагностическому облучению, и потомков матерей, контактирующих с источниками ионизирующих излучений на рабочем месте. Уделено внимание особенностям нормирования профессионального облучения в отношении женского персонала согласно международным и национальным подходам. В целом, показано, что, несмотря на обширный пласт эпидемиологических работ, на данный момент нет четкого представления об эффектах преко́нцептивного облучения матерей среди потомков. Итоги оценок последствий облучения матерей в преко́нцептивный период довольно противоречивы и, как правило, сопровождаются целым рядом неопределенностей. При проведении эпидемиологических исследований такого рода отмечаются следующие сложности: недостаточно подтвержденные медицинские исходы; использование первичных данных, основанных на анкетировании наблюдаемых; отсутствие детальной информации об индивидуальных параметрах облучения; малая статистическая мощность исследований и недостаточно длительный период наблюдения за исследуемой когортой. В этой связи показана необходимость дальнейшего анализа последствий облучения женского организма с детализацией коэффициентов риска неблагоприятных репродуктивных исходов. Отмечены перспективные направления эпидемиологического анализа эффектов преко́нцептивного облучения матерей. Описана возможность оценки эффектов пролонгированного преко́нцептивного радиационного воздействия на примере когорты работников производственного объединения «Маяк», являющегося передовым в истории атомной отрасли в стране.*

**Ключевые слова:** преко́нцептивное облучение, эффекты радиационного воздействия, потомки, материнский организм, яичники, наследуемые эффекты, производственное объединение «Маяк».

### Введение

Последствия преко́нцептивного (до зачатия) радиационного воздействия на материнский организм для здоровья последующих поколений остаются одним из самых обсуждаемых вопросов радиационной гигиены. Целый ряд экспериментальных и цитогенетических исследований подтверждают наличие эффектов радиационного воздействия у потомства; между тем итоги эпидемиологических работ не позволяют сделать однозначных выводов [1].

Специфические особенности реагирования материнского организма на облучение обусловлены, прежде всего, анатомо-физиологическими характеристиками органов репродукции. Установлено, что, в отличие от сперматогенеза – процесса динамической дифференцировки клеток, начиная с пубертатного периода и до глу-

бокой старости [2], оогенез характеризуется фиксированным количеством ооцитов в яичниках при рождении, которое с годами прогрессивно уменьшается без возможности возобновления [3]. Яичник – уникальная структура женского организма, в которой одновременно представлены различные морфогистологические единицы – от примордиальных до доминантных фолликулов [4]. Создание пула фолликулов, доступных для селекции и овуляции, представляет собой многогранный, жестко регулируемый процесс, который охватывает период от эмбрионального развития до первого репродуктивного цикла организма и, если у мышей это развитие происходит всего за несколько недель, то в организме женщины этот процесс занимает годы. Нерастущая популяция фолликулов, составляющих овариальный резерв, определяется при рождении и служит резервуаром будущей фертильности.

**Соснина Светлана Фаридовна**

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

**Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе; E-mail: sosnina@subi.su



Доказано, что генетическая радиопоражаемость зависит от стадий гаметогенеза: наиболее чувствительными являются зрелые ооциты, и для зрелых и созревающих ооцитов ионизирующее излучение более мутагенно [5], в то время как для незрелых ооцитов выявлена устойчивость к уничтожению клеток и мутагенному воздействию радиации.

Изучение механизмов, лежащих в основе радиационного повреждения матки, показало, что гамма-облучение всего тела у самок мышей вызвало обширное повреждение ДНК и апоптоз в клетках матки, нарушало децидуальную реакцию и функцию первичных стромальных клеток эндометрия, вызывало дисфункцию эндотелия маточных артерий, препятствуя ремоделированию кровеносных сосудов на ранних сроках беременности [6].

Особое внимание следует уделить специфике наследования мутаций. Так, одной из закономерностей, отличающих митохондриальное наследование от хромосомного, является однородительская передача признаков, при которой цитоплазматические гены передаются потомству, не расщепляясь. Так как яйцеклетка содержит цитоплазмы в 85000 раз больше, чем спермий, то при слиянии женская гаметта вносит гораздо больший вклад, чем мужская, поэтому практически все цитоплазматические гены передаются потомству по материнской линии. На данный момент известно более 400 точковых мутаций и более сотни структурных перестроек митохондриальной ДНК, связанных с нейромышечными и другими синдромами, предотвратить которые можно только с помощью донорской яйцеклетки [7].

В последние годы наблюдается интерес к рискам трансгенерационного воздействия радиации на женский организм с позиций эпигенетики. Исследование молекулярных механизмов эпигенетических изменений показало изменение экспрессии кластера генов, связанного с реакциями на повреждение ДНК, изменение ремоделирования хроматина и функции теломер [8].

Экстраполяция результатов цитогенетических и экспериментальных данных для совершенствования охраны здоровья женщин является чрезвычайно трудной проблемой. В настоящее время не разработаны подходы к переносу данных по степени выраженности и длительности реакций организма при протяженных и многократных радиационных экспозициях. В связи с этим тема пролонгированного прекоцептивного облучения материнского организма занимает особое положение в эпидемиологических работах.

**Цель исследования** – обзор эпидемиологических исследований последствий прекоцептивного облучения материнского организма для здоровья потомков.

### **Эпидемиологические исследования в когорте жертв атомной бомбардировки в Японии**

Эпидемиологические исследования среди людей, подвергшихся воздействию атомной бомбы в Японии, и их детей, зачатых после радиационного воздействия на родителей (когорты F1), были инициированы Комиссией по жертвам атомной бомбардировки (ABCC – Atomic Bomb Casualty Commission) в 1950-х годах. В 1975 г. ABCC была реорганизована в Фонд исследования радиационных эффектов (RERF – Radiation Effects Research Foundation), который продолжил работу ABCC и до сих пор поддерживает биомедицинские исследования, наблюдение за жизненным статусом, онкологической и неопухолевой заболеваемостью и причинами смерти в когортах выживших после атомной бомбардировки и их потомков. Обобщение результатов этого исторического исследования показало, что, несмотря на широкомасштабное изучение долгосрочных последствий для здоровья людей, переживших атомные бомбардировки

Хиросимы и Нагасаки, и их детей, регулярные медицинские осмотры наблюдаемых, широкий диапазон возрастов и доз радиационного облучения, тщательную реконструкцию индивидуальных доз облучения для надежных оценок избыточного относительного риска радиационных последствий для здоровья, включая раковые и нераковые заболевания, до сих пор никаких заметных эффектов радиационного воздействия на родителей для здоровья потомков не обнаружено.

Neel J.V. и Schull W.J. [9] подчеркивают, что зарегистрированные случаи умственной отсталости, микроцефалии и других аномалий среди детей свидетельствуют о тератогенных эффектах радиации, но не о последствиях генетических повреждений. С целью анализа риска полигенных, многофакторных заболеваний в когорте F1 (сахарного диабета, гиперхолестеринемии, гипертонии, стенокардии, инфаркта миокарда или инсульта), Tatsukawa Y. и соавт. [10] проанализировали результаты медицинских осмотров 11951 потомка, зачатых после бомбардировки. Авторы не нашли веских доказательств связи многофакторных заболеваний у потомков с дозами радиационного воздействия на матерей, но отмечают невысокий средний возраст когорты (48,6 года), чем обосновывают продолжение наблюдения для оценки риска наследуемых эффектов.

Izumi S. и соавт. [11] изучали связь облучения родителей и риска развития рака у потомков среди 40487 человек, родившихся с мая 1946 г. по декабрь 1984 г., родители которых находились в Хиросиме или Нагасаки во время бомбардировки (для подвергшихся облучению матерей медиана доз составила 133 мЗв). Установлено, что заболеваемость раком у субъектов, чьи родители подверглись облучению, не была выше, чем в контроле (0-4 мЗв), и уровень онкозаболеваемости не возрастал с увеличением дозы. В недавнем анализе Grant E.J. и соавт. [12] спустя 62 лет когортного наблюдения изучили смертность среди 75327 потомков жертв атомной бомбардировки, родившихся в период с 1946 по 1984 гг. (средняя доза облучения родителей на гонады – 264 мГр), и не обнаружили связи между радиационным облучением гонад матерей и риском смерти потомков от рака или нераковых заболеваний.

В статье, подводящей итоги работы RERF к настоящему времени, Ozasa K. и соавт. [13] отмечают, что эпидемиологическое наблюдение последствий атомных взрывов для здоровья потомков не выявило повышенного риска развития злокачественных новообразований и смерти, но исследования продолжают, поскольку когорты потомков F1 всё ещё относительно молода.

### **Эпидемиологические исследования среди пострадавших от аварийных радиационных инцидентов**

Согласно опубликованным данным, в прошлом произошло пять крупных ядерных аварий, а именно: в России [тогда СССР] на производственном объединении (ПО) «Маяк», 1957 г.; авария в Уиндскейле на одном из двух реакторов атомного комплекса «Селлафилд» (Великобритания, 1957 г.); авария на атомной электростанции «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.); авария на Чернобыльской АЭС (Украина (тогда СССР), 1986 г.) и авария на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011 г.), последствия которых для отдельных людей и общества в целом разнообразны и устойчивы [14]. Применительно к радиационному воздействию на материнский организм, исследования исходов для здоровья потомков немногочисленны, особенно для ранних инцидентов.

Так, анализ частоты самопроизвольных аборт вблизи АЭС Три-Майл-Айленд в течение нескольких месяцев после аварии не выявил их значимого увеличения по сравнению с исходными показателями до инцидента [15]. В то же время исследования последствий аварии для потомков облучен-

ного населения вблизи АЭС в базах данных научных публикаций не представлены.

В отношении последствий проживания на территориях Восточно-Уральского радиоактивного следа (в результате аварии на производственном объединении «Маяк» (ПО «Маяк») в 1957 г.) отмечено, что в 2022 г. сформирована когорта потомков первого поколения облученных лиц для последующего анализа отдаленных эффектов в зависимости от доз на гонады [16].

В последние три десятилетия основной фокус изучения последствий для потомков жертв аварийного облучения, был сосредоточен на пострадавших от Чернобыльской катастрофы. Оценка отдаленных эффектов показала, что дети, родившиеся у женщин, беременность у которых наступила спустя три месяца после аварии, имели более низкую массу тела при рождении, чаще рождались недоношенными и отличались высокой общей заболеваемостью [17]. Анализ показателей здоровья детей, родившихся от ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), отметил дисгармоничность физического развития потомков, особенно в период новорожденности; рост заболеваний костно-мышечной, нервной систем и органов кровообращения; однако, корреляционный анализ влияния радиационной нагрузки родителей на состояние здоровья потомков не выявил дозовой зависимости [18].

Анализ состояния здоровья и иммунологического гомеостаза у детей, родители которых проживали в зонах радиационного загрязнения после аварии на ЧАЭС в детском и подростковом возрасте, показал высокую патологическую пораженность (от 5600 до 6500 случаев на 1000 пациентов) по основным классам болезней, частую хронизацию патологии, полиморбидность, изменения иммунореактивности, касающиеся Т-системы и фагоцитарного звена [19].

Морфофункциональное исследование щитовидной железы у потомков облученных родителей спустя 20 лет после аварии на ЧАЭС показало значимое увеличение доли детей с зобно-измененной щитовидной железой, аутоиммунным тиреоидитом и гипоплазией [20]; наблюдался рост распространенности класса заболеваний «Психические расстройства и расстройства поведения» [21].

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглись соседние территории, что вызвало всплеск исследований, связанных с «чернобыльским шлейфом». Так, анализ временных тенденций синдрома Дауна в семи европейских регионах указал на долгосрочные изменения, которые авторы объясняют радиационным воздействием, особенно  $^{137}\text{Cs}$ , отмечая причинную связь между малыми дозами облучения вследствие аварии на ЧАЭС и «ошибками материнского мейоза» [22].

Одной из наиболее обсуждаемых проблем в радиационной эпидемиологии на текущий момент являются последствия катастрофы на японской атомной электростанции Фукусима-Дайити в марте 2011 г., возникшей в результате землетрясения и последующего цунами. Оценка уровня рождаемости среди жителей города Фукусима показала снижение рождаемости на 10 % (коэффициент рождаемости: 0,90; 95 % доверительный интервал (ДИ): 0,86–0,93) в течение первых двух лет после катастрофы; после этого динамика рождаемости стала аналогична тенденции, наблюдавшейся до аварии [23]. Yasuda S. и соавт. [24] исследовали частоту возникновения синдрома SGA – “small for gestational age” («малый для гестационного возраста») у новорожденных, и не обнаружили никаких доказательств тому, что Великое восточно-японское землетрясение и ядерная катастрофа увеличили заболеваемость SGA в префектуре Фукусима.

Оценка перинатальных исходов показала, что в префектуре Фукусима не произошло сдвигов в частоте преждевременных родов, аномалий у новорожденных или изменения массы тела при рождении в 2011–2018 гг. [25]. Однако через десять месяцев после аварии отмечался рост перинатальной смертности в шести самых загрязненных префектурах (отношение шансов (ОШ): 1,156;

95 % ДИ: 1,061–1,259;  $p=0,0009$ ), но причинно-следственная связь не была доказана, что обосновывает необходимость дальнейших исследований генетических последствий аварии для здоровья населения [26].

### Эпидемиологические исследования среди населения, пострадавшего от испытаний ядерного оружия

Представленные в открытой печати работы об эффектах прекоцептивного облучения матерей в результате тестирования ядерного арсенала относятся к исследованиям на территории Маршалловых островов и Семипалатинского полигона.

Испытания ядерного оружия на атоллах Маршалловых островов в 1946–1958 гг. привели к облучению местного населения радиоактивными осадками. Количественные оценки осадения, сделанные для 63 радионуклидов, показали, что жители южных атоллов подверглись облучению в средних дозах от 5 до 12 мГр; средних широт – от 22 до 59 мГр, тогда как жители северных атоллов – от сотен и более 1000 мГр [27]. Ретроспективное исследование врожденных пороков развития (ВПР) у потомков женщин, проживавших на загрязненных территориях, показало высокий уровень врожденной катаракты (скорректированное отношение заболеваемости: 9,3; 95 % ДИ: 3,1–27,9) и общего артериального ствола (44,0; 95 % ДИ: 2,2–896,1) [28]. Среди потомков женщин с Маршалловых островов выявлен более высокий уровень преждевременных родов и дистресса плода, родового травматизма и родоразрешения кесаревым сечением, малых размеров для гестационного возраста и анемий новорожденных. Метаанализ продемонстрировал самую высокую распространенность преждевременных родов у женщин Маршалловых островов по сравнению с другими жителями тихоокеанских островов [29].

Население, проживающее вблизи Семипалатинского ядерного полигона, является одной из крупнейших групп людей, подвергшихся радиационному воздействию в результате испытаний ядерного оружия. Четыре испытания, проведенные в 1949–1956 гг., привели к облучению населения, соответствующему внешней дозе примерно 300 мГр. Итогом исследований, начавшихся в 1960-х годах, стало создание реестра, включающего более 300000 человек, проживающих в районах, прилегающих к полигону [30], из которых более 200000 человек – потомки людей, подвергшихся прямому облучению.

Высокий уровень экстрагенитальной патологии (заболеваний почек, желудочно-кишечного тракта, щитовидной железы и др.) и гинекологической патологии зарегистрирован у беременных женщин, родители которых подверглись воздействию эффективной дозы свыше 250 мЗв [31]. Оценка репродуктивных нарушений у потомков женского пола, чьи матери и бабушки находились в зоне радиационного воздействия, выявила высокую частоту нарушений менструального цикла, гормонально зависимых заболеваний женских половых органов у всех трех поколений женщин [32].

Железникова Л.И. [33], анализируя радиационное загрязнение территории Алтайского края вследствие испытаний на Семипалатинском полигоне, указывает, что на фоне последовательного снижения уровня младенческой смертности в целом по краю наблюдался «всплеск» в 1975–79 гг. ( $p < 0,001$ ), когда в процесс воспроизводства населения вступила когорта женщин, родившихся в 50-х годах и получивших максимальные популяционные дозы радиационного воздействия; рост показателей в 1991–1995 гг. объясняется участием в воспроизводстве их дочерей, родившихся в 70-х годах. Установлено, что наиболее существенные отклонения в состоянии здоровья потомков облученных людей наблюдались у девочек, у детей облученных матерей и у внуков облученных прадедушек по материнской линии [34].

### Эпидемиологические исследования среди населения местностей с высоким природным радиационным фоном

Наиболее изученной популяцией, проживающей на территории с естественно повышенным радиационным фоном, является население индийского штата Керала, которое подвергается хроническому воздействию внешнего гамма-излучения из-за отложений  $^{232}\text{Th}$  в пляжном песке [35].

В ходе генетико-эпидемиологического обследования среди 70000 жителей Керала, у 985 человек были обнаружены аномалии, из которых 15 % были отнесены к менделевскому типу наследования, отмечено значимое увеличение синдрома Дауна, аутосомно-доминантных и мультифакториальных аномалий [36], что авторы объясняют воздействием ионизирующего излучения, а также кровным родством и близостью места рождения супруга, принимая во внимание высокий риск аномалий у потомков среди «немигрантских» пар.

Оценку влияния хронического воздействия низких доз радиации на распространенность врожденных пороков сердца (ВПС) среди живорожденных детей из семей, проживающих на побережье Кералы, приводят Sudheer K. R. и соавт. [35]. Множественный логистический регрессионный анализ показал, что риск ВПС среди новорожденных от матерей из районов с высоким уровнем природной радиоактивности в дозовой группе 1,51–3,0 мГр/год был значительно ниже по сравнению с районами с нормальным уровнем радиоактивности (ОШ = 0,72; 95 % ДИ: 0,57–0,92), и был сходным с контролем в дозовых группах 3,01–6,00 мГр/год (ОШ = 0,55, 95 % ДИ: 0,31–1,00) и более 6,0 мГр/год (ОШ = 0,96, 95 % ДИ: 0,50–1,85). Частота ВПС не имела тенденции к увеличению, связанной с дозой радиации. Наблюдалось статистически значимое ( $p=0,005$ ) снижение распространенности ВПС среди новорожденных из районов с высоким радиационным фоном (1,28 %) по сравнению с нормальным (1,79 %). Таким образом, хроническое воздействие вследствие повышенного естественного радиационного фона не привело к повышенному риску ВПС; и в группах с различными фоновыми дозами не наблюдалось линейной тенденции к увеличению пороков.

Обзор публикаций, в которых рассматривается вероятность радиационно-индуцированного рака и ранней детской смертности в регионах с высоким естественным радиационным фоном, провели Dobrzyński L. и соавт. [37]. Показано, что ни рак, ни ранняя детская смертность не коррелировали положительно с мощностью дозы в регионах с повышенной природной радиоактивностью.

### Эпидемиологические исследования среди пациентов, подвергшихся терапевтическому и диагностическому облучению

Ключевой аспект минимизации эффектов медицинского облучения заключается в определении безопасных уровней радиационного воздействия для репродуктивного здоровья пациенток. Так, анализ репродуктивных исходов пролонгированной лучевой терапии среди женщин, перенесших рак в детском возрасте, отметил увеличение частоты самопроизвольных аборт, неонатальной смертности и рождения маловесных детей у женщин с опухолью Вильмса, получивших суммарное абдоминальное облучение в дозе не менее 20 Гр; и повышенный риск самопроизвольных аборт у выживших после болезни Ходжкина [38]. Тем временем, Chiarelli A.M. и соавт. [39] не обнаружили доказательств повышенного риска самопроизвольного аборта у женщин, перенесших детский рак и подвергшихся лучевой терапии брюшной полости и таза, но отметили увеличение риска перинатальной смертности и рождения маловесного ребенка с увеличением дозы лучевой терапии, направленной на брюшную полость.

Воздействие терапевтического облучения на матку в детстве уменьшает объем матки у взрослых женщин и приводит к повышенному риску осложнений беременности и неблагоприятных исходов беременности [40]. По данным Reulen R.C. и соавт. [41], женщины, перенесшие детский рак и получавшие абдоминальную лучевую терапию, имеют в три раза выше риск преждевременных родов, в два раза выше риск низкого веса новорожденных и незначительно повышенный риск выкидыша. В целом, у выживших женщин рождалось значительно меньше потомков, чем ожидалось, особенно у тех, кто подвергся облучению брюшной полости или головного мозга. Аналогичные результаты приводят Oktem O. и соавт. [42], отмечая, что радиация губительна как для яичников, так и для матки, вызывая тем самым серьезные неблагоприятные последствия для женской репродуктивной функции в виде бесплодия, преждевременной недостаточности яичников, выкидышей, перинатальной смертности, преждевременных родов, синдрома SGA, преэклампсии и аномальной плацентации.

Обзор литературы о репродуктивных исходах после пролонгированной лучевой терапии показал, что суммарные дозы облучения матки менее 4 Гр, по-видимому, не нарушают функцию матки; в дозе 12 Гр – позволяют предположить, что беременность возможна, но с более низкой плодотворностью и большим количеством осложнений; свыше 25 Гр в детском возрасте и более 45 Гр у взрослых – требуют консультирования пациенток и избегания попыток беременности [43]. По данным Signorello L.B. и соавт. [44], облучение матки и яичников значительно повышало риск мертворождения и неонатальной смертности потомков при суммарных дозах более 10 Гр. Кроме того, у девочек, получавших лечение до менархе, облучение матки и яичников в суммарных дозах всего 1,00–2,49 Гр в дальнейшем значительно повышало риск мертворождения или неонатальной смертности.

Отмечено, что женщины, у которых после лучевой терапии сохраняется достаточная функция яичников, могут забеременеть естественным путем, но при родах у них тонкий и/или фиброзный миометрий, что ставит под угрозу безопасные роды и последующую беременность, даже при использовании донорских ооцитов [6]. Согласно практическим рекомендациям Международной группы по гармонизации рекомендаций по отдаленным последствиям детского рака (The International Late Effects of Childhood Cancer Guideline Harmonization Group) от 2021 г. [45], выжившие от рака женщины, подвергшиеся лучевой терапии, затрагивающей область матки, должны знать о риске неблагоприятных акушерских исходов, таких как выкидыш, преждевременные роды и низкий вес при рождении; однако нет никаких подтверждений повышенного риска рождения ребенка с ВПР.

Итоги исследований связи диагностического облучения матерей и риском неблагоприятных исходов для потомков неоднозначны. В североамериканском исследовании «случай-контроль» не было обнаружено никакой связи между воздействием радиации на мать и риском нейробластомы (ОШ = 1,0; 95 % ДИ: 0,7–1,3) [46]. Описана более высокая частота рождения детей с трисомией, зачатых после диагностического облучения брюшной полости пациенток, однако средний возраст этих матерей был значительно выше, чем во всей выборке [47]. В когорте женщин, подвергшихся диагностической рентгенографии по поводу подросткового идиопатического сколиоза [48], отмечено, что риски неудачных попыток забеременеть, самопроизвольные аборты и ВПР у потомков среди них были выше, чем в контроле.

Согласно современным взглядам в отношении последствий диагностического облучения матерей установлено, что отдельные диагностические лучевые процедуры (менее 50 мГр) не связаны с увеличением смертности (выкидыш или мертворождение), тератогенностью, нарушением роста, умственной отсталостью потомков или бесплодием [49].



### Эпидемиологические исследования среди потомков лиц, подвергшихся профессиональному радиационному воздействию

В связи с постоянно расширяющимся ареалом использования радиации и активной вовлеченностью женского персонала в производство и эксплуатацию источников ионизирующего излучения, радиационная безопасность будущих матерей занимает приоритетную позицию. В Рекомендациях Международной комиссии по радиационной защите отмечено, что «в целях контроля профессионального облучения нет причин проводить различие между двумя полами»; дополнительные меры контроля для сотрудницы вводятся только при установлении беременности, чтобы «дополнительная доза у зародыша/плода не превышала приблизительно 1 мЗв за оставшийся период беременности» [1]. Согласно национальным Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) «для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала» [50].

Обзор эпидемиологических работ, проводимых с целью оценки радиационной безопасности женщин-работниц, показал весьма противоречивые итоги. Так, метаанализ данных о профессиональном прекоцептивном облучении матерей обозначил повышенные риски ранних выкидышей среди женщин, работающих с радиацией [51]. Среди ветеринаров, которые сообщили о проведении более пяти рентгенографических исследований в неделю, отмечен значимо высокий риск самопроизвольного аборта по сравнению с теми, кто проводил пять или меньше (ОШ = 1,82; 95 % ДИ: 1,17-2,82) [52]. Среди рентгенологов описаны значимые связи между воздействием радиации на рабочем месте и выкидышами (относительный риск: 1,67; процент атрибутивного риска: 40 %), ВПР (10,0 и 90 % соответственно), мертворождением (7,0 и 86 %) и бесплодием (4,5 и 78 %) [53]. Кроме того, отмечено, что проблемы репродуктивного здоровья усугублялись с увеличением стажа и колебались от 17 % (для лиц, подвергавшихся воздействию в течение 1-5 лет) до 91 % (более 15 лет).

Исследование неблагоприятных перинатальных исходов в когорте потомков бортпроводниц с точки зрения прекоцептивного воздействия космического излучения не выявила статистически значимого повышенного риска преждевременных родов, низкой массы тела при рождении, перинатальной смертности и ВПР (дефектов нервной трубки, расщелины неба и губы, гипоспадии и синдрома Дауна) у детей работниц авиалиний [54].

Анализ перинатальных исходов среди работниц атомной промышленности Великобритании обнаружил высокий риск мертворождения и выкидышей на ранних сроках (менее 13 недель беременности), но дозовой зависимости не подтвердил; риск ВПР не был связан с фактом работы матери на предприятии или прекоцептивным облучением [55]. Сопоставление индивидуальных накопленных доз внешнего гамма-облучения у сотрудников Хэнфордского ядерного комплекса и исходов в виде двенадцати типов ВПР у потомков обозначило два порока: врожденный вывих бедра и трахеопищеводный свищ, показавших значимую связь с фактом работы родителей на ядерном объекте, но не с их производственным облучением; другие дефекты, включая синдром Дауна, зависимость которых от радиации считалась наиболее вероятной, не выявили доказательств такой связи [56].

Петрушкина Н.П. и соавт. [57], анализируя частоту синдрома Дауна среди 5273 потомков работников ПО «Маяк», подвергшихся прекоцептивному внешнему

гамма-облучению в дозах до 486,27 сГр, не нашли ассоциации между анеуплоидией и прекоцептивным облучением родителей, отметив преобладание синдрома у потомков матерей старше 30 лет. Оценка риска рождения ребенка с ВПР в связи с прекоцептивным воздействием ионизирующего излучения среди персонала крупнейшей АЭС Канады не показала повышенного риска среди работников атомной энергетики [58].

Изучение онкопатологии среди потомков персонала атомных предприятий Великобритании показало, что, в целом, заболеваемость солидными раками и лейкемией среди детей работников атомной отрасли была аналогична заболеваемости среди населения [59].

### Проблемы эпидемиологии эффектов прекоцептивного облучения

В обзоре свыше ста публикаций, описывающих наследуемые эффекты у детей ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС, потомков лиц, подвергшихся диагностическому, терапевтическому, производственному радиационному воздействию, сделан вывод, что трансгенерационные эффекты радиации не оказали существенного влияния на здоровье человека [60]. Приводя ряд работ с доказательствами неблагоприятных наследуемых эффектов в результате прекоцептивного радиационного воздействия на родителей, авторы обзора указывают на методологические проблемы данных исследований: получение сведений из анкет, ограниченную дозиметрию, отсутствие учета фоновых факторов, особенности статистического анализа.

Между тем некоторые ученые считают, что отсутствие четких доказательств воздействия радиации на человека, вероятно, не является результатом каких-либо проблем в используемых методологиях, но связано, в основном, с биологическими свойствами. Рассматриваются клеточные и молекулярные механизмы, с помощью которых устанавливается овариальный резерв; подчеркивается наличие важной «контрольной точки», которая обеспечивает выживание в материнском организме только ооцитов самого высокого качества; подчеркивается важность феномена «всё или ничего»; указывается вероятный механизм «контроля качества», с помощью которого дефектные в результате неблагоприятных воздействий ядра теряются, и здоровые ооциты формируют примордиальные фолликулы [4].

Обобщая публикации о наследуемых эффектах после прекоцептивного радиационного воздействия, важно отметить, что возможными причинами отличий результатов экспериментальных исследований от эпидемиологических являются: более длительные циклы спермато- и эмбриогенеза у человека; небольшое число потомков у людей; сравнительно низкие уровни облучения родителей относительно дозовых нагрузок в экспериментальных работах; малая статистическая мощность эпидемиологических исследований; влияние многообразия нерадиационных факторов на исходы в человеческой популяции; вероятностный характер и неопределенный латентный период при ряде наследуемой патологии у человека; выявление наследуемых эффектов в эксперименте из-за отсутствия «феномена спонтанных абортов» у грызунов.

Малую сопоставимость молекулярно-генетических и эпидемиологических исследований эффектов прекоцептивного облучения авторы объясняют эволюционно сформированной устойчивостью механизмов генетической репарации и генетического материала, что не приводит к реализации наследственных эффектов у человека, из-за элиминации возникающих мутаций. В научных положениях Публикации 103 Международной комиссии по радиационной защите [1] в отношении риска наследуемых эффектов сделан вывод, что прямые доказательства тому, что радиационное воздействие на родителей



приводит к избыточному выходу наследственных заболеваний у их потомства, по-прежнему, отсутствуют.

### Перспективные направления эпидемиологического анализа эффектов преконцептивного облучения матерей

В качестве перспективных эпидемиологических исследований следует рассматривать: 1) продолжение мониторинга здоровья потомков ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС и потомков населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях; 2) продление наблюдения когорты F1 потомков жертв атомной бомбардировки; 3) анализ неблагоприятных репродуктивных исходов, соматического и психического здоровья потомков матерей, подвергшихся терапевтическому, диагностическому, производственному облучению, основываясь на индивидуальных оценках доз радиационного воздействия и темпе их накопления; 4) изучение генетико-эпидемиологических эффектов прекоцептивного облучения матерей, подвергшихся внутреннему радиационному воздействию вследствие изотопных методов визуализации, интервенционного радиологического вмешательства, таргетной радионуклидной терапии и др.

Отдельный интерес представляют исследования среди потомков работниц ПО «Маяк» – первого в стране предприятия атомной отрасли, функционирующего с 1948 г., четверть персонала которого составляли женщины репродуктивного возраста. Пролонгированное радиационное воздействие как внешнего, так и внутреннего облучения, измеренные индивидуальные дозы и точные данные о сценариях производственного облучения, долгосрочное и унифицированное медицинское наблюдение за персоналом ПО «Маяк» и потомками позволяют проводить оценку риска неблагоприятных исходов на основе качественных исходных данных.

### Заключение

Изучение здоровья потомков, чьи матери подверглись до зачатия радиационному воздействию, занимает особое положение в эпидемиологических исследованиях. По оценкам многих исследователей, эффектам радиационного воздействия на материнский организм уделяется гораздо меньше внимания, что требует дальнейшего изучения.

Краткое рассмотрение опубликованных результатов эпидемиологических исследований в различных когортах прекоцептивно облученных матерей показало, что, при всем многообразии работ, единого заключения об опасности облучения женского организма до зачатия для здоровья потомков в настоящее время не существует, и изучение стохастических эффектов прекоцептивного облучения матерей сохраняет свою актуальность. Учитывая противоречивость эпидемиологических данных, требуется дальнейшее научное наблюдение репродуктивных исходов среди прекоцептивно облученных матерей, исходя из целей радиационной безопасности женского персонала, контактирующего с источниками ионизирующих излучений на рабочих местах.

Принимая во внимание описанные «уязвимые места» эпидемиологического анализа в виде отсутствия верифицированной медицинской информации об исходах, сбора данных посредством анкетирования, неопределенности дозовых характеристик радиационного воздействия, требуется проведение масштабных исследований эффектов прекоцептивного облучения матерей для конкретизации коэффициентов риска радиационно-индуцированной патологии среди потомков.

### Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Сведения об источнике финансирования

Обзор выполнен в рамках прикладной научно-исследовательской работы «Техногенное облучение и его отдаленные медицинские последствия» (шифр «Последствия-25») на основании Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2035 года».

### Литература

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // *Annals of the ICRP*. 2007. Vol. 37, No 2-4. P. 1-332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003
2. Штаут М.И. Аспекты морфогенетических преобразований хроматина на прелептотенных стадиях сперматогенеза у человека // *Андрология и генитальная хирургия*. 2016. Т. 17, № 2. С. 104–111.
3. DeFelicci M., Klinder F.G., Farini D. et al. Establishment of oocyte population in the fetal ovary: primordial germ cell proliferation and oocyte programmed cell death // *Reproductive Biomedicine Online*. 2005. Vol. 10, No 2. P. 182–191. DOI: 10.1016/s1472-6483(10)60939-x.
4. Марченко Л.А., Машаева Р.И., Чернуха Г.Е. Современные воззрения на ранние этапы фолликулогенеза и механизмы формирования преждевременной недостаточности яичников // *Гинекология*. 2020. Т. 22, № 5. С. 57–60.
5. Russell L.B., Russell W.L. Frequency and nature of specific-locus mutations induced in female mice by radiations and chemicals: a review // *Mutation Research*. 1992. Vol. 296 (1-2). P. 107–127. DOI: 10.1016/0165-1110(92)90035-8.
6. Griffiths M.J., Winship A.L., Hutt K.J. Do cancer therapies damage the uterus and compromise fertility? // *Human Reproduction Update*. 2020. Vol. 26, No 2. P. 161–173. DOI: 10.1093/humupd/dmz041.
7. Мазунин И.О., Володько Н.В., Стариковская Е.Б., Сукерник Р.И. Митохондриальный геном и митохондриальные заболевания человека // *Молекулярная биология*. 2010. Т. 44, № 5. С. 755–772.
8. Leung C.T., Yang Y., Yu K.N. et al. Low-Dose Radiation Can Cause Epigenetic Alterations Associated with Impairments in Both Male and Female Reproductive Cells // *Frontiers in genetics*. 2021. Vol. 12. P. 710143. DOI: 10.3389/fgene.2021.710143.
9. Neel J.V., Schull W.J. The Children of Atomic Bomb Survivors: A Genetic Study. Washington, D.C.: National Academy Press, 1991. 518 p.
10. Tatsukawa Y., Cologne J.B., Hsu W.L. et al. Radiation risk of individual multifactorial diseases in offspring of the atomic-bomb survivors: a clinical health study // *Journal of Radiological Protection*. 2013. Vol. 33, No 2. P. 281–293.
11. Izumi S., Suyama A., Koyama K. Radiation-related mortality among offspring of atomic bomb survivors: a half-century of follow-up // *International Journal of Cancer*. 2003. Vol. 107, No 2. P. 292–297. DOI: 10.1002/ijc.11400.
12. Grant E.J., Furukawa K., Sakata R. et al. Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study // *The Lancet. Oncology*. 2015. Vol. 16. No 13. P. 1316–1323. DOI: 10.1016/S1470-2045(15)00209-0.
13. Ozasa K., Grant E.J., Kodama K. Japanese Legacy Cohorts: The Life Span Study Atomic Bomb Survivor Cohort and Survivors' Offspring // *Journal of epidemiology*. 2018. Vol. 28, No 4. P. 162–169. DOI: 10.2188/jea.JE20170321.
14. Hasegawa A., Tanigawa K., Ohtsuru A. et al. Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima // *Lancet*. 2015. Vol. 386, No 9992. P. 479–488. DOI: 10.1016/S0140-6736(15)61106-0.
15. Goldhaber M.K., Staub S.L., Tokuhata G.K. Spontaneous abortions after the Three Mile Island nuclear accident: a life table analysis // *American Journal of Public Health*. 1983. Vol. 73, No 7. P. 752–759. DOI: 10.2105/ajph.73.7.752.
16. Крестинина Л.Ю., Шалагинов С.А., Старцев Н.В. Уральская когорта потомков облученного населения // *Вопросы радиационной безопасности*. 2022. № 4 (108). С. 86–94.
17. Балева Л.С., Зосимова И.В., Яковлева И.Н. Ближайшие и отдаленные эффекты радиационного воздействия на состояние здоровья детского населения // *Педиатрия. Журнал им. Г.Н. Сперанского*. 1989. № 1. С. 100.

18. Ионова О.М. Динамика здоровья детей, родившихся от ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС, и профилактика его нарушений: автореф. дисс. ...канд. мед. наук. Иваново, 2004. 21с.
19. Молева В.И., Кашина-Ярмак В.Л. Особенности состояния здоровья и иммунологического гомеостаза у детей, родители которых проживали в зонах радиационного загрязнения в детском и подростковом возрасте // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. 2011. № 1(5). С. 42–47.
20. Балева Л.С., Яковлева И.Н., Сипягина А.Е. и др. Морфофункциональные изменения щитовидной железы у детей, облученных в результате аварии на Чернобыльской АЭС, и детей-потомков облученных родителей // Вопросы практической педиатрии. 2012. Т. 7, № 4. С. 13–16.
21. Балева Л.С., Сипягина А.Е., Юров И.Ю. и др. Особенности задержки психического развития (ЗПР) детей, рожденных от облученных родителей // Российский вестник перинатологии и педиатрии. 2017. Т. 62, № 4. С. 223–224.
22. Sperling K., Neitzel H., Scherb H. Evidence for an increase in trisomy 21 (Down syndrome) in Europe after the Chernobyl reactor accident // Genetic Epidemiology. 2012. Vol. 36, No 1. P. 48–55. DOI: 10.1002/gepi.20662.
23. Kurita N. Association of the Great East Japan Earthquake and the Daiichi Nuclear Disaster in Fukushima City, Japan, with Birth Rates // JAMA network open. 2019. Vol. 2, No 1. P. e187455. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2018.7455.
24. Yasuda S., Kyojuka H., Nomura Y. et al. Influence of the Great East Japan Earthquake and the Fukushima Daiichi nuclear disaster on the birth weight of newborns in Fukushima Prefecture: Fukushima Health Management Survey // The journal of maternal-fetal & neonatal medicine. 2017. Vol. 30, No 24. P. 2900–2904. DOI: 10.1080/14767058.2016.1245718.
25. Kyojuka H., Murata T., Yasuda S. et al. The Effects of the Great East Japan Earthquake on Perinatal Outcomes: Results of the Pregnancy and Birth Survey in the Fukushima Health Management Survey // Journal of Epidemiology. 2022. Vol. 32 (Suppl. XII). P. S57–S63. DOI: 10.2188/jea.JE20210444.
26. Scherb H.H., Mori K., Hayashi K. Increases in perinatal mortality in prefectures contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident in Japan: A spatially stratified longitudinal study // Medicine (Baltimore). 2016. Vol. 95, No 38. e4958. DOI: 10.1097/MD.00000000000004958.
27. Simon S.L., Bouville A., Land C.E., Beck H.L. Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands associated with exposure to radioactive fallout from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests: summary // Health Physics. 2010. Vol. 99, No 2. P. 105–123. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181dc523c.
28. Nembhard W.N., McElfish P.A., Ayers B. et al. Nuclear radiation and prevalence of structural birth defects among infants born to women from the Marshall Islands // Birth Defects Research. 2019. Vol. 111, No 16. P. 1192–1204. DOI: 10.1002/bdr2.1551.
29. Wu B., Arslanian K.J., Nvhan K. et al. Preterm birth among Pacific Islanders in the United States and the US-affiliated Pacific Islands: A systematic review and meta-analysis // Birth. 2023. Vol. 50, No 2. P. 287–299. DOI: 10.1111/birt.12713.
30. Apsalikov K.N., Lipikhina A., Grosche B. et al. The State Scientific Automated Medical Registry, Kazakhstan: an important resource for low-dose radiation health research // Radiation and Environmental Biophysics. 2019. Vol. 58, No 1. P. 1–11. DOI: 10.1007/s00411-018-0762-5.
31. Гурьева В.А. Состояние здоровья женщин в двух поколениях, проживающих на территории, подвергшейся радиационному воздействию при испытаниях ядерного устройства на Семипалатинском полигоне: автореф. дисс. ... докт. мед. наук. Санкт-Петербург, 1996. 34 с.
32. Дударева Ю.А., Гурьева В.А. Диапазон репродуктивных нарушений у потомков и их прародителей, находившихся в зоне радиационного воздействия // Проблемы репродукции. 2020. Т. 26, № 5. С. 72–77.
33. Железникова Л.И. Радиационное загрязнение территории и врожденные аномалии развития (на примере воздействия на население Алтайского края испытаний ядерных устройств на Семипалатинском полигоне): автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Кемерово, 2000. 23 с.
34. Гордеев В.В. Отдаленные медицинские последствия ядерного взрыва 1949 г. у детей 1 и 2 поколений облученного населения Алтайского края: автореф. дисс. ... докт. мед. наук. Москва, 2003. 46 с.
35. Sudheer K.R., Mohammad Kova P.K., Prakash A.J. et al. Evaluation of risk due to chronic low dose ionizing radiation exposure on the birth prevalence of congenital heart diseases (CHD) among the newborns from high-level natural radiation areas of Kerala coast, India // Genes and environment. 2022. Vol. 44, No 1. P. 1. DOI: 10.1186/s41021-021-00231-0.
36. Padmanabhan V.T., Sudanan A.P., Brahmaputhran C.K. et al. Heritable anomalies among the inhabitants of regions of normal and high background radiation in Kerala: results of a cohort study. 1988–1994 // International Journal of Health Services. 2004. Vol. 34, No 3. P. 483–515. DOI: 10.2190/3XYE-QJPU-01BF-8YKE.
37. Dobrzyński L., Fornalski K.W., Feinendegen L.E. Cancer Mortality Among People Living in Areas with Various Levels of Natural Background Radiation // Dose Response. 2015. Vol. 13, No 3. P. 1559325815592391. DOI: 10.1177/1559325815592391.
38. Blatt J. Pregnancy outcome in long-term survivors of childhood cancer // Medical and Pediatric Oncology. 1999. Vol. 33, No 1. P. 29–33. DOI: 10.1002/(sici)1096-911x(199907)33:1<29::aid-mpo6>3.0.co;2-2.
39. Chiarelli A.M., Marrett L.D., Darlington G.A. Pregnancy outcomes in females after treatment for childhood cancer // Epidemiology. 2000. Vol. 11, No 2. P. 161–166. DOI: 10.1097/00001648-200003000-00013.
40. van de Loo L.E.X.M., van den Berg M.H., Overbeek A. et al. Uterine function, pregnancy complications, and pregnancy outcomes among female childhood cancer survivors // Fertility and sterility. 2019. Vol. 111, No 2. P. 372–380. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2018.10.016.
41. Reulen R.C., Zeegers M.P., Wallace W.H. et al. Pregnancy outcomes among adult survivors of childhood cancer in the British Childhood Cancer Survivor Study // Cancer Epidemiology, Biomarkers and Prevention. 2009. Vol. 18, No 8. P. 2239–2247. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-09-0287.
42. Oktom O., Kim S.S., Seleke U. et al. Ovarian and Uterine Functions in Female Survivors of Childhood Cancers // Oncologist. 2018. Vol. 23, No 2. P. 214–224. DOI: 10.1634/theoncologist.2017-0201.
43. Teh W.T., Stern C., Chander S., Hickey M. The impact of uterine radiation on subsequent fertility and pregnancy outcomes // Biomed Research International. 2014. Vol. 2014. P. 482968. DOI: 10.1155/2014/482968.
44. Signorello L.B., Mulvihill J.J., Green D.M. et al. Stillbirth and neonatal death in relation to radiation exposure before conception: a retrospective cohort study // Lancet. 2010. Vol. 376, No 9741. P. 624–630. DOI: 10.1016/S0140-6736(10)60752-0.
45. van der Kooi A.L.F., Mulder R.L., Hudson M.M. et al. Counseling and surveillance of obstetrical risks for female childhood, adolescent, and young adult cancer survivors: recommendations from the International Late Effects of Childhood Cancer Guideline Harmonization Group // American Journal of Obstetrics and Gynecology. 2021. Vol. 224, No 1. P. 3–15. DOI: 10.1016/j.ajog.2020.05.058.
46. Patton T., Olshan A.F., Neolia J.P. et al. Parental exposure to medical radiation and neuroblastoma in offspring // Paediatric and perinatal epidemiology. 2004. Vol. 18, No 3. P. 178–185. DOI: 10.1111/j.1365-3016.2004.00554.x.
47. Uchida I.A., Holunda R., Lawler C. Maternal radiation and chromosomal aberrations // Lancet. 1968. Vol. 2. No 7577. P. 1045–1049. DOI: 10.1016/s0140-6736(68)91525-0.
48. Goldberg M.S., Mayo N.E., Levy A.R. et al. Adverse reproductive outcomes among women exposed to low levels of ionizing radiation from diagnostic radiography for adolescent idiopathic scoliosis // Epidemiology. 1998. Vol. 9, No 3. P. 271–278.
49. Lowe S.A. Ionizing radiation for maternal medical indications // Prenatal Diagnosis. 2020. Vol. 40, No 9. P. 1150–1155. DOI: 10.1002/pd.5592.
50. Комментарии к Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) / под ред. Г.Г. Онищенко. М.: НИИРГ, 2012. 216 с.
51. Lassi Z.S., Imam A.M., Dean S.V., Bhutta Z.A. Preconception care: caffeine, smoking, alcohol, drugs and other environmental chemical/radiation exposure // Reproductive Health. 2014. Vol. 11 (Suppl. 3). S6. DOI: 10.1186/1742-4755-11-S3-S6.
52. Shirangi A., Fritschi L., Holman C.D. Maternal occupational exposures and risk of spontaneous abortion in veterinary practice // Occupational and Environmental Medicine. 2008. Vol. 65, No 11. P. 719–725. DOI: 10.1136/oem.2007.035246.
53. Shakhathreh F.M. Reproductive health of female radiographers. Saudi Medical Journal. 1999. Vol. 20, No 5. P. 365–368.

54. Irgens Å., Irgens L.M., Reitan J.B. et al. Pregnancy outcome among offspring of airline pilots and cabin attendants // Scandinavian Journal of Work, Environment and Health. 2003. Vol. 29, No 2. P. 94–99. DOI: 10.5271/sjweh.710.
55. Doyle P., Maconochie N., Roman E. et al. Fetal death and congenital malformation in babies born to nuclear industry employees: report from the nuclear industry family study // Lancet. 2000. Vol. 356, No 9238. P. 1293–1299. DOI: 10.1016/S0140-6736(00)02812-9.
56. Sever L.E., Gilbert E.S., Hessel N.A., McIntyre J.M. A case-control study of congenital malformations and occupational exposure to low-level ionizing radiation // American Journal of Epidemiology. 1988. Vol. 127, No 2. P. 226–242. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a114799.
57. Петрушкина Н.П. Здоровье потомков работников предприятия атомной промышленности – производственного объединения «Маяк». М.: РАДЭКОН, 1998. 184 с.
58. Green L.M., Dodds L., Miller A.B. et al. Risk of congenital anomalies in children of parents occupationally exposed to low level ionising radiation // Occupational and Environmental Medicine. 1997. Vol. 54, No 9. P. 629–635. DOI: 10.1136/oem.54.9.629.
59. Roman E., Doyle P., Maconochie N. et al. Cancer in children of nuclear industry employees: report on children aged under 25 years from nuclear industry family study // British Medical Journal. 1999. Vol. 318, No 7196. P. 1443–1450. DOI: 10.1136/bmj.318.7196.1443.
60. Little M.P., Goodhead D.T., Bridges B.A., Bouffler S.D. Evidence relevant to untargeted and transgenerational effects in the offspring of irradiated parents // Mutation Research. 2013. Vol. 753, No 1. P. 50–67. DOI: 10.1016/j.mrrev.2013.04.001.

Поступила: 15.05.2025

**Соснина Светлана Фаридовна** – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник отдела эпидемиологии, Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. Адрес для переписки: 456783, Озёрск, Челябинская область, Озёрское шоссе, 19; E-mail: sosnina@subi.su  
ORCID: 0000-0003-1553-0963

Для цитирования: Соснина С.Ф. Прекоцептивное облучение матерей: Обзор эпидемиологических исследований // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 77–86. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-77-86

## Preconception exposure of mothers: The review of epidemiological research

Svetlana F. Sosnina

Southern Urals federal research and clinical center of medical biophysics of the Federal Medical-Biological Agency, Ozyorsk, Russia

*A review of epidemiological research of the effects of preconception (prior to conception) radiation exposure to a mother's body was presented. The anatomical and physiological characteristics that affect radiosensitivity and radioresistance of female reproductive system were reported. Biological prerequisites accounting for different effects of radiation exposure to animals and humans were indicated. The results that were published in open access on epidemiological assessments of the effects of preconception exposure of mothers to the health of their offspring were described based on various cohorts as examples. Analysis of the research work was performed for the cohort of the offspring of atomic bomb survivors in Japan, among the offspring of the individuals affected by radiation accidents and nuclear weapon tests, among the population of the sites with high natural level of radiation. The results of research work among the offspring of female patients exposed to diagnostic and therapeutical radiation and of the offspring of the mothers who were in contact with ionizing radiation sources at workplaces were presented. A special attention was paid to specifics of standardization of occupational exposure of female personnel according to national and international approaches. Generally, it was demonstrated that despite a wide range of epidemiological research works there is still no clear understanding of the effects of preconception exposure of mothers to their offspring. The total results of the analysis of the effects of maternal exposure in preconception period are quite controversial and usually involve a range of uncertainties. In the course of such sort of epidemiological research the following difficulties are indicated: poor verification of medical outcomes, primary data based on questionnaire surveys, lack of detailed information on individual exposure parameters, low statistical power of research works and too short period of follow up of the cohort under research. For this reason, the necessity of further analysis of the effects of exposure of female body was indicated involving detailed risk coefficients of unfavorable reproductive outcomes. Prospective trends for epidemiological analysis of preconception exposure of mothers were indicated. Feasibility of assessment of long-term preconception radiation exposure was described based on the cohort of female workers of Mayak Production Association that is the leading atomic enterprise in the national history.*

**Key words:** preconception irradiation, effects of radiation exposure, offspring, maternal organism, ovaries, heritable effects, Mayak Production Association.

**Sosnina Svetlana Faridovna**

Southern Urals Federal Research and Clinical Center

**Address for correspondence:** Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia; E-mail: sosnina@subi.su



## Conflict of interests

The author declares no conflict of interest.

## Sources of funding

The review was carried out within the framework of the applied research work "Technogenic radiation and its long-term medical consequences" (code "Consequences-25") on the basis of the Federal Target Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016-2020 and for the period up to 2035.

## References

1. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007;37(2-4): 1-332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003.
2. Shtaut MI. Morphogenetic chromatin reorganization aspects at the preleptoten stage of human spermatogenesis. *Andrologiya i genitalnaya khirurgiya = Andrology and genital Surgery*. 2016;17(2): 104-111. (In Russian).
3. De Felici M, Klinger FG, Farini D, Scadaferri ML, Iona S, Lobascio M. Establishment of oocyte population in the fetal ovary: primordial germ cell proliferation and oocyte programmed cell death. *Reproductive Biomedicine Online*. 2005;10(2): 182-91. DOI: 10.1016/s1472-6483(10)60939-x.
4. Marchenko LA, Mashaeva RI, Chernuha GE. Current views on the molecular mechanisms of the initial stages of folliculogenesis. *Ginekologiya = Gynecology*. 2020; 22(5): 57-60. (In Russian).
5. Russell LB, Russell WL. Frequency and nature of specific-locus mutations induced in female mice by radiations and chemicals: a review. *Mutation Research*. 1992;296(1-2): 107-27. DOI: 10.1016/0165-1110(92)90035-8.
6. Griffiths MJ, Winship AL, Hutt KJ. Do cancer therapies damage the uterus and compromise fertility? *Human Reproduction Update*. 2020;26(2): 161-173. DOI: 10.1093/humupd/dmz041.
7. Mazunin IO, Volodko NV, Starikovskaya EB, Sukernik RI. Mitochondrial genome and human mitochondrial diseases. *Molekulyarnaya biologiya = Molecular Biology*. 2010; 44(5): 755-772. DOI: 10.1134/S0026893310050018. (In Russian).
8. Leung CT, Yang Y, Yu KN, Tam N, Chan TF, Lin X, et al. Low-Dose Radiation Can Cause Epigenetic Alterations Associated with Impairments in Both Male and Female Reproductive Cells. *Frontiers in genetics*. 2021;12: 710143. DOI: 10.3389/fgene.2021.710143
9. Neel JV, Schull WJ. The Children of Atomic Bomb Survivors: A Genetic Study. Washington, D.C.: National Academy Press; 1991. 518 p.
10. Tatsukawa Y, Cologne JB, Hsu WL, Yamada M, Ohishi W, Hida A, et al. Radiation risk of individual multifactorial diseases in offspring of the atomic-bomb survivors: a clinical health study. *Journal of Radiological Protection*. 2013;33(2): 281-293. DOI: 10.1088/0952-4746/33/2/281
11. Izumi S, Suyama A, Koyama K. Radiation-related mortality among offspring of atomic bomb survivors: a half-century of follow-up. *International Journal of Cancer*. 2003;107(2): 292-7. DOI: 10.1002/ijc.11400.
12. Grant EJ, Furukawa K, Sakata R, Sugiama H, Sadakane A, Takahashi I, et al. Risk of death among children of atomic bomb survivors after 62 years of follow-up: a cohort study. *The Lancet. Oncology*. 2015;16(13): 1316-1323. DOI: 10.1016/S1470-2045(15)00209-0.
13. Ozasa K, Grant EJ, Kodama K. Japanese Legacy Cohorts: The Life Span Study Atomic Bomb Survivor Cohort and Survivors' Offspring. *Journal of epidemiology*. 2018;28(4): 162-169. DOI: 10.2188/jea.JE20170321
14. Hasegawa A, Taniqawa K, Ohtsuru A, Yabe H, Maeda M, Shigemura J, et al. Health effects of radiation and other health problems in the aftermath of nuclear accidents, with an emphasis on Fukushima. *Lancet*. 2015;386(9992): 479-488. DOI: 10.1016/S0140-6736(15)61106-0.
15. Goldhaber MK, Staub SL, Tokuhata GK. Spontaneous abortions after the Three Mile Island nuclear accident: a life table analysis. *American Journal of Public Health*. 1983;73(7): 752-9. DOI: 10.2105/ajph.73.7.752.
16. Krestinina LJu, Shalaginov SA, Starcev NV. Urals cohort of exposed population offspring. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation safety issues*. 2022;4(108): 86-94. (In Russian).
17. Baleva LS, Zosimova IV, Jakovleva IN. Immediate and long-term effects of radiation exposure on the health of the child population. *Pediatrics. Zhurnal im. G.N. Speranskogo = Pediatrics. The G.N. Speransky Journal*. 1989;1: 100. (In Russian).
18. Ionova OM. The dynamics of the health of children born to the liquidators of the Chernobyl accident and the prevention of its violations: abstract. diss. ... Cand. Med. Sciences: Ivanovo; 2004. 21 p. (In Russian).
19. Moleva VI, Kashina-Jarmak VL. Features of the state of health and immunological homeostasis in children whose parents lived in radiation pollution zones in childhood and adolescence. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedejatelnosti = Medical and biological problems of vital activity*. 2011; 1(5): 42-47. (In Russian).
20. Baleva LS, Yakovleva IN, Sipyagina AE, Karakhan NM, Danilycheva LI, Zemlyanskaya ZK, et al. Morphofunctional changes of the thyroid gland in children exposed to radiation as a result of the Chernobyl nuclear power plant accident and children-descendants of irradiated parents. *Voprosy prakticheskoy pediatrii = Issues of practical pediatrics*. 2012;7(4): 13-16. (In Russian).
21. Baleva LS, Sipyagina AE, Jurov IYu, Sukhorukov VS, Karakhan NM. Features of mental retardation in children born to irradiated parents. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii = Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2017;62(4): 223-224. (In Russian).
22. Sperling K, Neitzel H, Scherb H. Evidence for an increase in trisomy 21 (Down syndrome) in Europe after the Chernobyl reactor accident. *Genetic Epidemiology*. 2012;36(1): 48-55. DOI: 10.1002/gepi.20662.
23. Kurita N. Association of the Great East Japan Earthquake and the Daiichi Nuclear Disaster in Fukushima City, Japan, with Birth Rates. *JAMA network open*. 2019;2(1): e187455. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2018.7455.
24. Yasuda S, Kvozuka H, Nomura Y, Fujiimori K, Goto A, Yasumura S, et al. Influence of the Great East Japan Earthquake and the Fukushima Daiichi nuclear disaster on the birth weight of newborns in Fukushima Prefecture: Fukushima Health Management Survey. *The journal of maternal-fetal & neonatal medicine*. 2017;30(24): 2900-2904. DOI: 10.1080/14767058.2016.1245718.
25. Kvozuka H, Murata T, Yasuda S, Ishii K, Fujiimori K, Goto A, et al. The Effects of the Great East Japan Earthquake on Perinatal Outcomes: Results of the Pregnancy and Birth Survey in the Fukushima Health Management Survey. *Journal of Epidemiology*. 2022;32(Suppl\_XII): S57-S63. DOI: 10.2188/jea.JE20210444.
26. Scherb HH, Mori K, Hayashi K. Increases in perinatal mortality in prefectures contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident in Japan: A spatially stratified longitudinal study. *Medicine (Baltimore)*. 2016;95(38): e4958. DOI: 10.1097/MD.0000000000004958.
27. Simon SL, Bouville A, Land CE, Beck HL. Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands associated with exposure to radioactive fallout from Bikini and Eniwetok nuclear weapons tests: summary. *Health Physics*. 2010;99(2): 105-23. DOI: 10.1097/HP.0b013e3181dc523c.
28. Nembhard WN, McElfish PA, Avers B, Collins RT, Shan X, Rabie NZ, et al. Nuclear radiation and prevalence of structural birth defects among infants born to women from the Marshall Islands. *Birth Defects Research*. 2019;111(16): 1192-1204. DOI: 10.1002/bdr2.1551.
29. Wu B, Arslanian KJ, Nyhan K, Suss R, Mahoney M, McElfish PA, et al. Preterm birth among Pacific Islanders in the United States and the US-affiliated Pacific Islands: A systematic review and meta-analysis. *Birth*. 2023;50(2): 287-299. DOI: 10.1111/birt.12713.
30. Apsalikov KN, Lipikhina A, Grosche B, Belikhina T, Ostroumova E, Shinkarev S, et al. The State Scientific Automated Medical Registry, Kazakhstan: an important resource for low-dose radiation health research. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2019;58(1): 1-11. DOI: 10.1007/s00411-018-0762-5.
31. Gureva VA. The state of health of women in two generations living in the territory exposed to radiation during the tests of a nuclear device at the Semipalatinsk test site: abstract. diss. ... Doctor of Medical Sciences. Saint-Petersburg; 1996. 34 p. (In Russian).



32. Dudareva YuA, Gureva VA. The range of reproductive disorders in offspring and their progenitors who were in the radiation exposure zone. *Problemy reproduktivnoy = Problems of reproduction*. 2020;26(5): 72-77. (In Russian).
33. Zheleznikova LI. Radiation contamination of the territory and congenital malformations (on the example of the impact on the population of the Altai Territory of nuclear device tests at the Semipalatinsk test site): abstract. diss. ... Cand. Biol. Sciences. Kemerovo; 2000. 23 p. (In Russian).
34. Gordeev VV. Long-term medical consequences of the nuclear explosion of 1949 in children of the 1st and 2nd generations of the irradiated population of the Altai Territory: abstract. diss. ... Doctor of Medical Sciences. Moscow; 2003. 46 p. (In Russian).
35. Sudheer KR, Mohammad Koya PK, Prakash AJ, Prakash AM, Manoj Kumar R, Shyni S, et al. Evaluation of risk due to chronic low dose ionizing radiation exposure on the birth prevalence of congenital heart diseases (CHD) among the newborns from high-level natural radiation areas of Kerala coast, India. *Genes and environment*. 2022;44(1): 1. DOI: 10.1186/s41021-021-00231-0.
36. Padmanabhan VT, Sugunan AP, Brahmaputhran CK, Nandini K, Pavithran K. Heritable anomalies among the inhabitants of regions of normal and high background radiation in Kerala: results of a cohort study, 1988-1994. *International Journal of Health Services*. 2004;34(3): 483-515. DOI: 10.2190/3XYE-QJPU-01BF-8YKE.
37. Dobrzyński L, Fornalski KW, Feinendegen LE. Cancer Mortality Among People Living in Areas with Various Levels of Natural Background Radiation. *Dose Response*. 2015;13(3): 1559325815592391. DOI: 10.1177/1559325815592391.
38. Blatt J. Pregnancy outcome in long-term survivors of childhood cancer. *Medical and Pediatric Oncology*. 1999;33(1): 29-33. DOI: 10.1002/(sici)1096-911x(199907)33:1<29::aid-mpo6>3.0.co;2-2.
39. Chiarelli AM, Marrett LD, Darlington GA. Pregnancy outcomes in females after treatment for childhood cancer. *Epidemiology*. 2000;11(2): 161-6. DOI: 10.1097/00001648-200003000-00013.
40. van de Loo LEXM, van den Berg MH, Overbeek A, van Dijk M, Damen L, Lambalk CB, et al. Uterine function, pregnancy complications, and pregnancy outcomes among female childhood cancer survivors. *Fertility and sterility*. 2019;111(2): 372-380. DOI: 10.1016/j.fertnstert.2018.10.016.
41. Reulen RC, Zeegers MP, Wallace WH, Frobisher C, Taylor AJ, Lancashire ER, et al. Pregnancy outcomes among adult survivors of childhood cancer in the British Childhood Cancer Survivor Study. *Cancer Epidemiology, Biomarkers and Prevention*. 2009;18(8): 2239-2247. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-09-0287.
42. Oktem O, Kim SS, Selek U, Schatmann G, Urman B. Ovarian and Uterine Functions in Female Survivors of Childhood Cancers. *Oncologist*. 2018;23(2): 214-224. DOI: 10.1634/theoncologist.2017-0201.
43. Teh WT, Stern C, Chander S, Hickey M. The impact of uterine radiation on subsequent fertility and pregnancy outcomes. *Biomed Research International*. 2014;2014: 482968. DOI: 10.1155/2014/482968.
44. Signorello LB, Mulvihill JJ, Green DM, Munro HM, Stovall M, Weathers RE, et al. Stillbirth and neonatal death in relation to radiation exposure before conception: a retrospective cohort study. *Lancet*. 2010;376(9741): 624-630. DOI: 10.1016/S0140-6736(10)60752-0.
45. van der Kooi ALF, Mulder RL, Hudson MM, Kremer LCM, Skinner R, Constine LS, et al. Counseling and surveillance of obstetrical risks for female childhood, adolescent, and young adult cancer survivors: recommendations from the International Late Effects of Childhood Cancer Guideline Harmonization Group. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*. 2021;224(1): 3-15. DOI: 10.1016/j.ajog.2020.05.058.
46. Patton T, Olshan AF, Neglia JP, Castleberry RP, Smith J. Parental exposure to medical radiation and neuroblastoma in offspring. *Paediatric and perinatal epidemiology*. 2004;18(3): 178-185. DOI: 10.1111/j.1365-3016.2004.00554.x.
47. Uchida IA, Holunga R, Lawler C. Maternal radiation and chromosomal aberrations. *Lancet*. 1968;2(7577): 1045-1049. DOI: 10.1016/s0140-6736(68)91525-0.
48. Goldberg MS, Mayo NE, Levv AR, Scott SC, Poitras B. Adverse reproductive outcomes among women exposed to low levels of ionizing radiation from diagnostic radiography for adolescent idiopathic scoliosis. *Epidemiology*. 1998;9(3): 271-278.
49. Lowe SA. Ionizing radiation for maternal medical indications. *Prenatal Diagnosis*. 2020;40(9): 1150-1155. DOI: 10.1002/pd.5592.
50. Comments on Radiation Safety Standards (NRB-99/2009) / ed. Academician of the Russian Academy of Medical Sciences G.G. Onishchenko. Moscow: Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene; 2012. 216 p. (In Russian).
51. Lassi ZS, Imam AM, Dean SV, Bhutta ZA. Preconception care: caffeine, smoking, alcohol, drugs and other environmental chemical/radiation exposure. *Reproductive Health*. 2014;11: S3-S6. DOI: 10.1186/1742-4755-11-S3-S6.
52. Shirangi A, Fritschi L, Holman CD. Maternal occupational exposures and risk of spontaneous abortion in veterinary practice. *Occupational and Environmental Medicine*. 2008;65(11): 719-725. DOI: 10.1136/oem.2007.035246.
53. Shakhatareh FM. Reproductive health of male radiographers. *Saudi Medical Journal*. 2001;22(2): 150-152.
54. Irgens Å, Reitan JB, Haldorsen T, Tveten U. Pregnancy outcome among offspring of airline pilots and cabin attendants. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*. 2003;29(2): 94-99. DOI: 10.5271/sjweh.710.
55. Doyle P, Maconochie N, Roman E, Davies G, Smith PG, Beral V. Fetal death and congenital malformation in babies born to nuclear industry employees: report from the nuclear industry family study. *Lancet*. 2000;356(9238): 1293-9. DOI: 10.1016/S0140-6736(00)02812-9.
56. Sever LE, Gilbert ES, Hessol NA, McIntyre JM. A case-control study of congenital malformations and occupational exposure to low-level ionizing radiation. *American Journal of Epidemiology*. 1988;127(2): 226-242. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a114799.
57. Petrushkina NP. The health of the descendants of employees of the atomic industry enterprise, the Mayak Production Association. Moscow: RADEKON; 1998. 184 p. (In Russian).
58. Green LM, Dodds L, Miller AB, Tomkins DJ, Li J, Escobar M. Risk of congenital anomalies in children of parents occupationally exposed to low level ionising radiation. *Occupational and Environmental Medicine*. 1997;54(9): 629-635. DOI: 10.1136/oem.54.9.629.
59. Roman E, Doyle P, Maconochie N, Davies G, Smith PG, Beral V. Cancer in children of nuclear industry employees: report on children aged under 25 years from nuclear industry family study. *British Medical Journal*. 1999;318(7196): 1443-50. DOI: 10.1136/bmj.318.7196.1443.
60. Little MP, Goodhead DT, Bridges BA, Bouffler SD. Evidence relevant to untargeted and transgenerational effects in the offspring of irradiated parents. *Mutation Research*. 2013;753(1): 50-67. DOI: 10.1016/j.mrrev.2013.04.001

Received: May 15, 2025

**For correspondence: Svetlana F. Sosnina** – Candidate of Medical Sciences, Senior Research Scientist at the Department of Epidemiology, Southern Urals Federal Research and Clinical Center of Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency of Russia (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456780, Russia; E-mail: sosnina@subi.ru)  
ORCID: 0000-0003-1553-0963

**For citation: Sosnina S.F. Preconception exposure of mothers: The review of epidemiological research. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 77–86. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-77-86**

## Динамика содержания $^{137}\text{Cs}$ в мясе сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС

Фесенко С.В.<sup>1</sup>, Емлютина Е.С.<sup>1</sup>, Исамов Н.Н.<sup>1</sup>, Карпенко Е.И.<sup>1</sup>, Горяинов В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

<sup>2</sup> Департамент сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

*Данные по изменению концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, до настоящего времени практически не обобщались. Целью данного исследования являлся анализ данных радиологического мониторинга содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе сельскохозяйственных животных, в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся интенсивному загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. Материалы и методы: Проведен анализ данных о содержании  $^{137}\text{Cs}$  в 27519 пробах мяса сельскохозяйственных животных, отобранных организациями Минсельхоза России в период с 1986 по 2013 гг. Определение  $^{137}\text{Cs}$  в пробах проводили гамма-спектрометрическим методом. Результаты и обсуждение: Отмечено, что динамика изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах животных в значительной степени определялась особенностями проведения защитных мероприятий в сфере сельскохозяйственного производства. В первый год после аварии средние периоды полуснижения составляли 116 дней для говядины и 99 дней для свинины. В последующем (1987–1992 гг.) эффективные периоды полуснижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  варьировали в пределах от 1,5 до 1,6 лет. С 1993 года снижение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах животных замедлилось, а периоды полуснижения составляли 9,8 лет для говядины и 16,1 года для свинины. Отмечены различия в динамике снижения загрязнения мяса, производимого в общественном и частном секторе, а также в динамике содержания  $^{137}\text{Cs}$  в свинине и говядине.*

**Ключевые слова:** Чернобыльская АЭС, агропромышленное производство, мясо сельскохозяйственных животных, юго-западные районы Брянской области, радиационный мониторинг,  $^{137}\text{Cs}$ .

### Введение

Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) привела к долгосрочным негативным последствиям для сельского хозяйства загрязненных областей. Особенно высокие уровни загрязнения сельскохозяйственной продукции отмечались в юго-западных районах Брянской области, что обусловило необходимость интенсивного применения защитных мероприятий, включая ограничения на производство отдельных видов продукции. [1–12].

Особенно важным для обеспечения безопасного проживания сельского населения на загрязненных территориях было внедрение мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции животноводства – молока и мяса, вклад которых достигал до 90 % дозы внутреннего облучения населения [6–8, 12–18]. Для планирования и обоснования мероприятий в сфере сельскохозяйственного производства на загрязненных территориях был организован комплексный мониторинг загрязнения продукции агропромышленного комплекса (АПК) [19–24].

В Брянской области система мониторинга была создана на базе Центра агрохимрадиологии «Брянский»,

ветеринарного радиологического центра Брянской области, а также районных ветеринарных и агрохимических лабораторий [25–27]. Особенно интенсивно он проводился в шести юго-западных районах Брянской области и трех южных районах Калужской области, что позволило получить уникальные данные по закономерностям поведения  $^{137}\text{Cs}$  в сфере АПК и поступления его в сельскохозяйственную продукцию [8, 18–27].

Проведение мониторинга в сфере сельского хозяйства в течение 35 лет после чернобыльской аварии обеспечило эффективное планирование проведения защитных и реабилитационных мероприятий в сфере АПК, а также позволило обосновать нормативы допустимых уровней содержания  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции и продуктах питания в различные периоды времени после аварии [24, 28, 29].

Анализ динамики загрязнения продукции растениеводства в течении 35-летнего периода после аварии на ЧАЭС приведен в наших публикациях [12, 20, 21, 25–26], тогда как закономерности динамики содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке в различные периоды после аварии описаны в наших публикациях [5, 7, 12, 16–19, 24, 28].

**Фесенко Сергей Викторович**

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

**Адрес для переписки:** 249032, Россия, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1;

E-mail: Corwin\_17F@mail.ru

Настоящая публикация включает анализ данных по изменению концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах сельскохозяйственных животных. Такого рода данные до настоящего времени практически не обобщались. Основной причиной этого являлось то, что контроль загрязнения мяса был организован на мясокомбинатах и включал входной радиационный контроль. Животные с концентрациями  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах выше допустимых уровней переводились на дополнительный откорм на чистых кормах. Эта мера существенно изменила естественную динамику изменения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в организме животного, а концентрации радионуклидов, определяемые в результате выборочного выходного контроля, были близки к значениям временных допустимых уровней (ВДУ). Вследствие этого для анализа динамики содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС, использовались данные, полученные непосредственно в хозяйствах, что позволяет провести их сопоставление с информацией по другим видам продукции.

В первых трех публикациях этого цикла [25–27] представлены данные по динамике изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продукции растениеводства, кормах сельскохозяйственных животных и молоке на протяжении 35 лет после Чернобыльской аварии. Представленная публикация, в которой приводятся данные по концентрациям  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах животных, является заключительной статьей этого цикла. Данные по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в молоке, которые не использовались для подготовки предыдущей статьи [27], включены в настоящую статью для сравнения динамики содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке и мясе сельскохозяйственных животных.

Для облегчения сравнения закономерностей изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в различных видах сельскохозяйственной продукции все статьи, посвященные этой теме, имеют близкую структуру и аналогичное представление полученных результатов.

**Цель исследования** – анализ данных радиоэкологического мониторинга содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе сельскохозяйственных животных, производимого в юго-западных районах Брянской области, подвергшихся интенсивному радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС.

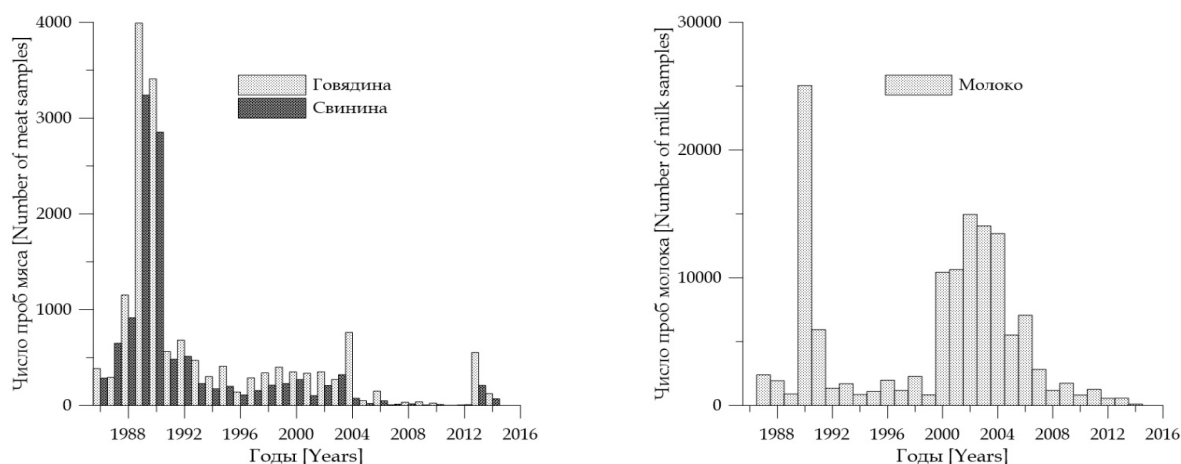
## Задачи исследования

1. Обобщение данных по концентрациям  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах сельскохозяйственных животных, полученных организациями Минсельхоза России и ВНИИРАЭ после аварии на ЧАЭС.
2. Определение периодов полуснижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах крупного рогатого скота (КРС) и свиней в различные временные интервалы после аварии.
3. Оценка роли факторов, определяющих динамику снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе КРС после аварии на ЧАЭС.

## Материалы и методы

### Исходные данные

Для анализа закономерностей изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке использовались данные радиоэкологического мониторинга, организованного Ветеринарным радиологическим центром Брянской области и его лабораторными подразделениями в семи юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красногорском, Новозыбковском и Стародубском. Динамика проведения мониторинга молока и мяса показана на рисунке 1. В 1986–1989 гг. мониторинг загрязнения молока проводился главным образом в общественном секторе, при этом отбор проб организациями ветеринарной службы носил ограниченный характер. В первую очередь это было связано с недостаточным обеспечением этих служб средствами, обеспечивающими достаточную точность измерений. Однако уже в 1991 году Минсельхозом РФ были проведены закупки оборудования и было принято решение о существенном увеличении числа отбираемых и измеряемых проб [22]. В 1991–1992 гг. объемы исследований проб молока, мяса и кормов для животных на территории Брянской области были максимальными. Некоторое увеличение интенсивности мониторинга загрязнения мяса в 1998–2004 гг. было связано с внедрением национальных программ Российской Федерации по преодолению последствий радиационных аварий [2, 3].



**Рис. 1.** Динамика измерения проб животноводства в юго-западных районах Брянской области после аварии на ЧАЭС

[Fig. 1. Dynamics of livestock sample measurement in southwestern districts of the Bryansk region after the Chernobyl accident]



Наиболее интенсивно мониторинг молока проводился в хозяйствах и населенных пунктах юго-западных районов Брянской области, в которых отмечались высокие плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  сенокосов и пастбищ [25-27]. Объем мониторинга в целом соответствовал как плотности загрязнения сельскохозяйственных угодий, так и количеству хозяйств общественного и частного секторов. Данные, представленные на рисунке 1 показывают, что число отбираемых в юго-западных районах проб молока было существенно больше числа отбираемых проб мяса животных.

В период с 1986 по 2013 гг. было измерено 215 450 проб молока и 27 519 проб мяса сельскохозяйственных животных. При этом на одну измеренную пробу мяса крупного рогатого скота приходилось примерно 13 проб молока. Отмеченные различия определяются тем, что у каждой коровы в течение ее жизни по мере необходимости можно отобрать много проб молока, тогда как проба мяса может быть получена только один раз при убое животного.

#### Анализ данных

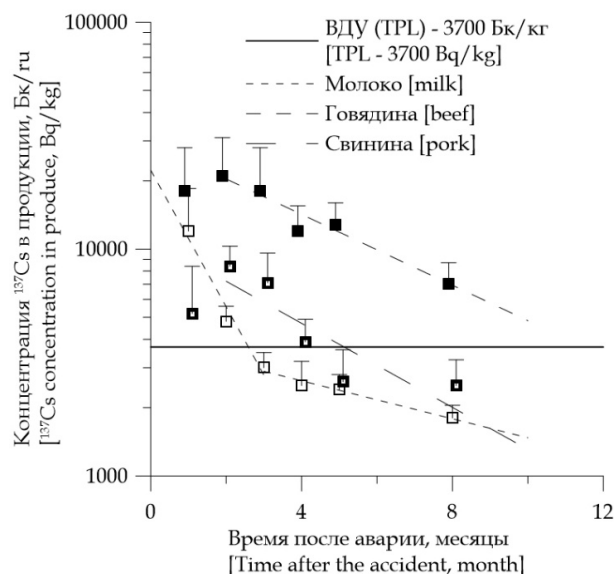
Для анализа данных применялся такой же подход, как и в других статьях этой серии [25-27], то есть каждая выборка данных анализировалась на выбросы; для малых выборок, содержащих менее 25 значений, применялся критерий Диксона, а для выборок, содержащих 25 значений и более, применялись стандартные статистические критерии [28]. Поскольку критерий Диксона применяется к нормально распределенным величинам, для каждой выборки производился тест на «нормальность» распределения. После отбраковки данных определяли параметры распределения. Периоды полуснижения рассчитывались с помощью стандартных методов линейной регрессии [28].

### Результаты и обсуждение

#### Динамика содержания $^{137}\text{Cs}$ в продукции животноводства: 1986 г.

Данные по динамике концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства по данным работы [29] представлены на рисунке 2. Приведенные данные отражают различный характер поступления  $^{137}\text{Cs}$  в молоко и другие виды продукции животноводства.

Максимальные концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в молоке отмечались в начале мая 1986 года, то есть уже через несколько дней после выпадений, что объясняется достаточно коротким временем, необходимым для поступления радионуклида в молочную железу. Наибольшие концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах животных отмечалось существенно позже. Максимальное содержание радионуклида в мышцах сельскохозяйственных животных в условиях, когда отмечалось достаточно быстрое уменьшение поверхностного загрязнения растений, достигалось только через несколько недель после выпадений. Кроме того, следует учитывать, что на рисунке 2 представлены усредненные по месяцам данные, что сглаживает наблюдаемую динамику изменения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства. Средние периоды полуснижения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства, рассчитанные для периода июнь–декабрь 1986 года достаточно близки, и отражают динамику самоочищения кормовых растений, используемых при формировании кормов для животных (рис. 2).



**Рис. 2.** Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства в 1986 году. Данные измерений представлены квадратами и среднеквадратичными отклонениями. Пунктирными и штрихпунктирными линиями показаны экспоненциальные аппроксимации этих данных

**[Fig. 2.** Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in animal products in 1986. Measurement data are presented by squares and standard deviations. The dotted and dashed lines show the exponential approximations of these data]

Вследствие особенностей поступления радионуклидов в продукцию животноводства аппроксимация данных за первый год после аварии отклоняется от экспоненциальной зависимости. Средние периоды полуснижения составили 116 дней ( $R^2=0,71$ ) для говядины и 99 дней ( $R^2=0,77$ ) для свинины. В динамике содержания радионуклидов в молоке наблюдаются два периода полуснижения: первый, равный 30 суткам ( $R^2=0,97$ ), и второй, составляющий 210 суток ( $R^2=0,97$ ).

Для обеспечения безопасности населения загрязненных территорий в мае 1986 года были введены нормативы на допустимое содержание радионуклидов в продукции [30]. Первый норматив, установленный 5 мая 1986 года, составлял 3700 Бк/л для  $^{131}\text{I}$  в продукции. Позднее, 30 мая 1986 года, был введен норматив 3700 Бк/кг для молока и мяса. С 1 августа 1986 года вступил в силу более строгий норматив (370 Бк/л) на временно допустимое содержание бета-излучающих радионуклидов в молоке [1, 30]. В соответствии с этим изменялись контрольные уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в кормах, что обеспечивало связь между критериями обеспечения безопасности продуктов питания и критериями оптимизации реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве [31].

Данные, представленные на рисунке 2, показывают, что в юго-западных районах Брянской области ВДУ содержания радиоцезия в молоке и говядине превышались на протяжении всего 1986 года. Только в свинине содержание  $^{137}\text{Cs}$  было ниже допустимых нормативов, начиная с октября–ноября 1986 года.



*Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства: 1987–2013 гг.*

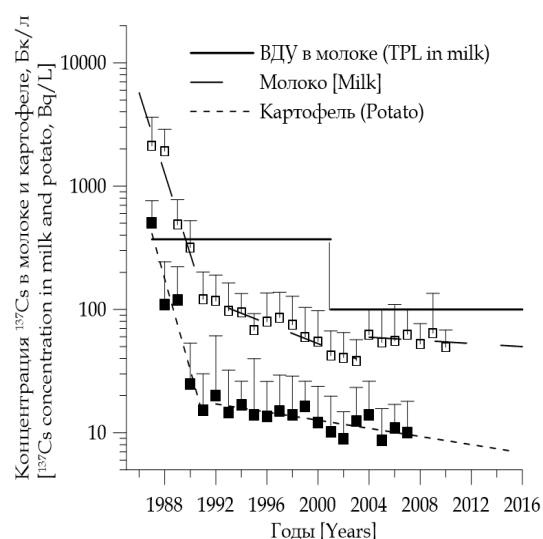
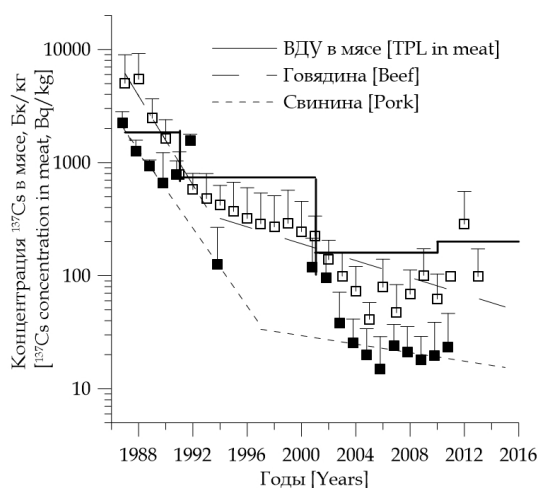
На рисунке 3 приведены данные по динамике содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе животных – говядине и свинине – для всего периода времени, когда проводился мониторинг загрязнения продукции животноводства. Для сравнения на этом же рисунке показана динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке и картофеле. Сплошной линией показаны ВДУ содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе и соответствующие периоды их действия.

По мере улучшения радиационной обстановки значения ВДУ в пищевых продуктах регулярно пересматривались в сторону уменьшения [32–33]. После чернобыльской аварии такой подход стимулировал сельскохозяйственных производителей к совершенствованию технологий и применению реабилитационных мероприятий в сельском хозяйстве [34–35].

Японские регулирующие органы, спустя год после аварии на АЭС «Фукусима-1», использовали аналогичный метод [32–33]. Этот подход близок концепции применения ре-

ферентных дозовых уровней, рекомендованной в Публикации 103 МКРЗ [35, 36]. Согласно этой концепции, использованной при подготовке международного стандарта безопасности GSR Part 3 [37], референтные уровни должны быть установлены в пределах рекомендуемого диапазона годовой дозы (1–20 мЗв) и впоследствии снижаться с течением времени, основываясь на анализе изменений радиационной обстановки на загрязненных территориях.

Установленные в 1991 году ВДУ содержания  $^{137}\text{Cs}$  в говядине и в молоке были близки к средним уровням загрязнения, наблюдавшимся в наиболее пострадавших районах России в тот период. В дальнейшем концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в мясе уменьшались, что приводило к последовательному введению новых, более низких нормативов ВДУ. Таким образом, сопоставление динамики загрязнения молока и говядины с соответствующими изменениями ВДУ подтверждает соответствие применяемых мер общей концепции регулирования содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продуктах питания, описанной ранее.



**Рис. 3.** Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции в период с 1987 по 2013 гг. Данные измерений представлены квадратами и среднеквадратичными отклонениями. ВДУ показаны сплошной линией  
**[Fig. 3.** Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in animal products from 1987 to 2013. Measurement data are presented by squares and standard deviations. TPLs are shown with a solid line]

Динамика снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе существенно отличалась в разные периоды времени. Первый период охватывает 1987–1992 гг., когда мероприятия по снижению содержания  $^{137}\text{Cs}$  проводились наиболее активно и охватывали все большие площади кормовых угодий. В этот период снижение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства и кормах было обусловлено применением агротехнических мероприятий на сенокосах, пастбищах и пахотных землях, используемых для выращивания кукурузного силоса и концентрированных кормов [1].

В течении второго периода объемы применения мероприятий в сельском хозяйстве снизились, а темпы уменьшения загрязнения продукции сильно замедлились, в третий период в результате внедрения мероприятий федеральной целевой программы Российской Федерации «Сохранение и восстановление плодородия почв

земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы» произошло дальнейшее существенное уменьшение загрязнения продукции [1–5, 34].

После завершения мероприятий федеральной целевой программы динамика снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в кормовых растениях определялась как увеличением поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растения в результате уменьшения плодородия почв, так и естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов [25–27].

Для анализа данных по динамике изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе животных, так же, как и в предыдущих статьях этого цикла, использовался подход, основанный на использовании периодов полуснижения (таблица).

Таблица

**Эффективные периоды полуснижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продукции животноводства в юго-западных районах Брянской области в 1987–2014 гг.**

[Table]

**Effective half-lives of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in animal products in the southwestern districts of the Bryansk region in 1987–2021]**

| Виды продукции<br>[Products] | $T_{1/2}^1$ ,<br>лет<br>[years] | $R^2$ | $T_{1/2}^2$ ,<br>лет<br>[years] | $R^2$ | $T_{1/2}^3$ ,<br>лет<br>[years] | $R^2$ |
|------------------------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Говядина<br>[Beef]           | 1,64                            | 0,95  | 9,8                             | 0,85  | –                               | –     |
| Свинина<br>[Pork]            | 1,54                            | 0,97  | 16,1                            | 0,6   | > 50                            | 0,2   |
| Молоко<br>[Milk]             | 0,92                            | 0,95  | 7,3                             | 0,84  | 46,2                            | 0,1   |
| Сено [Hay]                   | 1,4                             | 0,88  | 7,8                             | 0,88  | > 100                           | –     |
| Зерно<br>[Grain]             | 1,04                            | 0,86  | 20,4                            | 0,47  | 9,5                             | 0,85  |
| Картофель<br>[Potato]        | 0,92                            | 0,94  | 18,2                            | 0,49  | –                               | –     |

Периоды полуснижения рассчитывались для интервалов времени, когда темпы этого снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в продукции АПК были отличны. В соответствие с этим были рассчитаны периоды полуснижения концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в говядине и свинине  $T_{1/2}^1$ ,  $T_{1/2}^2$  и  $T_{1/2}^3$  (таблица). Для сравнения в этой таблице показаны периоды полуснижения  $^{137}\text{Cs}$  в других продуктах сельского хозяйства.

Первый, начальный период преодоления последствий чернобыльской аварии в сельском хозяйстве, соответствовал времени, когда мероприятия в сельском хозяйстве применялись наиболее активно. Периоды полуснижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в говядине и свинине были довольно близки (1,54–1,64 года) и были несколько больше периодов полуснижения  $^{137}\text{Cs}$  в молоке.

Продолжительность вторых периодов полуснижения (с 1993 по 2000 гг.) значительно варьировала: от 2,4 до 24 лет. Третьи периоды (начиная с 2000 года) длились от 10,5 лет до более чем 25 лет. Средние значения периодов полуснижения для юго-западных районов составили 1,4, 9,8 и 17,2 года. Важно отметить, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в свинине снижалась быстрее в первый период и медленнее во второй. Это согласуется с динамикой изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в зерне и картофеле – основных компонентах рациона свиней. Этот интервал включает промежуток времени, когда объемы проведения защитных агротехнических мероприятий сократились, а довольно низкие уровни загрязнения молока поддерживались за счет применения ферроцинсодержащих препаратов. В период с 2000 года мероприятия проводились в рамках федеральных целевых программ. В результате, в районах с наибольшими уровнями загрязнения молока отмечены как более короткие периоды полуснижения, так и наибольшие отличия измеренных уровней загрязнения молока от уровней загрязнения, оцененных на основе данных о загрязнении кормов.

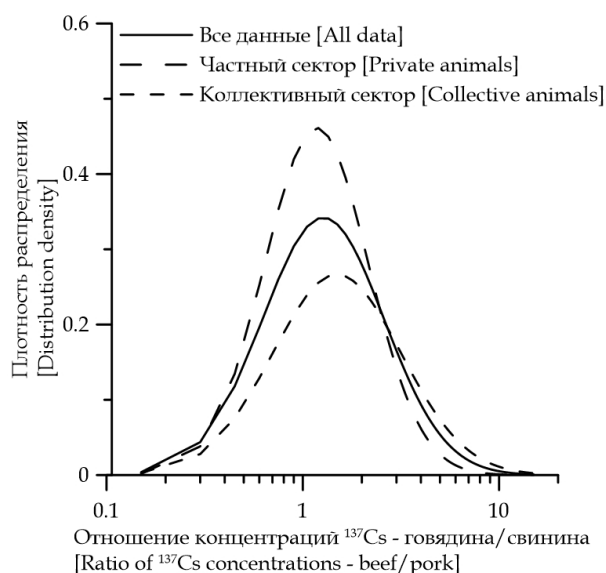
Средние значения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в свинине на протяжении всего рассматриваемого периода были существенно ниже, чем в говядине. Это позволяет предположить, что допустимые уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в говядине служили ориентиром при определении и изменении ВДУ для мяса и других мясных продуктов.

Коэффициенты перехода из рациона в мышцы животных варьируют в широком диапазоне. В последнее время был выполнен анализ данных научной информации как российских, так и мировых данных по коэффициентам перехода радионуклидов в продукцию животноводства [38–40]. По этим данным, в зависимости от продуктивности и условий содержания животных, коэффициенты перехода  $^{137}\text{Cs}$  варьируют в диапазоне от 0,12 до 0,4 сутки/кг при геометрическом среднем 0,2 сутки/кг для свиней и от  $4,7 \times 10^{-3}$  до  $9,6 \times 10^{-3}$  сутки/кг при геометрическом среднем 0,022 сутки/кг для КРС.

Состав кормов в рационе животных также значительно варьирует. Типовые рационы кормления выбракованного взрослого КРС на заключительной стадии откорма могут включать до 40 кг зеленой массы растений (травы) в сутки в летний период и по 14 кг сенажа и силоса и 2 кг концентратов. Рекомендуемый для этого региона зимний рацион откорма мясных свиней весом 80 – 100 кг содержит 2,5 – 3,0 концентратов, 2,0 – 3,5 кг картофеля или зеленой массы, 100 г травяной муки, а также некоторые другие компоненты (такие как соль и мел), которые не оказывают влияние на загрязнение продукции. В частном секторе корма включают обрат, сыворотку и отходы кухни.

По данным многолетнего мониторинга в зоне аварии на ЧАЭС при содержании в сене 1 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$  в других видах кормов, таких как силос, корнеплоды, концентрированные и зеленые корма, в среднем содержится 0,23, 0,17, 0,18 и 0,76 Бк/кг [31]. Таким образом можно ожидать, что суточное поступление  $^{137}\text{Cs}$  при содержании радионуклида в кормах и составах рациона, описанных выше, составит 10 – 30 Бк/сут для КРС и 1–2 Бк/сут для свиней. При этих условиях концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах животных составит 0,3 – 0,7 Бк/кг для КРС и 0,2 – 0,3 Бк/сут для свиней, то есть в зависимости от рационов кормления животных концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в говядине будет в 1,5 – 2,2 раза выше, чем в свинине. Для оценки отношений концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в говядине к концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в свинине, адаптированных к условиям загрязненных районов Российской Федерации, расчеты проводились для каждой комбинации данных: хозяйство/вид продукции/год. Частотные распределения этих отношений, отражающих полученную выборку, представлены на рисунке 4.

Арифметические, геометрические средние, медианы и стандартные отклонения составили: 2,15, 1,69, 1,51 и 1,83 (75 значений) и 2,78, 2,02, 2,0 и 2,55 (78 значений) для частных и коллективных животных соответственно. Для всей выборки животных, для которых имелись данные, полученные в одном хозяйстве в один год и для обоих видов животных (больше 5 животных каждого вида), эти значения составили 2,47, 1,74, 1,85 и 2,25, соответственно (153 значения).



**Рис. 4.** Плотности распределения величин отношений концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в говядине к концентрациям этого радионуклида в свинине  
**[Fig. 4.** Distribution densities of the ratio values of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in beef to concentrations of the radionuclide in pork]

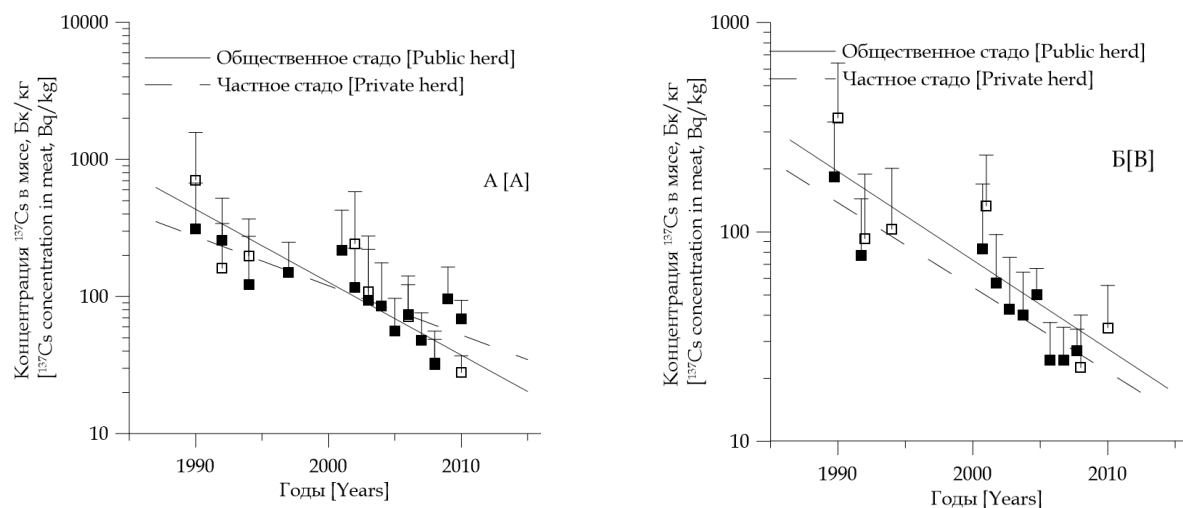
Представленные результаты показывают, что среднее значение отношений концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в говядине к среднему значению концентраций этого радионуклида

в свинине, рассчитанное на основе всех данных, составляет 2,47, геометрическое среднее отношение этих величин равно 1,85, а медиана этого распределения – 1,74. Эти величины хорошо согласуются с приведённой выше оценкой такого отношения, сделанной на основе рационов кормления этих животных (1,5 – 2,2).

Для частного сектора среднее отношение концентраций в говядине к свинине равно 2,15, то есть примерно на 30 % меньше, чем аналогичная величина для коллективного сектора (среднее отношение – 2,78), что отражает различие в содержании и кормления коллективных и частных животных. Для геометрических средних эти различия меньше и составляют 18 %.

При оценке радиологической обстановки в сфере АПК необходимо учитывать определенные различия в уровнях загрязнения мяса животных общественного и частного сектора (рис. 5). Эти различия связаны как с особенностями кормления и содержания этих видов животных, так и с особенностями применения защитных мероприятий, направленных на снижение загрязнения этих видов продукции.

Динамика снижения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в продукции, производимой в частном и общественном секторе загрязненных районов, отличалась. Снижение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в мясе КРС общественного стада происходило быстрее, чем у животных частного сектора, что объясняется особенностями мероприятий, направленных на снижение загрязнения продукции животноводства. Снижение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в свинине частных и общественных животных происходило практически одинаково, а содержание  $^{137}\text{Cs}$  в продукции частного сектора было в 1,5 – 2,0 раза меньше, чем в продукции общественного сектора.



**Рис. 5.** Динамика концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в мясе животных, получаемом в коллективном и частном секторе. А – говядина, Б – свинина. Данные измерений представлены квадратами и среднеквадратичными отклонениями. ВДУ показаны сплошной линией

**[Fig. 5.** Dynamics of concentrations in meat from collective and private sector animals. A - beef, B - pork. Measurement data are presented by squares and standard deviations. TPLs are shown with a solid line]

При оценке данных, представленных на рисунке 5 следует отметить, что данные, полученные в процессе проведения мониторинга в районах Брянской области, подвергшихся загрязнению, в целом согласуются с данными исследований,

выполненных в других регионах [41-43] и могут быть использованы для обоснования возвращения территорий, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности [44].

### Заключение

Анализ данных по закономерностям изменения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе сельскохозяйственных животных показал, что динамика содержания радиоцезия в мышцах сельскохозяйственных животных зависела от особенностей проведения агротехнических и агрохимических реабилитационных мероприятий в районах, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. В 1986 году, после достижения максимальных концентраций, отмечено снижение содержания этого радионуклида в продукции со средними периодами полуснижения для говядины 116 дней ( $R^2=0,71$ ) и для свинины 99 дней ( $R^2=0,77$ ).

Снижение загрязнения мяса сельскохозяйственных животных было неравномерным, но темпы снижения были медленнее снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в молоке. Отмечены различия в динамике снижения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в говядине и свинине. Первые периоды полуснижения с 1987 по 1993 гг. составили 1,64 и 1,54 года для говядины и свинины соответственно, а вторые периоды – от 9,8 до 16,1 года. Динамика снижения загрязнения продукции животных общественного и частного сектора отличалась вследствие особенностей в кормлении и содержании животных и различий в применяемых защитных мероприятиях.

### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Фесенко С.В. – разработка концепции исследования; анализ и интерпретация данных; написание текста статьи и ее редактирование; утверждение окончательного варианта статьи для публикации; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов.

Емлютина Е.С. – обработка и анализ данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Исамов Н.Н. – сбор, анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее расследование и решение вопросов, связанных с точностью любой части работы.

Карпенко Е.И. – анализ и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее исследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

Горяинов В.А. – сбор и интерпретация данных; согласие нести ответственность за все аспекты статьи, обеспечивая надлежащее исследование и решение вопросов, связанных с точностью или целостностью любой части работы.

### Благодарности

Авторы выражают свою признательность рецензентам за ценные замечания, позволившие улучшить представление материалов.

### Информация о конфликте интересов

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

### Сведения об источнике финансирования

Данные исследования выполнены в рамках фундаментальных и прикладных исследований по Программе деятельности федерального государственного бюджетного

учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» на 2023–2027 годы (комплексная тема 5П.7. «Прикладные генетические и биотехнологические исследования для сельского хозяйства»).

### Литература

1. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. Санжаровой Н.И. и Фесенко С.В. М.: РАН, 2018. 278 с. URL: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniiirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniiirae-v-2018-g>. (Дата обращения: 22.01.2023).
2. Герасимова Н.В., Марченко Т.А., Онищенко Г.Г. и др. 20 лет Чернобыльской катастрофы. итоги и проблемы ее преодоления в России. 1986–2006. Российский национальный доклад. М.: ИБРАЭ, 2006. 92 с.
3. Финогенов А.А., Ткачев В.А., Локшин А.М., и др. Российский Национальный Доклад: 35 лет чернобыльской аварии. итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021. М.: ИБРАЭ, 2021. 116 с.
4. Алексахин Р.М., Крышев И.И., Санжарова Н.И. и др. Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии: Монография / под ред. Крышева И.И. ЯО СССР, сер. Радиоэкологические аспекты ядерной энергетики. М., 1991. 190 с.
5. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I. et al. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Radiation Protection Dosimetry. 1995. Vol. 60(2). P. 155–166. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a082712.
6. Balonov M.I., Anspaugh L.R., Bouville A., Likhtarev I.A. 2007 Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident // Radiation Protection Dosimetry. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 491–496. DOI: 10.1093/rpd/ncm301.
7. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiation Protection Dosimetry. 1996. Vol. 64. P. 37–42. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a031563.
8. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V. et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // Health Physics. 2007. Vol. 93, No 5. P. 418–426.
9. Алексахин Р.М., Козьмин Г.В., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. О реабилитации территорий, подвергшихся загрязнению // Вестник РАСХН. 1994. № 2. С. 28–30.
10. Алексахин Р.М., Корнеев Н.А., Гераськин С.А. и др. Итоги исследований по радиобиологии и радиоэкологии во Всероссийском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38, № 2. С. 293–302.
11. Алексахин Р.М., Крышев И.И., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. Радиоэкологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 1990. Т. 68, № 6. С. 320–328.
12. Fesenko S.V., Colgan P.A., Lissianski K.B. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and doses resulting from the consumption of milk and milk products. Radiation Protection Dosimetry. 1997. Vol. 69, No 4. P. 289–299. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006445.
13. Jacob P., Fesenko S., Firsakova S.K. et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity 2001. Vol. 56. P. 51–76. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00047-9.
14. Панов А.В., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. Влияние сельскохозяйственных контрмер на облучение населения территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2006. Т. 46, № 2. С. 273–279. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-4-67-78>.



15. Брук Г.Я., Базюкин А.Б., Братилова А.А., Яковлев В.А. Закономерности формирования и прогноз доз внутреннего облучения населения Российской Федерации и его критических групп в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2(св). С. 66-74. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-66-74.
16. Fesenko S.V, Jacob P., Alexakhin R. et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident // Journal of Environmental Radioactivity 2001. Vol. 56. P. 77–98. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00048-0.
17. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. и др. Оценка факторов, определяющих динамику загрязнения <sup>137</sup>Cs сельскохозяйственной продукции после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 307–315.
18. Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Спиридонов С.И. и др. Закономерности изменения содержания <sup>137</sup>Cs в продукции животноводства на территории Российской Федерации, подвергшейся загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35, № 3. С. 316–326.
19. Исамов Н.Н. (мл.), Сироткин А.Н., Фесенко С.В. и др. Закономерности миграции техногенных загрязнителей в трофической цепи лактирующих коров // Экология. 1998. № 6. С. 441–446.
20. Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. О снижении содержания <sup>137</sup>Cs в продукции растениеводства, подвергшейся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС // Доклады РАСХН. 1995. № 3. С. 20–21.
21. Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N. et al. Dynamics of <sup>137</sup>Cs concentration in fodder in the long term after the Chernobyl accident // Biology Bulletin. 2022. Vol. 49(12) P. 153–162.
22. Методы и средства радиационного контроля / Под ред. А.А. Курганова, В.Н. Мошарова. Министерство сельского хозяйства. М.: 1995. 178 с.
23. Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Karpenko Ye.I. et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants // Nuclear Energy and Technology. 2022. Vol. 8(1). P. 43–48. https://DOI: 10.3897/nucet.8.82619.
24. Fesenko S., Kashparov V., Levchuk S. et al. Monitoring in animal breeding in response to nuclear or radiological emergencies: Chernobyl experience // Journal of Environmental Radioactivity. 2021. Vol. 233. P. 106603. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106603.
25. Фесенко С.В. Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания <sup>137</sup>Cs в сельскохозяйственной продукции Брянской области после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 45–57. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57.
26. Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н. и др. Динамика содержания <sup>137</sup>Cs в кормах сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // Радиационная Гигиена. 2023. Т. 16, № 1. С. 104–119. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119.
27. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания <sup>137</sup>Cs в молоке сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 3. С. 16-28. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28.
28. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // Сельскохозяйственная биология. 1991. № 1. С. 130–137.
29. Thiessen K.M., Sazykina T.G., Apostoei A.I. et al. Model testing using data on <sup>137</sup>Cs from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia // Journal of Environmental Radioactivity. 2005. 84(2). P. 225–244. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.016.
30. Balonov M., Kashparov V., Nikolaenko A. et al. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38. P. 854–867. https://doi.10.1088/1361-6498/aabe34.
31. Фесенко С.В., Исамов Н.Н., Прудников П.В., Емлютина Е.С. Радиоэкологическое обоснование контрольных уровней содержания <sup>137</sup>Cs в кормах сельскохозяйственных животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61, № 6. С. 652–663.
32. Fesenko S.V. A comparative analysis of the consequences of accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi (Japan) NPPs for agriculture and the environment // Atomic Energy. 2024. No 135. P. 195–205 DOI: 10.1007/s10512-024-01101-y.
33. Фесенко С.В. Десять уроков аварийного реагирования после аварии на АЭС «Фукусима-1» // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21. С. 21–27.
34. Фесенко С.В. Уроки крупных радиационных аварий для аварийного реагирования в сельском хозяйстве // Атомная энергия. 2024. Т. 136, вып. 3-4. С. 160-167.
35. International Commission on Radiological Protection. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 2–4.
36. International Commission on Radiological Protection. 2009 Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111 Annals of the ICRP. 2009. No 39.
37. International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna, 2014. DOI: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
38. Fesenko S., Isamov N., Howard B.J. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 3. Transfer to muscle // Journal of Environmental Radioactivity. 2009. No 100. P. 215–231. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.12.003.
39. Fesenko S., Isamov N., Howard B.J. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption // Journal of Environmental Radioactivity. 2007. No. 98. P. 85–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.02.011.
40. Fesenko S., Howard B.J., Isamov N. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk // Journal of Environmental Radioactivity. 2007. Vol. 98. P. 104–136. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.06.007.
41. Tagami K., Hashimoto S., Kusakabe M. et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA MODARIA II programme // Journal of Radiological Protection. 2007. Vol. 42, № 2. P. 020509. DOI: 10.1088/1361-6498/ac670c.
42. Pröhl G., Ehlen S., Fiedler I. et al. Ecological half-lives of <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs in terrestrial and aquatic ecosystems // Journal of Environmental Radioactivity 2006. Vol. 91, No. 1–2. P. 41–72. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.08.004.
43. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout // Health Physics. 1997. Vol. 72. P. 659–673.
44. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Романович И.К. и др. Радиологические аспекты возвращения территорий Российской Федерации, пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, к условиям нормальной жизнедеятельности // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 2. С. 322–335.

Поступила: 14.05.2025

**Фесенко Сергей Викторович** – главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». **Адрес для переписки:** 249032, Россия, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1; E-mail: Corwin\_17F@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1238-3689; SPIN: 9844-0605

**Емлютина Евгения Сергеевна** – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-8660-8679; SPIN: 9231-3364

**Исамов Низаметдин Низаметдинович** – заведующий лабораторией Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-5139-0315; SPIN: 7630-1760

**Карпенко Евгений Игоревич** – заместитель директора Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Обнинск, Россия

ORCID: 0000-0002-9022-7940; SPIN: 6617-8122

**Горяинов Вадим Анатольевич** – заместитель директора Департамента сельского хозяйства Брянской области, Брянск, Россия

SPIN: 3613-8498

**Для цитирования:** Фесенко С.В., Емлютина Е.С., Исамов Н.Н., Карпенко Е.И., Горяинов В.А. Динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в мясе сельскохозяйственных животных в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 87–97. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-87-97

## Dynamics of $^{137}\text{Cs}$ concentrations in meat of farm animals in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident

Sergey V. Fesenko<sup>1</sup>, Evgeniya S. Emlyutina<sup>1</sup>, Nizametdin N. Isamov<sup>1</sup>, Evgeny I. Karpenko<sup>1</sup>, Vadim A. Goryainov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russia

<sup>2</sup> Department of Agriculture of Bryansk region, Bryansk, Russia

*Data on dynamics in  $^{137}\text{Cs}$  concentration in muscles of farm animals obtained by the organizations of the Ministry of Agriculture of Russia in the areas of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident have not been practically generalized so far. The aim of this study was to analyse the data of radioecological monitoring of  $^{137}\text{Cs}$  content in meat of farm animals in the south-western districts of the Bryansk region subjected to intensive contamination after the Chernobyl accident. Materials and Methods: The data on the  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in 27519 samples of farm animal meat collected by the organizations of the Ministry of Agriculture of Russia in the period from 1986 to 2013 were analysed. Determination of  $^{137}\text{Cs}$  in samples was carried out by gamma-spectrometric method. Results and Discussion: The dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  content in animal muscle tissue were largely determined by the specific protective measures implemented in agricultural production. In the initial year following the accident, the average half-life was 116 days for beef and 99 days for pork. Between 1987 and 1992, the effective half-life ranged from 1.5 to 1.6 years. After 1993, the decline in  $^{137}\text{Cs}$  levels in animal muscles slowed significantly, with half-lives extending to 9.8 years for beef and 16.1 years for pork. The rate of contamination decrease differed between meat produced in the public and private sectors, as well as between beef and pork.*

**Key words:** Chernobyl NPP, agro-industrial production, meat of farm animals, south-western districts of the Bryansk region, radiation monitoring,  $^{137}\text{Cs}$ .

### Authors' personal contribution

Sergey V. Fesenko – development of research concepts; analysis and interpretation of data; writing and editing of the paper; approval of the final version of the paper for publication;

agreement to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of any part of the paper.

Evgeniya S. Emlyutina – data processing, analysis, and interpretation; agreement to be responsible for all aspects of the paper,

**Sergey V. Fesenko**

Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”

**Address for correspondence:** Kievskoye shosse, 1, bldg. 1, Obninsk, Kaluga Region, 249035, Russia; E-mail: Corwin\_17F@mail.ru

ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Nizametdin N. Isamov – data collection, analysis, and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the paper, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy of any part of the paper.

Evgeny I. Karpenko – data analysis and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of the work.

Vadim A. Goryainov - data collection and interpretation; agree to be responsible for all aspects of the article, ensuring proper investigation and resolution of issues related to the accuracy or integrity of the work.

### Conflict of interests

Authors declare no conflict of interest in the performance of the work and preparation of this article.

### Acknowledgments

The authors express their gratitude to the reviewers.

### Sources of funding

These studies were carried out within the framework of fundamental and applied research on the Program of activities of The National Research Center "Kurchatov Institute" for 2023–2027 (project 5P.7. "Applied genetic and biotechnological research for agriculture").

### References

- Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas: Monograph Edited by Sanzharova NI and Fesenko SV. Moscow: RAS; 2018. 278 p. Available from: <https://rirae.ru/index.php/deyatelnost/publikatsii-fgbnu-vniirae/444-osnovnye-nauchnye-publikatsii-sotrudnikov-fgbnu-vniirae-v-2018-g>. (Accessed January 22, 2023) (In Russian).
- Gerasimova NV, Marchenko TA, Onishchenko GG, Perminova GS, Chelyukanov V, Agapov AM, et al. 20 years of the Chernobyl catastrophe. results and problems of its overcoming in Russia. 1986–2006. Russian National Report. Moscow: IBRAE; 2006. 92 p. (In Russian).
- Finogenov AA, Tkachev VA, Lokshin AM, Asmolov VG, Verpeta VI, Kuzmin SV, et al. Russian National Report: 35 years of the Chernobyl accident. results and prospects of overcoming its consequences in Russia. 1986–2021. Moscow: IBRAE; 2021. 116 p. (In Russian).
- Alexakhin RM, Kryshev II, Sanzharova NI, Fesenko SV. Radioecological consequences of the Chernobyl accident. Moscow: NS of the USSR; 1991. 190 p. (In Russian).
- Fesenko SV, Alexakhin RM, Sanzharova NI, Spiridonov SI. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Radiation Protection Dosimetry*. 1995;60(2): 155–166. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a082712.
- Balonov MI, Anspaugh LR, Bouville A, Likhtarev IA. Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127: 491–496. DOI: 10.1093/rpd/ncm301.
- Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture. *Radiation Protection Dosimetry*. 1996;64: 37–42. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a031563.
- Alexakhin RM, Sanzharova NI, Fesenko SV, Spiridonov SI, Panov AV. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts. *Health Physics*. 2007;93(5): 418–426. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000285093.63814.b7>.
- Alexakhin RM, Kozmin GV, Sanzharova NI, Fesenko SV. On rehabilitation of territories subjected to contamination. *Vestnik RASKHN = Bulletin RASKHN*. 1994;2: 28–30. (In Russian).
- Alexakhin RM, Korneev NA, Geraskin SA, Sanzharova NI, Fesenko SV, Panov AV, et al. Results of research on radiobiology and radioecology at the All-Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1998;38(2): 293–302. (In Russian).
- Alexakhin RM, Kryshev II, Fesenko SV, Sanzharova NI. Radiocological problems of nuclear power engineering. *Atomnaya energiya. = Atomic Energy*. 1990;68(6): 320–328. (In Russian).
- Fesenko SV, Colgan PA, Lissianski KB, Vazquez C, Guardans R. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and doses resulting from the consumption of milk and milk products. *Radiation Protection Dosimetry*. 1997;69(4): 289–299. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006445.
- Jacob P, Fesenko S, Firsakova SK, Likhtarev IA, Schotola C, Alexakhin RM, et al. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 51–76. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00047-9.
- Panov AV, Fesenko SV, Sanzharova NI, Alexakhin RM, Prudnikov PV, Pasternak AD, et al. Influence of agricultural countermeasures on the population exposure in the territories affected by the Chernobyl NPP accident. *Radiatsiya i risk = Radiation and risk*. 2006;46(2): 273–279. (In Russian).
- Bruk GYa, Bazyukin AB, Bratilova AA, Yakovlev VA. Trends of development and prediction of the doses from the internal exposure of the public of the Russian Federation and its critical groups in the distant post-Chernobyl NPP accident period. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 66–74. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2s-66-74.
- Fesenko SV, Jacob P, Alexakhin R, Sanzharova NI, Panov A, Fesenko G, et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001;56: 77–98. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00048-0.
- Sanzharova NI, Fesenko SV, Alexakhin RM, Abramova TN, Kuznetsov VK. Evaluation of the factors determining the dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  contamination of agricultural products after the Chernobyl NPP accident. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1995;35(3): 307–315. (In Russian).
- Fesenko SV, Alexakhin RM, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Kolmykov MV. Regularities of changes in the  $^{137}\text{Cs}$  content in animal products. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya = Radiation Biology. Radioecology*. 1995;35(3): 316–327. (In Russian).
- Isamov NN, Sirotkin AN, Fesenko SV, Sokolova EA, Sidorova EV. Regularities of migration of anthropogenic pollutants in the trophic chain of lactating cows. *Ekologiya = Ecology*. 1998;6: 441–446. (In Russian).
- Alexakhin RM, Fesenko SV, Sanzharova NI, Spiridonov SI, Vorobyev GT, Yakovleva NA. On the reduction of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in crops contaminated after the Chernobyl accident. *Doklady RASKHN = Reports of RASKHN*. 1995;3: 20–21. (In Russian).
- Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emlyutina ES, Titov IE. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentration in fodder in the long term after the Chernobyl accident. *Biology Bulletin*. 2022;49(12): 153–162.
- Methods and tools for radiation control (collection of materials). Kurganov AA and Mosharov VN. Eds. Moscow: Ministry of Agriculture; 1995. 178 p. (In Russian).
- Fesenko SV, Sanzharova NI, Karpenko Yel, Isamov NN, Kuznetsov VK, Panov AV, et al. Radioecological monitoring and its role in ensuring the safety of nuclear power plants. *Nuclear Energy and Technology*. 2022;8(1): 43–48.
- Fesenko S, Kashparov V, Levchuk S, Khomutinin Yu, Lazarev N, Shubina O, et al. Monitoring in animal breeding in response to nuclear or radiological emergencies: Chernobyl experience. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;233: 106603. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106603.



25. Fesenko SV, Prudnikov PV, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in agricultural products of Bryansk region after the Chernobyl accident: grain, potatoes and vegetables. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 45–57. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-45-57.
26. Fesenko SV, Prudnikov PV, Isamov NN, Emlyutina ES, Epifanova IE, Shubina OA. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in the fodder of farm animals in the districts of Bryansk region affected after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(1): 104–119. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-104-119.
27. Fesenko SV, Isamov NN, Emlyutina ES, Karpenko EI, Goryainov VA. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in cow milk in the districts of Bryansk region. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024; 17(3):16-28. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-3-16-28.
28. Geras'kin SA, Fesenko SV, Chernyaeva LG, Sanzharova NI. Statistical methods of analyzing empirical distributions of radionuclide accumulation coefficients by plants. *Selskhozaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 1991;1: 130–137. (In Russian).
29. Thiessen KM, Sazykina TG, Apostoei AI, Balonov MI, Crawford J, Domel R, et al. Model testing using data on  $^{137}\text{Cs}$  from Chernobyl fallout in the Iput River catchment area of Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005;84(2): 225–244. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.10.016.
30. Balonov M, Kashparov V, Nikolaenko A, Berkovskyy V, Fesenko S. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident. *Journal of Radiological Protection*. 201;38: 854–867. DOI: 10.1088/1361-6498/aabe34.
31. Fesenko SV, Isamov NN, Prudnikov PV, Emlyutina ES. Radioecological substantiation of the control levels of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in the fodder of farm animals. *Radiatsionnaya biologiya Radioekologia = Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(6): 652–663. (In Russian).
32. Fesenko SV. A comparative analysis of the consequences of accidents at Chernobyl and Fukushima Daiichi (Japan) NPPs for agriculture and the environment. *Atomic Energy*. 2024;135: 195–205. DOI: 10.1007/s10512-024-01101-y.
33. Fesenko SV. Ten lessons of emergency response after the Fukushima-1 accident. *Civil Safety Technologies*. 2024;21: 21–27. (In Russian).
34. Fesenko SV. Lessons of Large Radiation Accidents for Emergency Response in Agriculture. *Atomic Energy*. 2024;136(3-4): 160–167. (In Russian).
35. International Commission on Radiological Protection. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007; 37(2–4).
36. International Commission on Radiological Protection. Application of the Commission's recommendations to the protection of people living in long-term contaminated areas after a nuclear accident or a radiation emergency. ICRP Publication 111. *Annals of the ICRP*. 2009; 39.
37. International Atomic Energy Agency, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna; 2014. DOI: 10.61092/iaea.u2pu-60vm.
38. Fesenko S, Isamov N, Howard BJ, Beresford NA, Barnett CL, Sanzharova N, et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 3. Transfer to muscle. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2009;100: 215–231. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2008.12.003.
39. Fesenko S, Isamov N, Howard BJ, Voigt G, Beresford NA, Sanzharova N. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007;98: 85–103. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.02.011.
40. Fesenko S, Howard BJ, Isamov N, Voigt G, Beresford NA, Sanzharova N, et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2007;98: 104–136. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.06.007.
41. Tagami K, Hashimoto S, Kusakabe M, Onda Yu, Howard B, Fesenko S, et al. Pre- and post-accident environmental transfer of radionuclides in Japan: lessons learned in the IAEA MODARIA II programme. *Journal of Radiological Protection*. 2022;42(2): 020509. DOI: 10.1088/1361-6498/ac670c.
42. Pröhl G, Ehken S, Fiedler I, Kirchner G, Klemt E, Zibold G. Ecological half-lives of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;91(1–2): 41–72. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2006.08.004.
43. Muck K. Long-term effective decrease of caesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout. *Health Physics*. 1997;72: 659–673.
44. Sanzharova NI, Fesenko SV, Romanovich IK, Marchenko TA, Razdayvodin AN, Panov AV, et al. Radiological aspects of returning the territories of the Russian Federation, affected by the Chernobyl NPP accident, to the conditions of normal life activity. *Radiatsionnaya biologiya Radioekologia = Radiation Biology. Radioecology*. 2016;56(2): 322–335. (In Russian).

Received: May 14, 2025

**For correspondence: Sergey V. Fesenko** – Chief Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute” (Kievskoye shosse, 1, bldg. 1, Obninsk, Kaluga Region, 249035, Russia; E-mail: Corwin\_17F@mail.ru)

ORCID: 0000-0003-1238-3689; SPIN: 9844-0605

**Evgeniya S. Emlyutina** – Researcher, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-8660-8679; SPIN: 9231-3364

**Nizametdin N. Isamov** – Head of Laboratory, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-5139-0315; SPIN: 7630-1760

**Evgeny I. Karpenko** – Deputy Director, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre “Kurchatov Institute”, Obninsk, Russia

ORCID: 0000-0002-9022-7940; SPIN: 6617-8122

**Vadim A. Goryainov** – Deputy Director of the Department of Agriculture of Bryansk Region, Bryansk, Russia

SPIN: 3613-8498

**For citation: Fesenko S.V., Emlyutina E.S., N.N. Isamov, Karpenko E.I., Goryainov V.A. Dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in meat of farm animals in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 87–97. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-87-97**



## География и структура центров ядерной медицины на территории Российской Федерации по состоянию на 2025 год

Чипига Л.А.<sup>1,2,3</sup>, Козлова К.Н.<sup>4</sup>, Звонова И.А.<sup>1</sup>, Водоватов А.В.<sup>1,5</sup>, Библин А.М.<sup>1</sup>, Станжевский А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

*Развитие ядерной медицины приводит к росту использования открытых радионуклидных источников и связанных с этим процессом транспортирования источников ионизирующего излучения и образования радиоактивных отходов. В этих условиях повышается значимость контроля и учета источников ионизирующего излучения в медицинских организациях. Целью настоящей работы была оценка географии распространения и структуры центров ядерной медицины в России на основании реестра санитарно-эпидемиологических заключений на момент 2025. Материалы и методы: В статье представлен анализ реестра санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии (несоответствии) видов деятельности (работ, услуг) требованиям государственных санитарно-эпидемиологических правил и нормативов на начало 2025 года. Результаты исследования и обсуждение: Всего по результатам проведенного исследования на начало 2025 года в Российской Федерации находятся 188 организаций, осуществляющих медицинскую деятельность с использованием радионуклидов, из которых 152 подразделения проводят однофотонную радионуклидную диагностику (38 находятся в Москве, 20 в Санкт-Петербурге); 81 подразделения позитронной эмиссионной томографии (26 отделений находится в Москве, 8 - в Санкт-Петербурге); 52 подразделения радионуклидной терапии (12 - в Москве и 5 - в Санкт-Петербурге). Все подразделения радионуклидной терапии находятся в организациях, проводящих диагностику с использованием радиофармпрепаратов. Заключение: Требование о наличии специализации, которое необходимо для проведения радионуклидной терапии, не реализовано в большинстве отделений радионуклидной диагностики, что ограничивает возможность развития радионуклидной терапии и проведение ее на базе диагностических подразделений. Текущая практика организации подразделений для проведения радионуклидной терапии на базе подразделений радионуклидной диагностики не позволяет рассматривать вопросы обеспечения радиационной безопасности разделяя требования для диагностики и терапии, поэтому целесообразно предъявлять единые требования для подразделений ядерной медицины.*

**Ключевые слова:** ядерная медицина, радионуклидная терапия, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, позитронная эмиссионная томография, санитарно-эпидемиологическое заключение.

### Введение

В настоящее время ядерная медицина, включающая радионуклидную диагностику (РНД) и терапию, является одной из наиболее активно развивающихся областей лучевой диагностики в мире, без которой невозможно представить систему здравоохранения никакой развитой страны мира [1, 2].

Современная медицина использует различные источники

ионизирующего излучения для диагностических и лечебных целей, что является серьезным фактором радиационного воздействия на человека. Радионуклидные методы диагностики можно разделить на два основных класса: позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и однофотонная РНД. Для ПЭТ-диагностики широко применяются ультракороткоживущие позитрон-излучающие радионуклиды (такие как  $^{18}\text{F}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{11}\text{C}$ ); для однофотонной РНД – гамма-эмиттеры ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ) [3-5].

<sup>1</sup> Однофотонная РНД включает планарные сцинтиграфические исследования (динамические и статические) на гамма-камерах и исследования, выполняемые методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) [Single photon diagnostic nuclear medicine includes planar scintigraphic examinations (dynamic and static) on gamma cameras and examinations performed by single photon emission computed tomography (SPECT)].

**Чипига Лариса Александровна**

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: larisa.chipiga@gmail.com

По данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН), за 2020-2021 гг. на долю ядерной медицины приходится около 1 % всех процедур лучевой диагностики, а ее вклад в общую эффективную дозу вырос с 5 % до 7 % за последнее десятилетие. Число процедур радионуклидной терапии увеличилось на 60 % по сравнению с показателем из предыдущего доклада НКДАР ООН [6].

В странах с развитой системой здравоохранения происходит постоянное развитие ядерной медицины, появляются новые радиофармацевтические лекарственные препараты (РФЛП), используются новые технологии, что приводит к увеличению коллективной дозы населения [7–11, 15].

В Российской Федерации реорганизация отделений РНД и обновление аппаратного парка происходит в рамках реализации программы «Развитие ядерной медицины в Российской Федерации», а также за счет увеличения тарифов обязательного медицинского страхования и включения в систему обязательного медицинского страхования наиболее современных методов диагностики, что стимулирует развитие как государственных, так и частных медицинских организаций [12]. По данным формы федерального статистического наблюдения № 30 «Сведения о медицинской организации»<sup>2</sup> и формы федерального статистического наблюдения № 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований»<sup>3</sup> число процедур РНД, проводимых в Российской Федерации, за последние несколько лет (с 2021 года) выросло с 550 до 800 тыс. за год. Отмечается рост числа томографических гибридных исследований, совмещенных с компьютерной томографией (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ), которые являются наиболее высокоточными исследованиями. Средняя доза за РНД-исследование выросла с 2,5 мЗв в 2015 году до 7,8 мЗв в 2023 году. Все это приводит к росту коллективной дозы от РНД в России, которая выросла в 7 раз с 2015 года. Также отмечается рост числа процедур радионуклидной терапии с новыми радионуклидами.

Развитие ядерной медицины, внедрение новых технологий и радионуклидов, которыми метят РФЛП, приводит к росту использования открытых радионуклидных источников и связанных с этим процессом транспортирования источников ионизирующего излучения и образования радиоактивных отходов. В этих условиях повышается значимость контроля и учета источников в государственных и частных медицинских организациях. Формы статистической отчетности не содержат всей необходимой информации, а также ограничены ведомственным подчинением медицинских организаций и не позволяют полноценно оценить используемые методы ядерной медицины и применяемые радионуклиды, а также географию их распространения. Источником такой информации может служить реестр санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии (несоответствии) видов деятельности (работ, услуг) требованиям государственных санитарно-эпидемиологических правил и нормативов (СЭЗ) [13].

**Цель исследования** - оценка географии распространения и структуры центров ядерной медицины в стране на основании реестра СЭЗ по состоянию на 2025 год.

## Материалы и методы

В ходе работы был произведен анализ реестра санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии (несоответствии) видов деятельности (работ, услуг) требованиям государственных санитарно-эпидемиологических правил и нормативов для получения актуальной и наиболее полной информации об организациях, осуществляющих радионуклидную диагностику и терапию на территории Российской Федерации [13].

Для этого в реестре была проведена многоступенчатая сортировка, состоящая из нескольких этапов. На первом этапе был произведен поиск СЭЗ по ключевым радионуклидам, используемым в радионуклидной диагностике и терапии: <sup>99m</sup>Tc, <sup>123</sup>I, <sup>68</sup>Ga, <sup>131</sup>I, <sup>223</sup>Ra, <sup>177</sup>Lu, <sup>89</sup>Sr, <sup>153</sup>Sm, <sup>225</sup>Ac. Причем для более точного поиска все радионуклиды прописывались в поисковой строке различными вариантами, латиницей и кириллицей, с прописной и строчной буквой, полным названием и сокращением, так как для СЭЗ отсутствуют строгие требования к сокращениям и названиям, соответственно наименования радионуклидов могут быть написаны по-разному. Например, для <sup>99m</sup>Tc поиск происходил с использованием следующих вариантов: «Tc-99m», «99m», «технеций-99», «Технеций-99», «технеций». Таким образом была сформирована база организаций, имеющих СЭЗ на работу с медицинскими радионуклидами. На этом же этапе каждая организация проверялась на наличие второго СЭЗ по ИНН, так как некоторые организации могли получать СЭЗ на разные адреса, если имеют несколько филиалов. На втором этапе был проведен отбор медицинских организаций, так как некоторые организации не используют радионуклидные источники в медицинских целях, а осуществляют их хранение или транспортировку. Они были исключены из базы и в анализе не учитывались.

На втором этапе каждая медицинская организация была проверена на наличие нескольких СЭЗ. Проверка проводилась по ключевым словам: «радионуклидная диагностика», «радионуклидная терапия», «ПЭТ» и «ОФЭКТ». При этом все организации также проверялись на наличие второго СЭЗ по идентификационному номеру налогоплательщика (ИНН). На заключительном этапе был проведен отбор по государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормам, а также методическим указаниям, на соответствие которым были выданы СЭЗ. Для отбора использовались наименования документов, регулирующих требования в ядерной медицине: СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии»<sup>4</sup>, СанПиН 2.6.1.2368-08 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при

<sup>2</sup> Форма № 30 «Сведения о лечебно-профилактическом учреждении», утвержденная Постановлением Госкомстата России от 25.12.2023 № 681 [Form No. 30 "Data on the medical facilities", approved by the Order of Goskomstat, 25.12.2023 No. 681. (In Russ.)].

<sup>3</sup> Форма статистического наблюдения 3-ДОЗ «Сведения о дозах облучения пациентов при проведении медицинских диагностических рентгенорадиологических исследований в РФ», утвержденная Приказом Росстата от 16.10.2013 № 411 [Statistical form 3-DOZ "Data on patient doses from X-ray examinations in the Russian Federation", approved by Order of Rosstat 16.10.2013 No. 411. (In Russ.)].

<sup>4</sup> СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.3288-15 "Hygienic requirements for radiation safety during preparation and conduction of positron emission tomography" (In Russ.)].

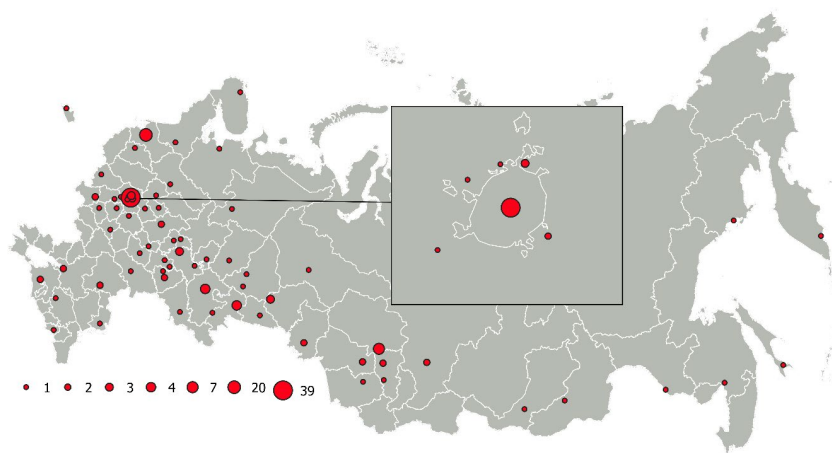
проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников»<sup>5</sup>, МУ 2.6.1.1892-04 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов»<sup>6</sup>.

Сформированная база содержала наименование медицинской организации, адрес, ИНН, номер заключения, применяемые радионуклиды, годовые и максимальные активности на рабочем месте (при наличии), информацию о наличии спецанализации/зумпфовой, информацию о наличии генерирующего источника, применяемого при гибридных методах диагностики (ПЭТ/КТ или ОФЭКТ/КТ) и вид деятельности (терапия, ПЭТ или однофотонная РНД).

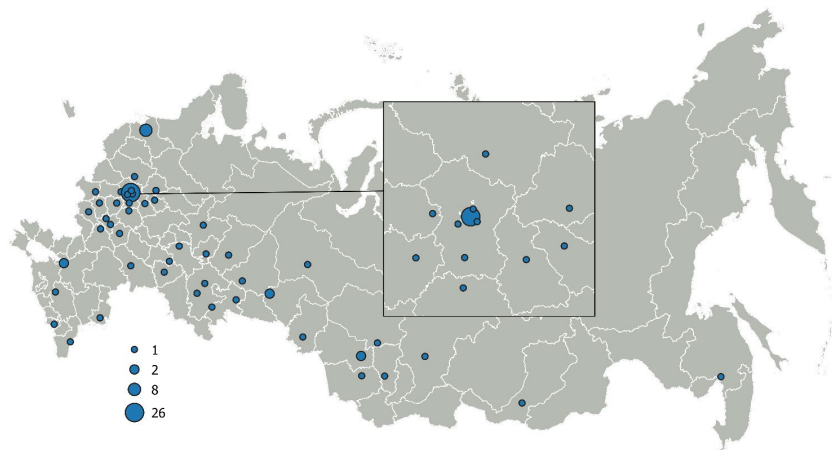
Обработка данных была выполнена с использованием программного обеспечения MS Excel.

## Результаты и обсуждение

По результатам проведенного анализа реестра СЭЗ в Российской Федерации процедуры ядерной медицины проводятся в 188 организациях. Большинство центров ядерной медицины располагается в крупных городах. Распределение подразделений радионуклидной диагностики представлено в графическом виде на рисунках 1 и 2. Большинство организаций располагается в Москве (38 подразделений однофотонной РНД и 26 подразделений ПЭТ-диагностики) и в Санкт-Петербурге (20 подразделений однофотонной РНД и 8 подразделений ПЭТ-диагностики). В остальных регионах подразделений РНД значительно меньше, причем подразделений однофотонной РНД больше, чем ПЭТ. Всего в стране находится 152 подразделения однофотонной РНД и 81 – ПЭТ. Основные радионуклиды, используемые в диагностических целях, –  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{199}\text{Tl}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{123}\text{I}$  для однофотонной РНД, и  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{124}\text{I}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{68}\text{Ga}$ ,  $^{82}\text{Rb}$ ,  $^{64}\text{Cu}$  для ПЭТ.



**Рис. 1.** Карта распределения подразделений однофотонной РНД на территории Российской Федерации в 2025 году  
[Fig. 1. Location of single photon diagnostic nuclear medicine departments in the Russian Federation]



**Рис. 2.** Карта распределения подразделений позитронной эмиссионной томографии на территории Российской Федерации в 2025 году  
[Fig. 2. Location of positron emission tomography departments in the Russian Federation]

<sup>5</sup>СанПин 2.6.1.2368-08 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2368-08 "Hygienic requirements for radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources" (In Russ.)].

<sup>6</sup>МУ 2.6.1.1892-04. «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов» [Methodical guidelines 2.6.1.1892-04 "Hygienic requirements for radiation safety during radionuclide diagnostics using radiopharmaceuticals" (In Russ.)].

В связи с тем, что диагностическое оборудование, применяемое в РНД, не содержит источники ионизирующего излучения, эта информация не указывается в СЭЗ. Исключением являются только гибридные ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ аппараты, совмещенные с рентгеновским КТ. Анализ этой информации показал, что 81 медицинская организация проводит ПЭТ-диагностику. Это расходится с данными формы № 30 «Сведения о медицинской организации»<sup>7</sup> за 2023 год, согласно которой число ПЭТ и ПЭТ/КТ аппаратов в стране составляет 34 единицы. Такое расхождение можно объяснить тем, что в России функционирует большое число частных центров ПЭТ-диагностики, сведения о которых не охватывает форма № 30. Иная ситуация обстоит с количеством ОФЭКТ/КТ-аппаратов: по данным формы №30 за 2023 год в стране насчитывалось 113 аппаратов, расположенных в 94 отделениях РНД. Однако в результате анализа реестра СЭЗ было найдено только 76 медицинские организации, оборудованные ОФЭКТ/КТ. Расхождения можно объяснить тем, что данные сравнивались за разные годы – форма № 30 за 2023 год, а реестр СЭЗ обновляется регулярно, поэтому информация, полученная на основании анализа реестра, актуальна на 2025 года. За это время часть аппаратов могла быть выведена из эксплуатации или заменена, а часть подразделений традиционной однофотонной диагностики подввергнута реорганизации под новую диагностическую технику (ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ-аппараты) [15].

По результатам данного исследования всего в стране насчитывается 52 медицинские организации, проводящие радионуклидную терапию (рис. 3). Наибольшее число организаций (двенадцать) располагается в Москве, которые разрабатывают и используют для терапии пациентов РФЛП, меченные следующими радионуклидами:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{211}\text{At}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ . Пять подразделений, проводящих радионуклидную терапию, находится в Санкт-Петербурге, которые используют в своей работе следующие радионуклиды:  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{225}\text{Ra}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{82}\text{Sr}$ ,  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{211}\text{At}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{213}\text{Bi}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{227}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{229}\text{Th}$ ,  $^{161}\text{Th}$ ,  $^{152}\text{Th}$ . В остальных регионах, где проводится радионуклидная терапия (Алтайский край, Амурская область, Архангельск, Воронежская область, Забайкальский край, Калужская область, Кемеровская область, Краснодар, Красноярский край, Магадан, Московская область, Новосибирская область, Омск, Республика Бурятия, Республика Коми, Республика Татарстан, Ростовская область, Самарская область, Свердловская область, Свердловская область, Ставропольский край, Томская область, Тюменская область, Удмуртская Республика, Ульяновская область, Хабаровский край и Челябинская область) располагается по 1–2 подразделения, которые используют для лечения пациентов РФЛП, меченные следующими радионуклидами:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{213}\text{Bi}$ ,  $^{90}\text{Y}$ .

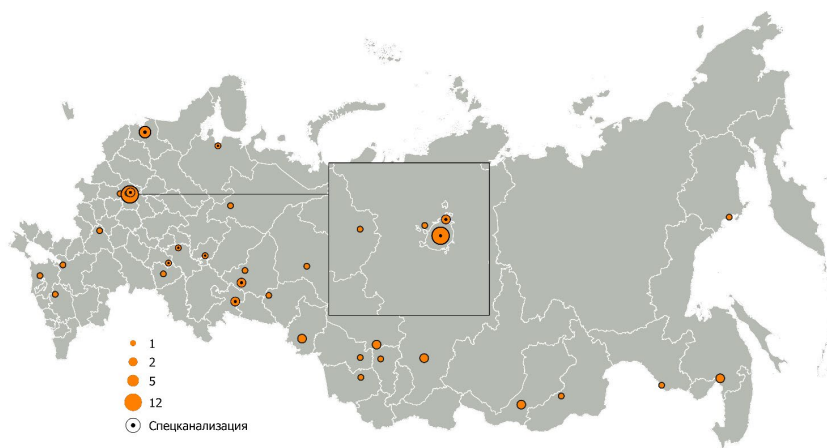


Рис. 3. Карта распределения подразделений радионуклидной терапии на территории Российской Федерации в 2025 году

[Fig. 3. Location of radiopharmaceutical therapy departments in the Russian Federation]

Исходя из полученных результатов видно, что медицинские организации, осуществляющие радионуклидную терапию, также имеют подразделение РНД, или проводят терапию пациентов на базе этих подразделений. В таблице представлены более детальные сведения о структуре отделений ядерной медицины на территории Российской Федерации. Стоит отметить, что не все организации, имеющие СЭЗ на работу с терапевтическими радионуклидами, имеют систему спецканализации для сбора и выдержки отходов пациентов с

радионуклидами на распад. Всего в СЭЗ, выданных организациям, проводящим процедуры ядерной медицины, наличие спецканализаций, зумпфовых или иных специальных выдержек указано в 15 случаях. В основном это организации, которые проводят радионуклидную терапию. Исключение составляет один центр в Московской области (Коломна), проводящий ПЭТ/КТ-исследования с использованием РФЛП, меченных  $^{18}\text{F}$ , и имеющий спецканализацию, и при этом не осуществляющий радионуклидную терапию [13].

<sup>7</sup> Форма № 30 «Сведения о лечебно-профилактическом учреждении», утвержденная Постановлением Госкомстата России от 25.12.2023 № 681. [Form No. 30 "Data on the medical facilities", approved by the Order of Goskomstat, 25.12.2023 No. 681. (In Russ.).]



Число отделений ядерной медицины в регионах Российской Федерации по данным реестра санитарно-эпидемиологических заключений

Таблица

Number of nuclear medicine departments in the regions of the Russian Federation according to the registry of sanitary and epidemiological conclusions

[Table]

| Процедуры ядерной медицины<br>[Nuclear medicine procedures]                                                                                                                                                          | Регион [Region]                              | Число отделений<br>[Number of departments] | Число спецканализаций/<br>зумпфовых<br>[Number of dedicated<br>sewage systems] |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Радионуклидная терапия и<br>однофотонная радионуклид-<br>ная диагностика<br>[Radiopharmaceutical therapy<br>and single photon radionuclide<br>diagnostic]                                                            | Алтайский край [Altai region]                | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Амурская область [Amur region]               | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Архангельск [Arkhangelsk]                    | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Забайкальский край [Zabaikalsky Krai]        | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Кемеровская область [Kemerovo region]        | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Краснодар [Krasnodar]                        | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Красноярский край [Krasnoyarsk region]       | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Магадан [Magadan]                            | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Москва [Moscow]                              | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Московская область [Moscow region]           | 2                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Новосибирск [Novosibirsk]                    | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Омск [Omsk]                                  | 2                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Республика Бурятия [Republic of Buryatia]    | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Республика Коми [Republic of Komi]           | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Ростовская область [Rostov region]           | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Самарская область [Samara region]            | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Санкт-Петербург [St. Petersburg]             | 2                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Свердловская область [Sverdlovsk region]     | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Ставропольский край [Stavropol region]       | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Томская область [Tomsk region]               | 2                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Челябинская область [Chelyabinsk region]     | 1                                          | 0                                                                              |
| Радионуклидная терапия<br>и позитронная эмиссионная<br>томография<br>[Radiopharmaceutical therapy<br>and positron emission<br>tomography]                                                                            | Воронежская область [Voronezh region]        | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Республика Бурятия [Republic of Buryatia]    | 1                                          | 0                                                                              |
| Терапия, позитронная эмис-<br>сионная томография и одно-<br>фотонная радионуклидная<br>диагностика<br>[Radiopharmaceutical therapy,<br>positron emission tomography<br>and single photon radionuclide<br>diagnostic] | Калужская область [Kaluga region]            | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Красноярский край [Krasnoyarsk region]       | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Москва [Moscow]                              | 11                                         | 4                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Московская область [Moscow region]           | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Республика Татарстан [Republic of Tatarstan] | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Санкт-Петербург [St. Petersburg]             | 3                                          | 2                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Свердловская область [Sverdlovsk region]     | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Тюменская область [Tyumen region]            | 2                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Удмуртская Республика [Udmurt Republic]      | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Ульяновская область [Ulyanovsk region]       | 1                                          | 1                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Хабаровский край [Khabarovsk Krai]           | 1                                          | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                      | Челябинская область [Chelyabinsk region]     | 1                                          | 1                                                                              |

| Процедуры ядерной<br>медицины<br>[Nuclear medicine procedures]                               | Регион [Region]                                        | Число отделений<br>[Number of depart-<br>ments] | Число спецанализаций/<br>зумпфовых<br>[Number of dedicated<br>sewage systems] |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Позитронная эмиссионная<br>томография<br>[Positron emission tomography]                      | Алтайский край [Altai region]                          | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Астрахань [Astrakhan]                                  | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Брянская область [Bryansk region]                      | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Владимир [Vladimir]                                    | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Ивановская область [Ivanovo region]                    | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Кемеровская область [Kemerovo region]                  | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Киров [Kirov]                                          | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Курская область [Kursk region]                         | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Липецкая область [Lipetsk region]                      | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Махачкала [Makhachkala]                                | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Москва [Moscow]                                        | 3                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Московская область [Moscow region]                     | 1                                               | 1                                                                             |
|                                                                                              | Новосибирск [Novosibirsk]                              | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Омск [Omsk]                                            | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Орловская область [Oryol region]                       | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Пермь [Perm]                                           | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Республика Башкортостан<br>[Republic of Bashkortostan] | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Ростовская область [Rostov region]                     | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Рязанская область [Ryazan region]                      | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Самарская область [Samara region]                      | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Санкт-Петербург [St. Petersburg]                       | 4                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Ставропольский край [Stavropol region]                 | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Тамбовская область [Tambov region]                     | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Тверская область [Tver region]                         | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Томская область [Tomsk region]                         | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Ярославская область [Yaroslavl region]                 | 1                                               | 0                                                                             |
| Однофотонная радионуклид-<br>ная диагностика<br>[Single photon radionuclide di-<br>agnostic] | Астрахань [Astrakhan]                                  | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Брянская область [Bryansk region]                      | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Владимир [Vladimir]                                    | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Волгоград [Volgograd]                                  | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Вологда [Vologda]                                      | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Калининградская область [Kaliningrad region]           | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Калуга [Kaluga]                                        | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Камчатский край [Kamchatka Region]                     | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Кемеровская область [Kemerovo region]                  | 2                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Краснодар [Krasnodar]                                  | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Курганская область [Kurgan region]                     | 1                                               | 0                                                                             |
|                                                                                              | Москва [Moscow]                                        | 14                                              | 0                                                                             |
|                                                                                              | Московская область [Moscow region]                     | 3                                               | 0                                                                             |

| Процедуры ядерной<br>медицины<br>[Nuclear medicine procedures]                                                                                                           | Регион [Region]                                          | Число отделений<br>[Number of depart-<br>ments] | Число спецканализаций/<br>зумпфовых<br>[Number of dedicated<br>sewage systems] |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Однофотонная радионуклид-<br>ная диагностика<br>[Single photon radionuclide di-<br>agnostic]                                                                             | Мурманская область [Murmansk region]                     | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Нижний Новгород [Nizhniy Novgorod]                       | 2                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Новгородская область [Novgorod region]                   | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Новосибирск [Novosibirsk]                                | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Оренбургская область [Orenburg region]                   | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Орловская область [Oryol region]                         | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Пензенская область [Penza region]                        | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Пермь [Perm]                                             | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Республика Башкортостан [Republic of Bash-<br>kortostan] | 4                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Республика Карелия [Republic of Karelia]                 | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Республика Марий Эл [Republic of Mari El]                | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Республика Мордовия [Republic of Mordovia]               | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Республика Татарстан [The Republic of Ta-<br>tarstan]    | 3                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Ростовская область [Rostov region]                       | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Рязанская область [Ryazan region]                        | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Самарская область [Samara region]                        | 2                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Санкт-Петербург [St. Petersburg]                         | 14                                              | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Смоленская область [Smolensk region]                     | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Томская область [Tomsk region]                           | 5                                               | 0                                                                              |
| Однофотонная радионуклид-<br>ная диагностика<br>[Single photon radionuclide di-<br>agnostic]                                                                             | Тюменская область [Tyumen region]                        | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Ульяновск [Ulyanovsk]                                    | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Челябинская область [Chelyabinsk region]                 | 2                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Чувашская Республика [Chuvash Republic]                  | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Южно-Сахалинск [Yuzhno-Sakhalinsk]                       | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Ярославская область [Yaroslavl region]                   | 1                                               | 0                                                                              |
| Позитронная эмиссионная то-<br>мография и однофотонная ра-<br>дионуклидная диагностика<br>[Positron emission tomography<br>and single photon radionuclide<br>diagnostic] | Владикавказ [Vladikavkaz]                                | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Липецкая область [Lipetsk region]                        | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Москва [Moscow]                                          | 12                                              | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Московская область [Moscow region]                       | 2                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Санкт-Петербург [St. Petersburg]                         | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Саратовская область [Saratov region]                     | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Тульская область [Tula region]                           | 1                                               | 0                                                                              |
|                                                                                                                                                                          | Хабаровский край [Khabarovsk Krai]                       | 1                                               | 0                                                                              |

Внедрение в клиническую практику новых РФЛП и методов радионуклидной терапии с возможностью проведения процедур в условиях дневного стационара, например, на базе функционирующих подразделений радионуклидной диагностики привело к распространению случаев организации подразделений радионуклидной терапии на базе диагностических подразделений [14]. Согласно действующим требованиям, предъявляемым к проведению радионуклидной терапии (СанПиН 2.6.1.2368-08), наличие спецканализации обязательно. Отсутствие спецканализации в медицинских организациях, проводящих РНД, не позволяет в настоящее время проводить процедуры радионуклидной терапии. С введением новых требований в области радиационной безопасности<sup>8</sup> с 1 сентября 2025 года, в таких подразделениях возможно будет проводить процедуры радионуклидной терапии только с остеоотропными РФЛП, мечеными <sup>89</sup>Sr и <sup>223</sup>Ra.

Для реализации сложившейся практики проектные решения должны позволять расширять спектр технологий ядерной медицины. На этапе проектирования подразделений целесообразно рассматривать три основных фактора:

- используемые радионуклиды и их активности для расчета радиационной защиты;
- маршрутизация пациентов с целью разделения потоков радионуклидных источников в подразделении ядерной медицины и предотвращения возникновения радиационных аварий [16];
- система обращения с радиоактивными отходами, включая биологические отходы пациентов.

При подготовке требований к подразделениям ядерной медицины специалисты ФБУН НИИРГ начали решать указанные проблемы путем дифференцировки требований о наличии спецканализации, основанном на спектре радионуклидов, их активности и характеристиках выведения РФЛП из организма пациентов. Конкретизировано понятие спецканализации, сокращены требования к площади помещений, предусмотрена возможность использования альтернативных систем для сбора и выдержки отходов пациентов на распад (биотуалеты, системы фильтрации на основе ионообменных смол, и пр.).

### Заключение

В результате анализа реестра СЭЗ была получена информация о географии распространения центров ядерной медицины на территории Российской Федерации и о структуре подразделений, осуществляющих радионуклидную диагностику и терапию. Всего по результатам проведенного исследования на начало 2025 года в Российской Федерации находятся 188 организаций, осуществляющих медицинскую деятельность с использованием радионуклидов, большинство из которых располагается в Москве и Санкт-Петербурге. Больше всего организаций, проводящих однофотонную РНД (152 подразделения) с использованием РФЛП, меченными <sup>99m</sup>Tc и другими гамма-излучающими радионуклидами; 81 медицинская организация проводит ПЭТ-диагностику с использованием РФЛП, меченными <sup>18</sup>F и другими позитрон-излучающими радионуклидами. Медицинские организации, осуществляющие радионуклидную терапию

(52 организации), также имеют подразделение РНД или проводят терапию пациентов на базе этих подразделений.

Текущая практика организации подразделений для проведения радионуклидной терапии на базе подразделений РНД не позволяет рассматривать вопросы обеспечения радиационной безопасности, разделяя требования для диагностики и терапии. Стоит предъявлять единые требования обеспечения радиационной безопасности для подразделений ядерной медицины.

Развитие технологий ядерной медицины и ее доступность не должны приводить к снижению достигнутого уровня радиационной безопасности населения Российской Федерации.

### Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Чипига Л.А. – научное руководство исследованием, определение цели, разработка дизайна исследования, формулировка научных гипотез, поиск литературы, проведение расчетов, анализ полученных результатов, написание текста.

Козлова К.Н. – анализ литературы, проведение расчетов, описание результатов.

Звонова И.А. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение результатов исследования.

Водоватов А.В. – анализ литературы, проверка расчетов, редактирование статьи.

Библин А.М. – анализ литературы, проведение расчетов, описание результатов.

Станжевский А.А. – анализ литературы, проведение расчетов, описание результатов.

### 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. Наркевич Б.Я. Физико-техническое обеспечение ядерной медицины: современное состояние и перспективы развития // Радиационная онкология и ядерная медицина. 2012. № 1. С. 51-75.
2. National Council on Radiation Protection and Measurements. Medical radiation exposure of patients in the United States // NCRP Report, 2019. No. 184.
3. Сомов Д.В., Волознев Л.В., Береговых В.В. и др. Особенности стандартизации радиофармацевтических препаратов // Фармация. 2012. № 3. С. 49-52.
4. Климанов В.А. Физика ядерной медицины. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. Ч. 1. 308 с.
5. Беляев В.Н., Климанов В.А. Физика ядерной медицины. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. Ч. 2. 248 с.
6. Evaluation of medical exposure to ionizing radiation // UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I. Annex A.
7. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции

<sup>8</sup>СанПиН 2.6.4.115-25 «Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения» [Sanitary Regulations and Standards 2.6.4115-25 "Sanitary and epidemiological requirements in the field of radiation safety of the population in the treatment of ionizing radiation sources" (In Russ.)].



- развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24.
8. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 6-24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
  9. Martin A., Eckerman K., Pawel D. et al. Improved Age- and Gender-Specific Radiation Risk Models Applied on Cohorts of Swedish Patients // Radiation Protection Dosimetry. 2021. Vol. 195, No 3-4. P. 334-338. DOI: 10.1093/rpd/ncab075.
  10. Balonov M., Golikov V., Zvonova I. et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015 // Journal of Radiological Protection. 2018. Vol. 38, No 1. P. 121-139. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9b99.
  11. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Водоватов А.В. и др. Научные основы радиационной защиты в современной медицине. Том 1. Лучевая диагностика. Под ред. профессора М.И. Балонova. СПб.: НИИРГ имени проф. П.В. Рамзаева, 2019. Т. 1. 320 с.
  12. 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.
  13. Реестр санитарно-эпидемиологических заключений о соответствии (несоответствии) видов деятельности (работ, услуг) требованиям государственных санитарно-эпидемиологических правил и нормативов. URL: <http://fp.crc.ru/service/?type=max>. (Дата обращения: 21.03.2025).
  14. 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
  15. Костылев В.А., Рыжикова О.А., Сергиенко В.Б. Статус и перспектива развития методов позитронно-эмиссионной томографии в России // Медицинская физика. 2015. № 2. С. 5-16.
  16. Водоватов А.В., Чипига Л.А., Рыжов С.А. и др. Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 1. С. 97-110. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.

Поступила: 26.05.2025

**Чипига Лариса Александровна** – кандидат технических наук, старший 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. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: [larisa.chipiga@gmail.com](mailto:larisa.chipiga@gmail.com)  
ORCID: 0000-0001-9153-3061

**Козлова Камилла Николаевна** – студентка Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0009-0005-6166-6265

**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, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0002-5191-7535

**Библин Артем Михайлович** – руководитель Информационно-аналитического центра, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия  
ORCID: 0000-0002-3139-2479

**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:** Чипига Л.А., Козлова К.Н., Звонова И.А., Водоватов А.В., Библин А.М., Станжевский А.А. География и структура центров ядерной медицины на территории Российской Федерации по состоянию на 2025 год // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 1. С. 98–108. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-98-108

## The geography and structure of nuclear medicine centres in the Russian Federation in 2025

Larisa A. Chipiga<sup>1,2,3</sup>, Kamilla N. Kozlova<sup>4</sup>, Irina A. Zvonova<sup>1</sup>, Aleksandr V. Vodovатов<sup>1,5</sup>, Artem M. Biblin<sup>1</sup>, Andrey A. Stanzhevsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

<sup>4</sup> Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

*The development of nuclear medicine has led to an increase in the use of open radionuclide sources and the associated processes of transporting ionising radiation sources and generating radioactive waste. This situation leads to focus on monitoring and accounting of ionising radiation sources in hospitals. The aim of the study was assessment of geographical distribution and structure of nuclear medicine centres in the Russian Federation. Material and Methods: The register of sanitary and epidemiological conclusions on the compliance (non-compliance) of activities (works, services) with the requirements of state sanitary and epidemiological rules and regulations were analyzed at the beginning of 2025. Results: 188 hospitals operated with radionuclide, are located in the Russian Federation in 2025, including 152 single photon diagnostic nuclear medicine departments (38 in Moscow and 20 in St. Petersburg); 81 positron emission tomography departments (26 in Moscow and 8 in St. Petersburg); 52 radiopharmaceutical therapy departments (12 departments in Moscow and 5 in St. Petersburg). According to the results of the study, all radiopharmaceutical therapy departments are based in diagnostic nuclear medicine centers. Conclusion: The current practice of organizing radiopharmaceutical therapy units based on diagnostic nuclear medicine units does not allow to consider the radiation safety issues separately for diagnostics and therapy. It is reasonable to have uniform requirements for nuclear medicine units.*

**Key words:** nuclear medicine, radiopharmaceutical therapy, diagnostic nuclear medicine, positron emission tomography, registry of sanitary and epidemiological conclusions.

### Authors' personal contribution

Chipiga L.A. – scientific management of the study, determination of the aim of the study, development of the study design, formulation of the scientific conjectures, calculations, analysis of the results, writing the text of the article.

Kozlova K.N. – search of literature, calculations, descriptions of the results.

Zvonova I.A. – analysis and interpretation of the results, discussion of the results.

Vodovатов A.V. – analysis of literature, calculations verification, editing the draft of the article.

Biblin A.M. – search of literature, calculations, descriptions of the results.

Stanzhevsky A.A. – search of literature, calculations, descriptions of the results.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

### Sources of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing "Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine".

### References

1. Narkevich BYa. Current Status and Prospect Development of Nuclear Medicine Techniques. *Radiatsionnaya onkologiya i yadernaya meditsina = Radiation oncology and nuclear medicine*. 2012;1: 51-75. (In Russian).
2. National Council on Radiation Protection and Measurements. Medical radiation exposure of patients in the United States. NCRP Report 184; 2019.
3. Somov DV, Voloznev LV, Beregovykh VV, Rudakova IP, Samylin IA. The specific features of the standardization of radiopharmaceuticals. *Pharmacy*. 2012;3: 49-52. (In Russian).
4. Klimanov VA. Physics of nuclear medicine. NRNU MEPhI; 2012. Part 1. 308 p. (In Russian).
5. Belyaev VN, Klimanov VA. Physics of nuclear medicine. NRNU MEPhI; 2012. Part 2. 248 p. (In Russian).
6. UNSCEAR. Evaluation of medical exposure to ionizing radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report Volume I. Annex A; 2021.
7. Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovатов AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 1: Trends, structure of X-ray diagnostics and doses from medical exposure. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2019;12(1): 6-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24.
8. Onischenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovатов AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Modern principles of the radiation protection from sources of ionizing radiation in medicine. Part 2: radiation risks and development of the system of radiation protection. *Radiatsionnaya Gygiyena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 6-24. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
9. Martin A, Eckerman K, Pawel D, Almén A, Mattsson S. Improved Age- and gender-specific radiation risk models applied on cohorts of Swedish patients. *Radiation Protection Dosimetry*. 2021;195(3-4): 334-338. DOI: 10.1093/rpd/ncab075.
10. Balonov M, Golikov V, Zvonova I, Chipiga L, Kalnitsky S, Sarycheva S, et al. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015. *Journal of Radiological Protection*. 2018;38(1): 121-139. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9b99.

**Larisa A. Chipiga**

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

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

11. Balonov MI, Golikov VYu, Vodovatov AV, Chipiga LA, Zvonova IA, Kalnitsky SA, et al. Scientific foundations of radiation protection in modern medicine. Volume 1. X-ray diagnostics. By edit. professor MI Balonov. Saint-Petersburg: NIIRG named after prof. PV Ramzaev; 2019. Vol. 1. 320 p. (In Russian).
12. Chipiga LA, Ladanova ER, Vodovatov AV, Zvonova IA, Mosunov AA, Naurzbaeva LT, et al. Trends in the development of radionuclide diagnostics in the Russian Federation for 2015–2020. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 122–133. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-122-133.
13. Register of sanitary and epidemiological conclusions on the compliance (non-compliance) of types of activities (works, services) with the requirements of state sanitary and epidemiological rules and regulations. Available from: <http://fp.crc.ru/service/?type=max>. (Accessed 21 March 2025).
14. Chipiga LA, Vodovatov AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Petryakova AV, Anokhina EE, et al. Management of biological waste of patients after radionuclide therapy. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 19–30. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
15. Kostylev VA, Ryzhikova OA, Sergienko VB. Status and prospects for the development of positron emission tomography methods in Russia. *Meditinskaya fizika = Medical physics*. 2015;2: 5–16. (In Russian).
16. Vodovatov AV, Chipiga LA, Ryzhov SA, Petryakova AV, Biblin AM, Gorsky GA. Radiation accidents in X-ray and radionuclide diagnostics and therapy: comparison of Russian and international approaches to the terminology and classification. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(1): 97–110. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.

Received: May 26, 2025

**For correspondence: Larisa A. Chipiga** – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Research Fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; Docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation (Mira Str., 8, Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: [larisa.chipiga@gmail.com](mailto:larisa.chipiga@gmail.com))

ORCID: 0000-0001-9153-3061

**Kamilla N. Kozlova** - Student, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0009-0005-6166-6265

**Irina A. Zvonova** – Doctor of Engineering 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** – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

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

ORCID: 0000-0002-3139-2479

**Andrey A. Stanzhevsky** – Doctor of Medical Sciences, 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: Chipiga L.A., Kozlova K.N., Zvonova I.A., Vodovatov A.V., Biblin A.M., Stanzhevsky A.A. The geography and structure of nuclear medicine centres in the Russian Federation in 2025. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 98–108. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-98-108**

## Измерение эффективной удельной активности природных радионуклидов *in situ* для оценки мощности AMBIENTного эквивалента дозы в городской среде

Рамзаев В.П., Барковский А.Н.

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 настоящее время мощность дозы гамма-излучения в воздухе от техногенных радионуклидов на загрязненных в результате аварии на ЧАЭС территориях заметно снизилась и во многих случаях сравнима с мощностью дозы гамма-излучения от природных радионуклидов. Поэтому при проведении оценки доз техногенного облучения населения этих территорий очень важно корректно оценить вклад природного облучения. Применение полевой гамма-спектрометрии (измерения *in situ*) позволяет решать эту задачу непосредственно на месте без отбора проб окружающей среды и последующих лабораторных исследований. Для измерений *in situ* наиболее удобно использовать гамма-спектрометры, которые одновременно измеряют и мощность дозы, и эффективную удельную активность природных радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ ). Последняя величина однозначно связана с мощностью дозы гамма-излучения от природных радионуклидов при проведении измерений в геометрии 2л. Возможность применения результатов измерения эффективной удельной активности для отличных от 2л геометрий, в частности, в городской среде, требует обоснования. Целью данного исследования являлось эмпирическое определение соотношения между значениями мощности AMBIENTного эквивалента дозы от природных радионуклидов и результатами измерения эффективной удельной активности природных радионуклидов *in situ* в типичных городских локациях. Материалы и методы: Одновременные измерения ( $n = 170$ ) общей мощности AMBIENTного эквивалента дозы и эффективной удельной активности были проведены в городе Санкт-Петербург (Россия) в весенне-осенний период в 2017–2024 гг. с использованием портативного гамма-спектрометра-дозиметра, расположенного в рюкзаке на спине у оператора. Результаты: По результатам измерений *in situ* был вычислен коэффициент перехода от эффективной удельной активности к мощности AMBIENTного эквивалента дозы ( $(\text{нЗв/ч})/(\text{Бк/кг})$ ). Средняя величина  $\pm$  стандартное отклонение коэффициента перехода для локаций «улица», «двор», «площадь», «набережная», «мост», «парк-газон» и «парк-пешеходная дорожка» составила  $0,55 \pm 0,02$  ( $n = 70$ ),  $0,55 \pm 0,01$  (11),  $0,55 \pm 0,02$  (10),  $0,54 \pm 0,01$  (9),  $0,54 \pm 0,04$  (16),  $0,57 \pm 0,02$  (27) и  $0,54 \pm 0,01$  (27) соответственно. Заключение: Полученные значения коэффициента перехода могут быть использованы при проведении пешеходных обследований городов для определения вклада природных радионуклидов в суммарную мощность дозы гамма-излучения в случае радиоактивного загрязнения окружающей среды.

**Ключевые слова:** мощность дозы гамма-излучения, эффективная удельная активность, природные радионуклиды, городская среда.

## Measurement of effective activity concentration of natural radionuclides *in situ* for assessment of ambient dose equivalent rate in urban environments

Valery P. Ramzaev, Anatoly N. Barkovsky

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

At present, the dose rate of gamma radiation from technogenic radionuclides in the territories contaminated as a result of the Chernobyl accident has significantly decreased and, in many cases, is comparable to the dose rate of gamma radiation from natural radionuclides. Therefore, when assessing the external doses to the population at these territories, it is important to correctly evaluate the contribution of natural radiation. The use of field gamma spectrometry (*in situ* measurements) allows solving this task directly on site without collection of environmental samples and subsequent analytical procedures in laboratory. For the *in situ*

**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

**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



measurements, it is most convenient to use the gamma spectrometers that simultaneously measure both the dose rate in air and the effective activity concentration of natural radionuclides ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ). The latter value is unambiguously related to the dose rate of gamma radiation from natural radionuclides when measurements are carried out in the  $2\pi$  geometry. The possibility of using the results of measuring the effective activity concentration in conditions different from the  $2\pi$  geometry, in particular, in an urban environment, requires justification. The aim of the study was to empirically determine the relationship between the ambient dose equivalent rate from natural radionuclides and the effective activity concentration of natural radionuclides in typical urban locations. Materials and methods. Simultaneous measurements ( $n = 170$ ) of the total ambient dose equivalent rate and effective activity concentration were performed in the city of St. Petersburg (Russia) in the spring-autumn period in 2017–2024 using a portable gamma spectrometer-dosimeter. The device was placed in a backpack on the operator's back. Main results. Based on results of the *in situ* measurements, the conversion coefficient from effective activity concentration to ambient dose equivalent rate ( $(\text{nSv/h})/(\text{Bq/kg})$ ) was calculated. The mean  $\pm$  standard deviation value of the conversion coefficient for the location "street", "courtyard", "square", "embankment", "bridge", "park-lawn", and "park-footpath" was  $0.55 \pm 0.02$  ( $n = 70$ ),  $0.55 \pm 0.01$  (11),  $0.55 \pm 0.02$  (10),  $0.54 \pm 0.01$  (9),  $0.54 \pm 0.04$  (16),  $0.57 \pm 0.02$  (27), and  $0.54 \pm 0.01$  (27), respectively. Conclusion. The obtained values of the conversion coefficient can be used when performing walk surveys of urban areas to determine contribution of natural sources to the total dose rate of gamma radiation in the case of radioactive contamination of the environment.

**Key words:** gamma dose rate, effective activity concentration, natural radionuclides, urban environment.

## Введение

При проведении измерений мощности дозы гамма-излучения в воздухе (МД) в условиях радиоактивного загрязнения местности важно корректно оценить вклад излучения от природных радионуклидов (ПРН). Особенно необходимым это становится в том случае, когда вклад от ПРН в МД является существенным, например, в случае проведения измерений на отдаленном этапе аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). В настоящее время МД от техногенных радионуклидов на загрязненных в результате аварии на ЧАЭС территориях заметно снизилась и во многих случаях сравнима с МД гамма-излучения от ПРН [1, 2]. Применение полевой гамма-спектрометрии (измерения *in situ*) позволяет оценить МД от ПРН непосредственно на месте без отбора проб окружающей среды и последующих лабораторных исследований [3, 4].

В наиболее простом случае при равномерном распределении ПРН в бесконечном полупространстве (геометрия  $2\pi$ ), например, в почве, соответственно калиброванный портативный гамма-спектрометр используют для измерения *in situ* удельной активности (УА) ПРН  $^{226}\text{Ra}$  (семейство  $^{238}\text{U}$ ),  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  [5]. Для вычисления МД (на высоте 1 м от поверхности земли), обусловленной этими радионуклидами, часто применяют коэффициент перехода (КП) от УА каждого из этих радионуклидов в почве (Бк/кг) к соответствующей мощности воздушной кермы или мощности поглощенной дозы в воздухе (МПД, нГр/ч) (например, [6–9]). Общеупотребимыми являются численные значения КП из отчета НКДАР ООН (табл. 6 в источнике [10]). Наряду с КП от УА ПРН к МПД в литературе представлены коэффициенты для перехода от УА  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в почве к соответствующим значениям другой широко используемой операционной величины – мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД, нЗв/ч) [8, 11]. Помимо учета УА каждого отдельного ПРН для вычисления МАЭД гамма-излучения в воздухе предложено использовать интегральную величину, обозначаемую как «эффективная удельная активность» ПРН ( $A_{\text{эфф}}$ , Бк/кг) [12, 13]. В условиях радиоактивного равновесия в рядах  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  формула для вычисления  $A_{\text{эфф}}$  имеет следующий вид<sup>1</sup>:

$$A_{\text{эфф}} = A_{\text{Ra}} + 1,3 \cdot A_{\text{Th}} + 0,09 \cdot A_{\text{K}}, \quad (1)$$

## Introduction

When measuring the dose rate of gamma radiation in the air (DR) in conditions of radioactive contamination of the environment, it is important to correctly assess the contribution of radiation from natural radionuclides (NRN). This becomes especially necessary when the contribution of radiation from NRN to the total DR is significant, for example, in the case of measurements in the late period after the Chernobyl accident. At present, the DR from technogenic radionuclides in the territories contaminated as a result of the Chernobyl accident has significantly decreased and, in many cases, is comparable to the DR from natural radionuclides [1, 2]. The use of field gamma spectrometry (*in situ* measurements) allows assessing the DR from NRN directly on site without collection of environmental samples and subsequent analytical procedures in laboratory [3, 4].

In the simplest case, with a uniform distribution of NRN in an infinite half-space ( $2\pi$  geometry), for example, in soil, a suitably calibrated portable gamma spectrometer is used to measure *in situ* the activity concentration (AC, Bq/kg) of  $^{226}\text{Ra}$  (the  $^{238}\text{U}$  family),  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  [5]. A conversion coefficient (CC) from the AC of each of these radionuclides in soil to the corresponding air kerma rate or absorbed dose rate in air (ADR, nGy/h) is often used to calculate the DR at a height of 1 m from the ground surface (e.g., [6–9]). The numerical CC values from the UNSCEAR 2000 report (Table 6 in [10]) are commonly used. Along with the coefficients for the conversion from the AC to ADR, the coefficients for the conversion from the AC of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  in soil to the corresponding values of another operational quantity – the ambient dose equivalent rate in air (ADER, nSv/h) – can be found in the literature [8, 11]. In addition to considering the AC of each individual NRN, it is proposed to use an integral quantity designated as the "effective activity concentration" of the NRN ( $A_{\text{eff}}$ , Bq/kg) to calculate ADER [12, 13]. In the case of radioactive equilibrium in the  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  series, the formula for calculating  $A_{\text{eff}}$  has the following form<sup>1</sup>:

$$A_{\text{eff}} = AC_{\text{Ra}} + 1,3 \cdot AC_{\text{Th}} + 0,09 \cdot AC_{\text{K}}, \quad (1)$$

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Norms of Radiation Safety (NRB-99/2009). Sanitary Rules and Norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47. Registered by the Ministry of justice of the Russian Federation on August 14, 2009, registration No. 14534. (In Russ.).]

где  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ ,  $A_K$  – удельная активность  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  соответственно, Бк/кг.

В работах Ramzaev et al. [14, 15] обоснован эмпирический метод использования величины  $A_{\text{эфф}}$  для определения вклада ПРН в значение МАЭД. Авторами был применен коммерчески доступный гамма-спектрометр-дозиметр (ГСД), который с помощью встроенной программы анализа полевого спектра позволяет одновременно определить значения  $A_{\text{эфф}}$  и общей величины МАЭД. На фоновых (радиоактивно незагрязненных) территориях показано, что имеется жесткая связь между этими двумя величинами. Для ГСД, который был опробован в работах [14, 15], и 2π геометрии источника излучения было получено и верифицировано численное значение коэффициента перехода (КП, (нЗв/ч)/(Бк/кг)) от  $A_{\text{эфф}}$  к величине МАЭД, обусловленной ПРН (МАЭД<sub>ПРН</sub>). Предложенный метод определения вклада ПРН в значение МАЭД с использованием величины  $A_{\text{эфф}}$  был успешно применен для полномасштабных обследований радиоактивно загрязненных и фоновых территорий [1, 16]. Эти измерения были выполнены над поверхностью больших грунтовых площадок в сельской местности (луга, огороды, поля), то есть там, где можно было предполагать достаточно равномерное распределение ПРН в почве по глубине и по горизонтали (геометрия 2π) и, соответственно, использовать значение КП для такой геометрии распределения источника излучения.

Применение того же самого значения КП для определения величины МАЭД<sub>ПРН</sub> при анализе полевых спектров, полученных в условиях городской среды, может оказаться некорректным. В городских условиях источник излучения представлен различными структурами и элементами, расположенными как горизонтально (участки почвы, улицы, внутридворовые площадки), так и вертикально (дома). Кроме того, распределение ПРН в этих структурных элементах и между элементами может быть весьма неравномерным [17], и условия 2π геометрии распределения источника излучения также могут не соблюдаться. В этих условиях неопределенности значение  $A_{\text{эфф}}$ , измеряемой спектрометрически *in situ*, представляет собой некоторую обобщающую величину. До проведения настоящего исследования оставалось неясным, насколько строго связана эта величина с МАЭД<sub>ПРН</sub>, измеренной с помощью того же самого ГСД. Для решения этого вопроса было предпринято исследование на фоновой (без радиоактивного загрязнения техногенными радионуклидами) территории в разнообразных условиях городской застройки. Эти условия адекватно отражают практически все возможные конфигурации, встречающиеся в городе.

**Цель исследования** – эмпирическое определение численных значений КП от измеренного с использованием ГСД значения  $A_{\text{эфф}}$  к МАЭД<sub>ПРН</sub> в городе для типичных локаций, расположенных вне помещений.

### Материалы и методы

Полевые исследования были проведены в Адмиралтейском, Василеостровском, Выборгском, Московском, Петроградском и Центральном районах города Санкт-Петербурга (Россия) в весенне-осенний период 2017–2024 гг. Территория города не получила сколь либо существенного радиоактивного загрязнения после аварии на Чернобыльской АЭС [18]. Для проведения измерений были выбраны локации, характерные для городской среды: улица (27 наименований), двор (11), площадь (7), парк (24), набережная (9) и мост (10). Данные локации местные жители и приезжие используют для передви-

where  $AC_{Ra}$ ,  $AC_{Th}$ ,  $AC_K$  is the activity concentration of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  respectively, Bq/kg.

In the studies by Ramzaev et al. [14, 15], an empirical method of using the  $A_{\text{eff}}$  value to determine contribution of the NRN to the total measured ADER value was proposed. The authors used a commercially available gamma spectrometer-dosimeter (GSD), which, with the help of a built-in program for analyzing field spectra, allows one to simultaneously determine the  $A_{\text{eff}}$  and total ADER values. It was shown that there was a strict relationship between these two variables in background (uncontaminated) territories. For the GSD, which was tested in the works [14, 15], and for the 2π geometry of the radiation source, the numerical value of the coefficient of conversion (CC, (nSv/h)/(Bq/kg)) from  $A_{\text{eff}}$  to the ADER value associated with the NRN (ADER<sub>NRN</sub>) was deduced and verified. The proposed method for determining contribution of the NRN to the total ADER value using the value of  $A_{\text{eff}}$  was successfully applied for full-scale surveys of radioactively contaminated and background territories [1, 16]. The measurements were performed over the surface of large soil plots in the rural environments: meadows, vegetable gardens, fields. For these locations, it was possible to assume a fairly uniform distribution of the NRN in the soil in depth and horizontally (the 2π geometry) and, accordingly, use the CC value for such geometry of radiation source.

The use of the same CC value for determining the ADER<sub>NRN</sub> value may be incorrect when analyzing field spectra measured in urban environments. In the urban space, the radiation source is represented by various structures and elements located horizontally (soil areas, streets, courtyard areas) and vertically (houses). In addition, the distribution of the NRN in these structural elements and between the elements can be quite uneven [17], and the conditions of 2π geometry may also not be met. Under these conditions of uncertainty, the value of  $A_{\text{eff}}$  measured spectrometrically *in situ* is a conditional value. Before this study, it remained unclear to what extent this value was strictly related to the ADER<sub>NRN</sub> measured using the same GSD. To resolve the issue, a study was undertaken on a background (without radioactive contamination by technogenic radionuclides) territory in various urban locations. These adequately reflect almost all possible configurations encountered in a city.

**The aim of the study** was to empirically determine the CC from the *in situ* measured value of  $A_{\text{eff}}$  to ADER<sub>NRN</sub> value for typical outdoor locations in a city.

### Materials and Methods

The field studies were conducted in the Admiralteysky, Vasileostrovsky, Vyborgsky, Moskovsky, Petrogradsky and Tsentralny districts of St. Petersburg (Russia) in the spring-autumn period in 2017–2024. The city territory was not contaminated after the Chernobyl accident [18]. The locations typical for the urban environment were selected for the survey: “street” (27 names), “courtyard” (11), “square” (7), “park” (24), “embankment” (9), and “bridge” (10). The locations are used by local residents and visitors for the purpose of travel and recreation within the city. However, for some categories of the population (for example, janitors, couriers and gardening workers), being outdoors is also associated with professional activities.

The roadway of the surveyed streets and avenues had asphalt surface, and the sidewalks (pedestrian parts) were covered with asphalt or with slabs (tiles) made of stone or concrete.

жения и отдыха в пределах города. Однако для некоторых категорий населения (например, дворники, курьеры и работники садово-парковых хозяйств) пребывание вне помещений связано также с профессиональной деятельностью.

Проезжая часть обследованных улиц и проспектов имела асфальтовое покрытие, а тротуары (пешеходная часть) были покрыты либо асфальтом, либо плитами (плитками) из камня или бетона. Дворы имели покрытие из асфальта или плиток; в некоторых дворах имелись земляные участки, на которых росли деревья, кустарники и трава. Площади имели асфальтовое и/или плиточное покрытие. В локации «парк» (сюда включали также площадки, которые имели формальное обозначение как «сквер» и «сад») можно было выделить два основных структурных элемента: газоны и дорожки. Последние имели искусственное покрытие, представленное с поверхности гранитной крошкой, бетонными плитками или асфальтом. Большинство обследованных сегментов набережных было покрыто гранитными плитами. В некоторых случаях весь сегмент имел гранитное ограждение со стороны реки Невы. Обследованные мосты через крупные рукава реки Невы были построены из камня и металла. Проезжая и пешеходная часть таких мостов была покрыта асфальтом. Обследованные нами небольшие мосты через мелкие рукава реки Невы были построены в основном из металла и дерева.

Для измерения МАЭД и  $A_{\text{эфф}}$  использовали гамма-спектрометр-дозиметр МКС-АТ6101Д фирмы «АТОМТЕХ» (Беларусь) [19]. Прибор состоит из блока детектирования с цилиндрическим кристаллом NaI (диаметр = 63 мм, высота = 63 мм) и блока управления. Энергетическое разрешение детектора по линии гамма-излучения 662 кэВ (от  $^{137}\text{Cs}$ – $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) равно 8,5 %. Суммарное значение собственного фона прибора и его отклика на космическое излучение (МАЭД<sub>фон</sub>, нЗв/ч) было определено при проведении измерений на льду Финского залива. Величина МАЭД<sub>фон</sub> равнялась 8 нЗв/ч.

В условиях города при большом количестве людей на улицах и в других изученных локациях было бы весьма затруднительно, а то и технически невозможно, использовать классическую схему измерений *in situ*: размещение ГСД на треножнике на высоте 1 м над поверхностью. В этой связи мы применили современный вариант проведения измерений с размещением портативного ГСД в рюкзаке на спине у оператора, который может свободно передвигаться по местности. В целом ряде исследований показано, что эта схема является удобной и эффективной для оперативного контроля радиационной обстановки на местности [17, 20–24]. Использование такого мобильного средства измерения позволяет определить пространственные вариации в радионуклидном составе загрязнения, получить данные о распределении загрязнения на территории и/или установить локализацию источника излучения, а также картировать вариации мощности дозы гамма-излучения в воздухе.

Перед каждым выходом на маршрут проводили калибровку энергетической шкалы ГСД с использованием точечного источника гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ . Блок детектирования размещали кристаллом вниз в рюкзаке на спине у стоящего оператора таким образом, чтобы расстояние между поверхностью пола и центром кристалла составляло 1 м. Блок управления размещали в том же рюкзаке в фиксированном положении рядом с верхней частью блока детектирования. Вес оператора вместе с одеждой варьировался от 69 до 72 кг. Рост оператора равнялся 170 см.

Измерение гамма-спектров проводили в сухую погоду во время перемещения оператора по исследуемым объектам в пределах их пешеходной части. На улицах, проспектах и больших мостах отдельно обследовали четную и нечетную стороны. Улицы, как правило, обследовали по всей длине, а на проспектах выделяли протяженные секции. В парках, скверах и садах

The courtyards had the asphalt or tile surfaces; some courtyards had earthen areas with trees, bushes and grass. The squares had the asphalt and/or tile surface. In the location “park” (it also included areas that had a formal designation of “square” and “garden”), two main structural elements could be distinguished: lawns and paths. The latter were covered by the pressed granite chips and gravel, concrete tiles or asphalt. Most of the surveyed embankment segments were covered with granite slabs. In some cases, the entire segment had a granite fence on the side of the Neva River. The surveyed bridges over large branches of the Neva River were built of stone and metal. The roadway and pedestrian parts of such bridges were covered with asphalt. The small bridges we surveyed across shallow branches of the Neva River were built mainly of metal and wood.

We used the MCS-AT6101D gamma spectrometer-dosimeter from ATOMTEX (Belarus) [19] to measure  $A_{\text{эфф}}$  and the total ADER. The device consists of a control unit and a detection unit with a cylindrical NaI crystal (diameter = 63 mm, height = 63 mm). The energy resolution of the detector for the 662 keV gamma radiation line (from  $^{137}\text{Cs}$ – $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ) is 8.5 %. The total value of the device's own background and its response to cosmic radiation (ADER<sub>bg</sub>, nSv/h) was determined during measurements on the ice surface of the Gulf of Finland. The ADER<sub>bg</sub> value was 8 nSv/h.

In the urban space with a large number of people on the streets and in other studied locations, it would be very difficult (if not impossible technically) to use the conventional *in situ* measurement setup: placing a GSD on a tripod at a height of 1 m above the surface. In this regard, we used the modern approach to taking measurements with the placement of a portable GSD in a backpack on the operator's back. The operator could freely move around the area. A number of studies has shown that this approach is convenient and effective for operational monitoring of the radiation environment on the ground [17, 20–24]. The use of such a mobile measuring system allows one to: 1) determine spatial variations in the radionuclide composition of contamination, 2) obtain data on distribution of a contaminant in the space, 3) locate position of a solid radiation source, 4) make dose rate distribution map.

Before each route, the energy scale of the GSD was calibrated in laboratory using a point source of  $^{137}\text{Cs}$  gamma radiation. The detection unit was placed with the crystal down in a backpack on the back of a standing operator so that the distance between the floor surface and the center of the crystal was 1 m. The control unit was placed in the same backpack in a fixed position near the top of the detection unit. The operator's weight with clothing varied from 69 to 72 kg. The operator's height was ~170 cm.

Gamma spectra were measured in dry weather while the operator was moving within pedestrian zone at the sites under study. On streets, avenues and large bridges, the even and odd sides were surveyed separately. As a rule, streets were surveyed along their entire length; extended sections were allocated on avenues. In parks and gardens, spectra were measured on pedestrian paths and separately on lawns. Due to this, the total number of the measured spectra (171) exceeded the number of names of the sites under study (83). The operator's walking speed varied from 2 to 4 km/h. The duration of a spectrum measurement was in the range from 160 to 1288 s (mean = 516 s). The variation depended mainly on length of



измерение спектров проводили на пешеходных дорожках и отдельно на газонах. В связи с этим, общее число измеренных спектров (171) превышало число наименований обследованных объектов (83). Скорость движения оператора варьировалась от 2 до 4 км/ч. Продолжительность измерения спектров находилась в диапазоне от 160 до 1288 секунд (средняя = 516 с). Разброс зависел в основном от длины обследованных улиц и мостов, а также выделенных секций проспектов, набережных и дорожек. Считывание, визуальную оценку и инструментальный анализ измеренных спектров проводили после возвращения с маршрута в лаборатории. Для этого использовали программу ATAS Lite (ATOMTEX). Относительная статистическая неопределенность измерения (при 95 % вероятности)  $A_{\text{эфф}}$  варьировала от 7 до 28 % (средняя = 12 %). Статистическая неопределенность измерения МАЭД не превышала 5 % (95 % вероятность).

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием EXCEL for Windows и on-line платформы открытого доступа<sup>2</sup>.

### Результаты и обсуждение

Как было указано выше, в общей сложности нами был измерен 171 полевой спектр. При визуальном анализе 170 спектрограмм было отмечено присутствие пиков характерных только для ПРН (примеры даны на рис. 1). В одном случае (спектр измерен на ул. Рентгена в Петроградском районе) был обнаружен аномальный пик с энергией 140 кэВ от техногенного радионуклида  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , который широко применяется в ядерной медицине для диагностики. На спектре, измеренном на том же маршруте повторно, пик с энергией 140 кэВ не был найден (рис. 2). Мы предполагаем, что мобильным носителем источника техногенного излучения являлся амбулаторный пациент, который во время одного из наших измерений проходил по ул. Рентгена после обследования с использованием препарата, содержавшего этот радионуклид: на ул. Рентгена расположено радиологическое отделение клиник Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета имени академика И.П. Павлова. Спектр, измеренный в присутствии техногенного источника, был исключен из общей статистики.

Результаты статистического анализа определенных в каждой локации значений МАЭД и  $A_{\text{эфф}}$ , а также вычисленных соотношений значений МАЭД после вычитания величины МАЭД<sub>фун</sub> (МАЭД<sub>кор</sub>, нЗв/ч) и  $A_{\text{эфф}}$  представлены в таблице. Во всей выборке значения МАЭД варьировали от 17 до 234 нЗв/ч, а  $A_{\text{эфф}}$  – от 17 до 420 Бк/кг. В пределах одной и той же локации величины МАЭД и  $A_{\text{эфф}}$  варьировали в меньшей степени, однако в большинстве локаций разброс между минимальным и максимальным значениями был более чем двукратным. Ожидаемо наименьшие величины МАЭД и  $A_{\text{эфф}}$  были определены на маленьких мостах, сделанных из дерева и металла, а наибольшие значения изученных переменных – на улицах, площадях и набережных, имеющих гранитное покрытие горизонтальной поверхности. Средние значения МАЭД<sub>кор</sub> ( $191 \pm 19$  нЗв/ч) и  $A_{\text{эфф}}$  ( $353 \pm 37$  Бк/кг) в местах с гранитным покрытием ( $n = 17$ ) были почти в два раза больше, чем таковые (МАЭД<sub>кор</sub> =  $102 \pm 14$  нЗв/ч;  $A_{\text{эфф}}$  =  $185 \pm 26$  Бк/кг) в местах, имеющих покрытие из асфальта и/или бетонных плиток ( $n = 67$ ). Отчетливая разница (в среднем в два раза) в величинах исследованных показателей была обнаружена между газонами (основной материал – садовая почва) и искусственными дорожками в парках (таблица, рис. 3). Это также связано с присутствием гранитной крошки и щебня в покрытии у большинства из обследованных дорожек. Сходную зависимость МД от вида материала, который был использован для покрытия горизонтальных поверхностей в городской среде, обнаружили и другие авторы [25–27].

streets, bridges and the allocated sections of avenues, embankments and paths. Reading, visual assessment and instrumental analysis of the measured spectra were performed after returning from route to laboratory. For this purpose, the ATAS Lite (ATOMTEX) software was used. A statistical uncertainty of the  $A_{\text{эфф}}$  measurement (at the 95 % confidence level) varied from 7 to 28 % (average = 12 %). A statistical uncertainty of the ADER measurement did not exceed 5 % (at the 95 % confidence level).

Statistical processing of obtained data was performed using EXCEL for Windows and the open access online platform<sup>2</sup>.

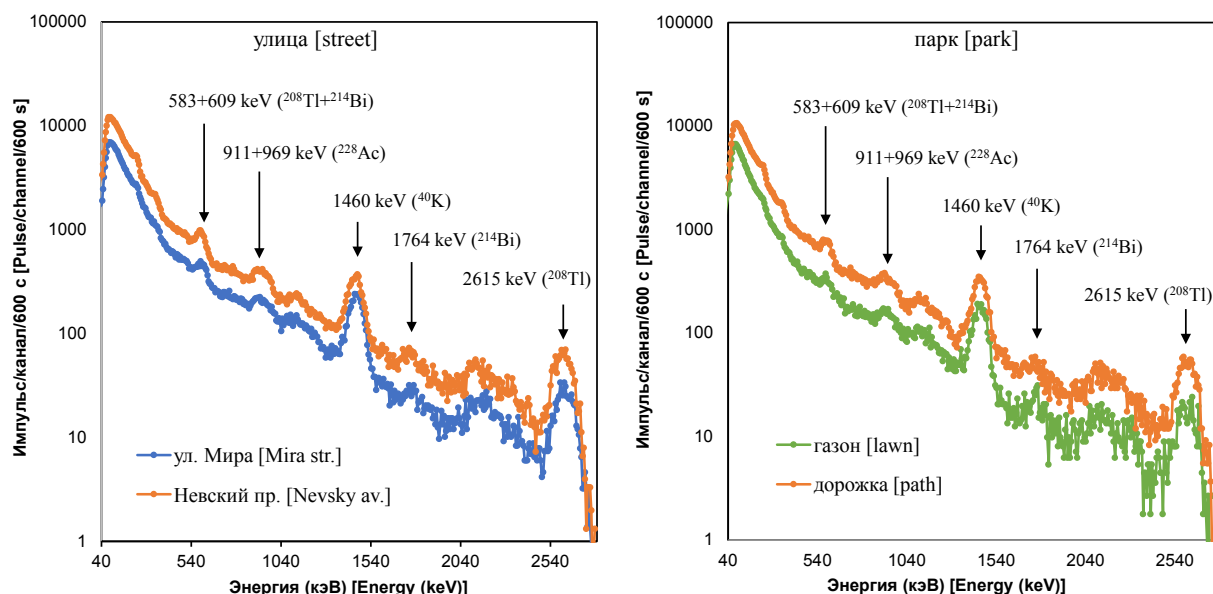
### Results and Discussion

As indicated above, we had measured a total of 171 field spectra. Visual analysis of the 170 spectrograms revealed peaks characteristic only of natural radionuclides (the examples are provided in Fig. 1). In one case (the spectrum was measured on the Roentgen Str. in the Petrogradsky district), an anomalous peak with the energy of 140 keV from the technogenic radionuclide  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  was detected. The radionuclide is widely used in nuclear medicine for diagnostics. The peak with the energy of 140 keV was not found in the spectrum measured on the same route surveyed repeatedly (Fig. 2). We assume that the mobile carrier of the man-made radiation source was an outpatient who, during one of our measurements, was walking along the Roentgen Str. after a medical examination using a drug containing this radionuclide. On the Roentgen Str. there is the radiological department of the clinics of the First Saint Petersburg State Medical University named after Academician I.P. Pavlov. The spectrum measured in the presence of the technogenic source was excluded from the general statistics.

Results of statistical analysis of the measured values of ADER and  $A_{\text{эфф}}$  for each location, as well as calculated ratios of the ADER values after subtracting the value of ADER<sub>bg</sub> (ADER<sub>кор</sub>, nSv/h) to the  $A_{\text{эфф}}$  values are provided in Table. In the entire sample, the ADER and  $A_{\text{эфф}}$  values varied from 17 to 234 nSv/h and from 17 to 420 Bq/kg, respectively. Within the same location, the values of ADER and  $A_{\text{эфф}}$  varied to a lesser extent: a more than twofold difference between the minimum and maximum values was observed for majority of locations. As expected, the lowest values of ADER and  $A_{\text{эфф}}$  were determined on small bridges made of wood and metal. The highest levels of the studied variables were determined on streets, squares and embankments with the granite paving of horizontal surfaces. The average values of ADER<sub>кор</sub> ( $191 \pm 19$  nSv/h) and  $A_{\text{эфф}}$  ( $353 \pm 37$  Bq/kg) in places with granite pavement ( $n = 17$ ) were almost twice as high as those (ADER<sub>кор</sub> =  $102 \pm 14$  nSv/h;  $A_{\text{эфф}}$  =  $185 \pm 26$  Bq/kg) in sites with the asphalt and/or concrete slab pavement ( $n = 67$ ). A similar difference (on average, two-fold) in values of the studied variables was found between lawns (the mair material is garden soil) and artificial paths in parks (Table, Fig. 3). This is also associated with the presence of granite chips and crushed stone in the pavement of most of the surveyed paths in parks. A similar dependence of DR on the type of material used to cover horizontal surfaces in the urban environment was reported by other authors [25–27].

<sup>2</sup> Доступно по ссылке [Available from]: <https://www.socscistatistics.com> (Дата обращения: 01.03.2025 [Accessed March 01, 2025]).

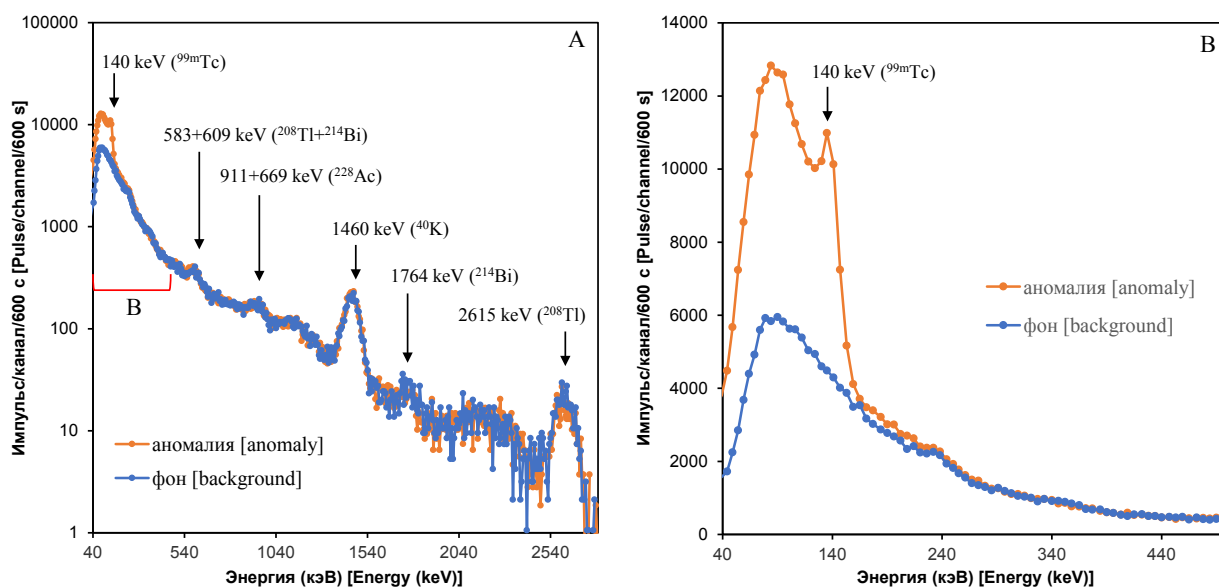




**Рис. 1.** Примеры спектров гамма-излучения, измеренных на улицах и в парках Санкт-Петербурга. Поверхность тротуаров в основном покрыта асфальтом на ул. Мира и гранитными плитками на Невском проспекте. Поверхность пешеходных дорожек в парке (Александровский парк) покрыта гранитным щебнем и отсевом.

Указаны основные пики ПРН

[Fig. 1. Examples of the gamma-spectra measured at streets and parks in Saint Petersburg. The sidewalks surface was mainly covered with asphalt at the Mira Str. and with granite paving slabs at the Nevsky avenue. The surface of footpaths at the park (Aleksandrovsky park) was covered with granite gravel. The major peaks of natural radionuclides are indicated]



**Рис. 2.** Фоновый (обычный) и аномальный гамма-спектры, измеренные на ул. Рентгена: (А) – спектры полного энергетического диапазона (40–2800 кэВ); (В) – участки спектров (40–500 кэВ), обозначенные красной скобкой на панели А

[Fig. 2. The background (ordinary) and anomalous gamma-ray spectra measured at the Roentgen Str.: (A) – full energy range spectra (40–2800 keV); (B) – the spectra sections (40–500 keV) indicated by a red bracket at the panel A]

Обобщенная статистика результатов измерений  $A_{\text{эфф}}$  и МАЭД, и отношения величины МАЭД после вычитания вклада космического излучения и собственного фона прибора (МАЭД<sub>кор</sub>) к величине  $A_{\text{эфф}}$  в локациях «улица», «двор», «площадь», «парк-дорожка», «парк-газон», «набережная» и «мост» в городе Санкт-Петербурге в 2017–2024 гг. Число измерений дано в скобках

Summary statistics of results of the  $A_{\text{eff}}$  and ADER measurements, and the ratio of the ADER value after subtracting the contribution of cosmic radiation and the device's intrinsic noise (ADER<sub>cor</sub>) to the  $A_{\text{eff}}$  value in the locations “street”, “yard”, “square”, “park-path”, “park-lawn”, “embankment”, and “bridge” in the city of St. Petersburg in 2017–2024. The number of measurements is given in brackets]

| Параметр<br>[Parameter]           | МАЭД, нЗв/ч<br>[ADER, nSv/h] | $A_{\text{эфф}}$ , Бк/кг<br>[ $A_{\text{eff}}$ , Bq/kg] | МАЭД <sub>кор</sub> / $A_{\text{эфф}}$ , (нЗв/ч)/(Бк/кг)<br>[ADER <sub>cor</sub> / $A_{\text{eff}}$ , (nSv/h)/(Bq/kg)] |
|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| улица [street] (70)               |                              |                                                         |                                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]                 | 74                           | 117                                                     | 0,52                                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]                | 216                          | 385                                                     | 0,57                                                                                                                   |
| Медиана [Median]                  | 116                          | 195                                                     | 0,55                                                                                                                   |
| Средняя [Mean]                    | 122                          | 207                                                     | 0,55                                                                                                                   |
| С.о. [SD]                         | 29                           | 54                                                      | 0,01                                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]                   | 24                           | 26                                                      | 1,8                                                                                                                    |
| двор [courtyard] (11)             |                              |                                                         |                                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]                 | 99                           | 158                                                     | 0,54                                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]                | 148                          | 260                                                     | 0,58                                                                                                                   |
| Медиана [Median]                  | 120                          | 202                                                     | 0,56                                                                                                                   |
| Средняя [Mean]                    | 122                          | 206                                                     | 0,55                                                                                                                   |
| С.о. [SD]                         | 17                           | 33                                                      | 0,01                                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]                   | 14                           | 16                                                      | 2,5                                                                                                                    |
| площадь [square] (10)             |                              |                                                         |                                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]                 | 79                           | 123                                                     | 0,52                                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]                | 216                          | 386                                                     | 0,58                                                                                                                   |
| Медиана [Median]                  | 157                          | 275                                                     | 0,54                                                                                                                   |
| Средняя [Mean]                    | 149                          | 260                                                     | 0,55                                                                                                                   |
| С.о. [SD]                         | 49                           | 97                                                      | 0,02                                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]                   | 33                           | 37                                                      | 3,4                                                                                                                    |
| парк-дорожка [park-footpath] (27) |                              |                                                         |                                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]                 | 86                           | 151                                                     | 0,52                                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]                | 183                          | 327                                                     | 0,55                                                                                                                   |
| Медиана [Median]                  | 140                          | 245                                                     | 0,54                                                                                                                   |
| Средняя [Mean]                    | 134                          | 234                                                     | 0,54                                                                                                                   |
| С.о. [SD]                         | 30                           | 56                                                      | 0,01                                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]                   | 23                           | 24                                                      | 1,7                                                                                                                    |
| парк-газон [park-lawn] (27)       |                              |                                                         |                                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]                 | 44                           | 59                                                      | 0,53                                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]                | 91                           | 145                                                     | 0,61                                                                                                                   |
| Медиана [Median]                  | 66                           | 102                                                     | 0,58                                                                                                                   |
| Средняя [Mean]                    | 68                           | 105                                                     | 0,57                                                                                                                   |
| С.о. [SD]                         | 10                           | 19                                                      | 0,02                                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]                   | 15                           | 18                                                      | 3,2                                                                                                                    |
| набережная [embankment] (9)       |                              |                                                         |                                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]                 | 63                           | 98                                                      | 0,53                                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]                | 234                          | 420                                                     | 0,56                                                                                                                   |
| Медиана [Median]                  | 189                          | 327                                                     | 0,54                                                                                                                   |
| Средняя [Mean]                    | 154                          | 271                                                     | 0,54                                                                                                                   |
| С.о. [SD]                         | 72                           | 135                                                     | 0,01                                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]                   | 47                           | 50                                                      | 2,1                                                                                                                    |

| Параметр<br>[Parameter] | МАЭД, нЗв/ч<br>[ADER, nSv/h] | $A_{\text{эфф}}$ , Бк/кг<br>[ $A_{\text{eff}}$ , Bq/kg] | МАЭД/ $A_{\text{эфф}}$ , (нЗв/ч)/(Бк/кг)<br>[ADER <sub>cor</sub> / $A_{\text{eff}}$ , (nSv/h)/(Bq/kg)] |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| мост [bridge] (16)      |                              |                                                         |                                                                                                        |
| Минимум [Minimum]       | 17                           | 17                                                      | 0,47                                                                                                   |
| Максимум [Maximum]      | 120                          | 214                                                     | 0,65                                                                                                   |
| Медиана [Median]        | 84                           | 134                                                     | 0,53                                                                                                   |
| Средняя [Mean]          | 74                           | 123                                                     | 0,54                                                                                                   |
| С.о. [SD]               | 35                           | 67                                                      | 0,04                                                                                                   |
| КВ (%) [CV (%)]         | 48                           | 54                                                      | 7,7                                                                                                    |

\* С.о. – стандартное отклонение [SD – standard deviation]; КВ – коэффициент вариации, % [CV – coefficient of variation, %].

Помимо вариабельности мощности гамма-излучения от ПРН в материалах, которые были использованы для покрытия горизонтальных поверхностей, определенное влияние на величины МД и  $A_{\text{эфф}}$ , регистрируемые прибором *in situ* в городской среде, могло оказывать гамма-излучение от ПРН в материалах стен домов и других вертикальных поверхностей. На примере города Вроцлав (Польша) показано, что максимальные значения МД от ПРН вне помещений можно обнаружить в центре города в местах сочетания двух факторов: близкое расположение зданий друг от друга и гранитное покрытие тротуаров [25]. При обследовании небольших скверов в городе Сан-Пауло (Бразилия) установлено, что до 30 % МД в этой локации связано с источником природного гамма-излучения, расположенном в окружающих зданиях [28].

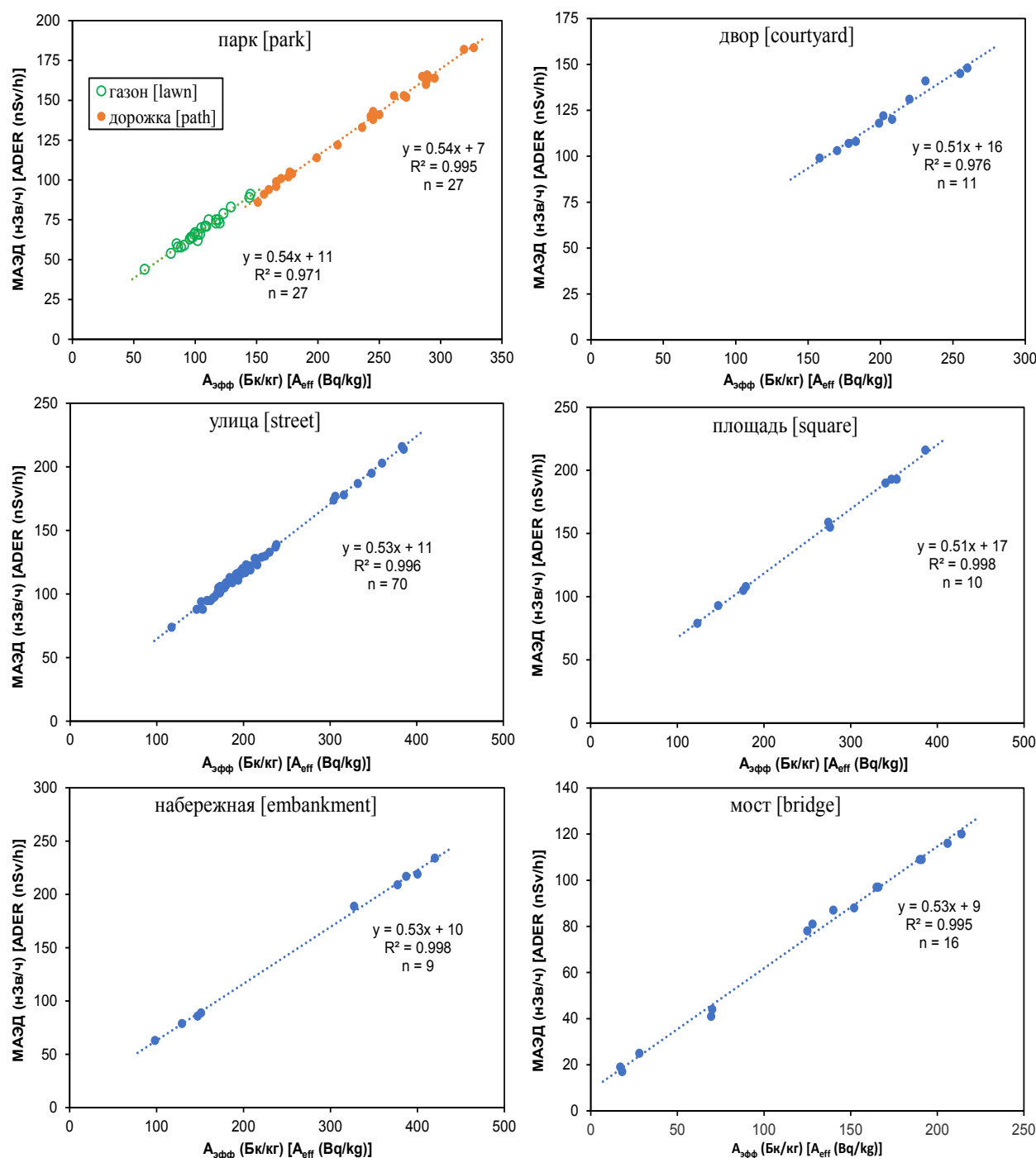
Во всех изученных локациях была выявлена статистически значимая ( $P < 0,001$ ) и сильная корреляция между МАЭД и  $A_{\text{эфф}}$ : коэффициент корреляции Спирмана был равен 0,988, 0,991, 0,984, 1, 0,994, 0,983 и 0,968 для улиц, дворов, площадей, набережных, мостов, дорожек в парках и газонов в парках соответственно. Графически эта выраженная связь между двумя переменными для индивидуальных значений и обобщенно в виде линейной регрессии представлена на рисунке 3.

Индивидуальные значения отношения МАЭД<sub>кор</sub> к  $A_{\text{эфф}}$  демонстрировали сравнительно небольшой разброс: от 0,52 до 0,61 (нЗв/ч)/(Бк/кг) (последняя колонка в таблице). В ашей выборке это отношение можно уверенно рассматривать в качестве КП от  $A_{\text{эфф}}$  к МАЭД<sub>ПРН</sub>, так как в спектрах, включенных в статистический анализ, присутствовали пики только ПРН. Средние значения КП в различных локациях практически совпадали между собой и находились в диапазоне от 0,54 до 0,57 (нЗв/ч)/(Бк/кг). Эти значения существенно превышали величину 0,38 (нЗв/ч)/(Бк/кг), которую использовали И.П. Стамат и др. [13] «для оценки мощности дозы гамма-излучения на открытой местности на территории населенных пунктов с учетом значений  $A_{\text{эфф}}$  в строительном сырье и материалах местного производства». Вместе с тем наши эмпирически выведенные численные значения КП очень хорошо соответствуют величине 0,55 (нЗв/ч)/(Бк/кг) сравнительно недавно вычисленной и верифицированной Satoh and Petoussi-Henss [11] в отношении  $^{238}\text{U}$  (и, соответственно,  $^{226}\text{Ra}$ ), равномерно распределенного в почве. Напомним, что в формуле для вычисления  $A_{\text{эфф}}$  (выражение (1)) УА  $^{226}\text{Ra}$  принята за единицу.

In addition to the variability of DR from the NRN in the materials used to cover horizontal surfaces, gamma radiation from the NRN in the materials of the walls of houses and other vertical surfaces could have a certain effect on the levels of DR and  $A_{\text{eff}}$  measured by the GSD *in situ* in an urban environment. For example, for the city of Wroclaw (Poland) it was shown that the maximum values of DR from the NRN outdoors could be found in the city center in the places where two factors combined: 1) close proximity of buildings to each other, and 2) granite pavement [25]. When surveying small squares in the city of Sao Paulo (Brazil), it was deduced that up to 30 % of DR in this location was associated with the natural radiation source in the surrounding buildings [28].

In all the surveyed locations in St. Petersburg, a strong and statistically significant ( $P < 0.001$ ) correlation was found between ADER and  $A_{\text{eff}}$ : Spearman's correlation coefficient was 0.988, 0.991, 0.984, 1, 0.994, 0.983, and 0.968 for streets, courtyards, squares, embankments, bridges, park paths, and park lawns, respectively. This close relationship between the two variables is represented graphically in Figure 3 for individual sites (as points) and as a regression line.

The individual values of the ADER<sub>cor</sub> to  $A_{\text{eff}}$  ratio had a relatively narrow variation range: from 0.52 to 0.61 (nSv/h)/(Bq/kg) (last column in Table). In our sample, the ratio can be confidently considered as the conversion coefficient from  $A_{\text{eff}}$  to ADER<sub>NRN</sub> since the all 170 spectra demonstrated peaks associated only with natural radionuclides. The average CC values in different locations were virtually identical and ranged from 0.54 to 0.57 (nSv/h)/(Bq/kg). These values significantly exceed the value of 0.38 (nSv/h)/(Bq/kg), which was used by Stamat et al. [13] “to assess the dose rate of gamma radiation in open areas on the territory of populated space, taking into account the  $A_{\text{eff}}$  values in building raw materials and locally produced materials”. At the same time, our empirically derived CC values correspond very well to the value of 0.55 (nSv/h)/(Bq/kg) recently reported by Satoh and Petoussi-Henss [11] for  $^{238}\text{U}$  (and, accordingly,  $^{226}\text{Ra}$ ) uniformly distributed in soil. It should be recalled that in the formula for calculating  $A_{\text{eff}}$  (the expression (1)), the correction factor for the  $^{226}\text{Ra}$  AC is taken as 1.0.



**Рис. 3.** Соотношение между  $A_{эфф}$  и МАЭД в локации «парк» (на газоне и на пешеходной дорожке), «улица», «двор», «площадь», «набережная» и «мост» в г. Санкт-Петербург в 2017–2024 гг.

**[Fig. 3.]** Relationship between  $A_{eff}$  and ADER at the location “park” (on a lawn and on a pedestrian path), “street”, “yard”, “square”, “embankment” and “bridge” in Saint Petersburg in 2017–2024

Наше исследование избирательно охватывает очень небольшую часть территории Санкт-Петербурга, поэтому полученные результаты следует рассматривать в качестве предварительной и весьма ограниченной оценки мощности дозы природного гамма-излучения в выбранных типичных локациях в данном городе. Представительная оценка МАЭД<sub>ГРН</sub> в городе в целом не ставилась в качестве цели исследования. Вместе с тем число обследованных точек было достаточным для того,

This study covers a small part of the territory of Saint Petersburg, so the obtained results on ADER<sub>NRN</sub> should be considered as a preliminary and limited assessment of the dose rate of natural gamma radiation in the typical locations in this city. A representative assessment of ADER<sub>NRN</sub> in the city as a whole was not the goal of the study. However, the number of surveyed sites was sufficient to reveal a strong relationship between ADER<sub>NRN</sub> and  $A_{eff}$ ; it was experimentally determined that



чтобы выявить устойчивую связь между МАЭД<sub>ПРН</sub> и  $A_{эфф}$ ; экспериментально установлено, что величина КП от одного параметра к другому мало варьируется внутри локации и от локации к локации. В определенной мере это объясняется тем, что для программного вычисления значений МАЭД и  $A_{эфф}$  в каждой точке был использован один и тот же полевой спектр. При применении комбинации двух измерительных приборов – полевого гамма-спектрометра (измерения  $A_{эфф}$ ) и гамма-дозиметра (измерения МАЭД) – необходимо провести дополнительные измерения для установления значений КП от одного показателя к другому.

Для вычисления МАЭД<sub>ПРН</sub> (нЗв/ч) по результатам измерения  $A_{эфф}$  (Бк/кг) *in situ* с использованием соответственно калиброванного (для геометрии 2π) полевого гамма-спектрометра-дозиметра следует применить простую формулу:

$$\text{МАЭД}_{\text{ПРН}} = A_{эфф} \cdot \text{КП}_i, \quad (2)$$

где  $\text{КП}_i$  – среднее значение коэффициента перехода от  $A_{эфф}$  к МАЭД<sub>ПРН</sub> для  $i$ -ой локации из таблицы, (нЗв/ч)/(Бк/кг).

Для вычисления значения МАЭД, обусловленного присутствием техногенного источника гамма-излучения (МАЭД<sub>тех</sub>, нЗв/ч), следует использовать формулу:

$$\text{МАЭД}_{\text{тех}} = \text{МАЭД} - \text{МАЭД}_{\text{ПРН}} - \text{МАЭД}_{\text{фон}}, \quad (3)$$

где МАЭД – измеренное значение общей мощности амбиентного эквивалента дозы, нЗв/ч; МАЭД<sub>ПРН</sub> – вычисленное по формуле (2) значение мощности амбиентного эквивалента дозы от ПРН, нЗв/ч; МАЭД<sub>фон</sub> – суммарное значение собственного фона дозиметра и его отклика на космическое излучение, нЗв/ч.

Ранее этот алгоритм определения МАЭД<sub>тех</sub> был успешно применен при выборочном обследовании сельских населенных пунктов и их ареалов в условиях загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в Брянской области России и Гомельской области Беларуси [1, 2, 15, 29]. С учетом результатов настоящей работы более детальные исследования радиационной обстановки в пешеходном режиме целесообразно провести в городах Клинцы и Новозыбков, находящихся в зоне радиоактивного загрязнения в Брянской области. Потенциальным объектом для применения данной технологии может быть город Электросталь (Московская область, Россия), где в результате нештатной ситуации в 2013 г. произошло загрязнение окружающей среды  $^{137}\text{Cs}$  [30].

Измерения полевых спектров мы проводили при размещении детектора в рюкзаке у оператора. В этом случае тело человека выступает в качестве ослабителя внешнего гамма-излучения; величина ослабления излучения зависит от роста и массы тела оператора и от характеристик источника излучения (например, его положения по отношению к оператору) [21]. Для оператора с массой тела около 70 кг и ростом 172 см соотношение между МАЭД<sub>ПРН</sub>, измеренной в присутствии оператора, и таковой, измеренной при расположении детектора на треножнике на высоте 1 м над поверхностью земли или твердого покрытия, равнялось  $0,88 \pm 0,02$  [15]. Эту поправку на присутствие оператора следует учитывать при сравнении результатов, полученных *in situ* с использованием классической схемы расположения детектора на треножнике и при размещении спектрометра в рюкзаке на спине у человека.

the value of CC from one parameter to another varies little within a location and from location to location. To a certain extent, this is explained by the fact that the same field spectrum was used for the software calculation of the ADER and  $A_{eff}$  values at each point. When using a combination of the two measuring devices: a field gamma spectrometer ( $A_{eff}$  measurements) and a gamma dosimeter (ADER measurements), it might be necessary to conduct additional measurements to determine values of CC from one variable to another.

To calculate  $\text{ADER}_{\text{NRN}}$  (nSv/h) based on results of  $A_{eff}$  (Bq/kg) measurements *in situ*, using a suitably calibrated (for the 2π geometry) portable gamma spectrometer, the simple formula can be applied:

$$\text{ADER}_{\text{NRN}} = A_{eff} \cdot \text{CC}_i, \quad (2)$$

where  $\text{CC}_i$  is the mean value of conversion coefficient from  $A_{eff}$  to  $\text{ADER}_{\text{NRN}}$  for the  $i$ -th location from Table, (nSv/h)/(Bq/kg).

To calculate the ADER value due to the presence of a technogenic gamma radiation source in the environment ( $\text{ADER}_{\text{tech}}$ , nSv/h), use the formula:

$$\text{ADER}_{\text{tech}} = \text{ADER} - \text{ADER}_{\text{NRN}} - \text{ADER}_{\text{bg}}, \quad (3)$$

where ADER is the measured value of the total ambient dose equivalent rate, nSv/h;  $\text{ADER}_{\text{NRN}}$  is the value of the ambient dose equivalent rate from NRN calculated using formula (2), nSv/h;  $\text{ADER}_{\text{bg}}$  is the total value of the dosimeter's intrinsic noise and the dosimeter response to cosmic radiation, nSv/h.

Earlier, this algorithm for determining  $\text{ADER}_{\text{tech}}$  was successfully applied during selective surveys of the rural areas under conditions of  $^{137}\text{Cs}$  contamination in the Bryansk region of Russia and the Gomel region of Belarus [1, 2, 15, 29]. Taking into account results of the present work, it is advisable to conduct more detailed studies of the radiation environment in pedestrian mode in the cities of Klinsky and Novozybkov located in the zone of radioactive contamination in the Bryansk region. A potential target for application of this mobile technology could be the city of Elektrostal (the Moscow region, Russia) where, as a result of the emergency situation in 2013, the urban space was contaminated with  $^{137}\text{Cs}$  [30].

We measured the field spectra with the detector placed in the operator's backpack. In this case, the human body acts as an attenuator of external gamma radiation; the amount of the radiation attenuation depends on the operator's body weight and characteristics of the radiation source (e.g., its position relative to the operator) [21]. For the operator with a body weight of about 70 kg and a height of 172 cm, the ratio between the  $\text{ADER}_{\text{NRN}}$  measured in the operator's presence and that measured with the detector placed on a tripod at a height of 1 m above the ground or hard surface was  $0.88 \pm 0.02$  [15]. The correction for the presence of the operator should be taken into account for comparison of the results obtained *in situ* using the spectrometer placement on a tripod and when placing the spectrometer in a backpack on a person's back.

## Заключение

Выполненное исследование позволило эмпирически определить численные значения коэффициента перехода от  $A_{\text{эфф}}$  к МАЭД<sub>ГРН</sub> в типичных локациях в городе: улица, двор, площадь, набережная, мост, парк. Установлена устойчивая связь между этими параметрами для всех локаций и слабая зависимость от геометрии измерений. Средние величины КП для этих локаций находились в узком диапазоне от 0,54 до 0,57 (нЗв/ч)/(Бк/кг). Полученные значения КП применимы в том случае, если измерения МАЭД и  $A_{\text{эфф}}$  проводят одновременно *in situ* при размещении гамма-спектрометра-дозиметра в рюкзаке на спине у оператора. Результаты данного исследования могут быть использованы при проведении пешеходных обследований городов для определения вклада природных радионуклидов в суммарную МД гамма-излучения в случае радиоактивного загрязнения окружающей среды.

## Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

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

Барковский А.Н. – концептуализация, редактирование рукописи.

## Информация о конфликте интересов

У авторов нет конфликтов интересов, которые следует раскрывать.

## Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Литература

1. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы и плотность загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  на огородах в населенных пунктах Брянской области России в 2020–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, № 4. С. 85–95. DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95.
2. Рамзаев В.П., Барковский А.Н., Братилова А.А. Мощность амбиентного эквивалента дозы от  $^{137}\text{Cs}$  и природных радионуклидов в одноэтажных жилых домах в населенных пунктах Брянской области в 2020–2021 гг. // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 2. С. 95–107. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-95-107.
3. Beck H.L., DeCampo J., Gogolak C. *In situ* Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry. Report HASL-258. USAEC, New York, NY: Health and Safety Laboratory, 1972.
4. Clouvas A., Xanthos S., Antonopoulos-Domis M. Extended survey of indoor and outdoor terrestrial gamma radiation in Greek urban areas by *in situ* gamma spectrometry with a portable Ge detector // Radiation Protection Dosimetry. 2001. Vol. 94, No. 3. P. 233–246. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006495.
5. Roed J., Lange C.L., Andersson K.G. et al. Decontamination in a Russian settlement. RISØ National Laboratory report Risø-R-870 (EN). RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1996.
6. Ramzaev V., Yonehara H., Hille R. et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003 // Journal of Environmental Radioactivity. 2006. Vol. 85. P. 205–227. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.04.014.
7. Zinsou M.B., Houessouvo C.R., Rabesiranana N. et al. Gamma radiation dose rate measurements in granite quarries and schools in two mountainous towns in Benin // Brazilian Journal of Radiation Sciences. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 1–34. DOI: 10.15392/2319-0612.2024.2517.

## Conclusion

The research allowed us to determine the numerical values of the conversion coefficient (CC) from  $A_{\text{eff}}$  to ADER<sub>NRN</sub> in the typical urban locations: street, yard, square, embankment, bridge, and park. A stable relationship was found between the measured parameters for all locations; a weak dependence of the CC on the measurement geometry was observed. The average values of the CC for the surveyed locations were in a narrow range from 0.54 to 0.57 (nSv/h)/(Bq/kg). The obtained CC values are applicable if the ADER and  $A_{\text{eff}}$  measurements are carried out *in situ* with the gamma spectrometer-dosimeter placed in a backpack on the operator's back. Results of the study can be used when conducting walk surveys of urban areas to determine contribution of natural sources to the total dose rate of gamma radiation in the case of radioactive contamination of the environment.

## Authors' personal contribution

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

Barkovsky A.N. – conceptualization, editing the manuscript.

## Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to declare.

## Sources of funding

The study had no sponsorship.

## References

1. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate and soil contamination density with  $^{137}\text{Cs}$  in kitchen gardens in settlements of the Bryansk region, Russia in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(4): 85–95. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2021-14-4-85-95.
2. Ramzaev VP, Barkovsky AN, Bratilova AA. Ambient dose equivalent rate from  $^{137}\text{Cs}$  and natural radionuclides in one-story residential buildings in settlements of the Bryansk region in 2020–2021. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(2): 95–107. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-95-107.
3. Beck HL, DeCampo J, Gogolak C. *In situ* Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry. Report HASL-258, USAEC, New York, NY: Health and Safety Laboratory; 1972.
4. Clouvas A, Xanthos S, Antonopoulos-Domis M. Extended survey of indoor and outdoor terrestrial gamma radiation in Greek urban areas by *in situ* gamma spectrometry with a portable Ge detector. *Radiation Protection Dosimetry*. 2001;94(3): 233–246. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006495.
5. Roed J, Lange CL, Andersson KG, Prip H, Olsen S, Ramzaev V, et al. Decontamination in a Russian settlement. RISØ National Laboratory report Risø-R-870 (EN). RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark; 1996.
6. Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, Barkovsky A, Mishine A, Sahoo SK, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996–2003. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2006;85: 205–227. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2004.04.014.
7. Zinsou MB, Houessouvo CR, Rabesiranana N, Allodji RS, Medenou D, Dossou J, et al. Gamma radiation dose rate measurements in granite quarries and schools in two mountainous towns in Benin. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*. 2024;12(4): 1–34. DOI: 10.15392/2319-0612.2024.2517.

8. Lemerrier M., Gurriaran R., Bouisset P., Cagnat X. Specific activity to  $H^*(10)$  conversion coefficients for *in situ* gamma spectrometry // *Radiation Protection Dosimetry*. 2008. 128, No. 1. P. 83–89. DOI: 10.1093/rpd/ncm307.
9. Askri B., Manai K., Bouzouita A. et al. Estimation of the gamma-ray field in air from radioactive sources in the ground by numerical solution of the Boltzmann transport equation // *Radiation Protection Dosimetry*. 2023. Vol. 199, No. 7. P. 631–645. DOI: 10.1093/rpd/ncad064.
10. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, 2000.
11. Satoh D., Petoussi-Henss N. Dose-rate coefficients for external exposure to radionuclides uniformly distributed in soil to an infinite depth // *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 9. P. e0310552. DOI: 10.1371/journal.pone.0310552.
12. Стамат И.П., Лисаченко Э.П. Эффективная удельная активность природных радионуклидов в средах с нарушенным радиоактивным равновесием в рядах урана и тория // *Радиационная гигиена*. 2008. Т. 1, № 1. С. 27–31.
13. Стамат И.П., Кононенко Д.В., Кормановская Т.А., Королева Н.А. Анализ сведений о дозах внешнего терригенного облучения населения Российской Федерации в коммунальных условиях // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8, № 3. С. 33–48.
14. Ramzaev V., Barkovsky A., Bernhardsson C., Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  contributions to ambient dose equivalent rate outdoors // *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 18–29. DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-18-29.
15. Ramzaev V., Bernhardsson C., Barkovsky A. et al. A backpack  $\gamma$ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$ , from  $^{137}\text{Cs}$  and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation // *Radiation Measurements*. 2017. Vol. 107. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.10.002.
16. Ramzaev V., Bernhardsson C., Vodovatov A. et al. Ambient dose equivalent rates of gamma radiation from natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  at grasslands and forests in the area of the Belarusian NPP in the pre-commissioning period (2019) // *Radiation Protection Dosimetry*. 2024. Vol. 200, No. 5. P. 496–503. DOI: 10.1093/rpd/ncad016.
17. Cresswell A.J., Sanderson D.C.W., Harrold M. et al. Demonstration of lightweight gamma spectrometry systems in urban environments // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. Vol. 124. P. 22–28. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.03.006.
18. De Cort M., Dubois G., Fridman Sh.D. et al. Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident. EUR Report 16733. EC, Office for Official Publications of the European Commission Communities, Luxembourg, 1998.
19. ATOMTEX. Спектрометр МКС АТ6101ДР. URL: <https://old.atomtex.com/ru/spektrometr-mks-at6101dr> (Дата обращения: 28.02.2025).
20. Nilsson J.M.C., Östlund K., Söderberg J. et al. Tests of HPGe- and scintillation-based backpack  $\gamma$ -radiation survey systems // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 135. P. 54–62. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.03.013.
21. Buchanan E., Cresswell A.J., Seitz B., Sanderson D.C.W. Operator related attenuation effects in radiometric surveys // *Radiation Measurements*. 2016. Vol. 86. P. 24–31. DOI: 10.1016/j.radmeas.2015.12.029.
22. Andoh M., Yamamoto H., Kanno T., Saito K. Measurement of ambient dose equivalent rates by walk survey around Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using KURAMA-II until 2016 // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 210. P. 105812. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.09.010.
23. Poltabtim W., Musikawan S., Thumwong A. et al. Estimation of ambient dose equivalent rate distribution map using walking survey technique in Hirosaki City, Aomori, Japan // *International*
8. Lemerrier M., Gurriaran R., Bouisset P., Cagnat X. Specific activity to  $H^*(10)$  conversion coefficients for *in situ* gamma spectrometry. *Radiation Protection Dosimetry*. 2008;128(1): 83–89. DOI: 10.1093/rpd/ncm307.
9. Askri B., Manai K., Bouzouita A., Zaidi E., Trabelsi A. Estimation of the gamma-ray field in air from radioactive sources in the ground by numerical solution of the Boltzmann transport equation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2023;199(7): 631–645. DOI: 10.1093/rpd/ncad064.
10. UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York; 2000.
11. Satoh D., Petoussi-Henss N. Dose-rate coefficients for external exposure to radionuclides uniformly distributed in soil to an infinite depth. *PLoS ONE*. 2024;19(9): e0310552. DOI: 10.1371/journal.pone.0310552.
12. Stamat IP, Lisachenko EP. Effective specific activity of natural radionuclides in the NORM belonged to the  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  series being in the state of disturbed radioactive equilibrium. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2008;1(1): 27–31. (In Russian).
13. Stamat IP, Kononenko DV, Kormanovskaya TA, Koroleva NA. Analysis of data of doses of external terrigenous irradiation of the Russian Federation population in municipal conditions. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2015;8(3): 33–48. (In Russian).
14. Ramzaev V, Barkovsky A, Bernhardsson C, Mattsson S. Calibration and testing of a portable NaI(Tl) gamma-ray spectrometer-dosimeter for evaluation of terrestrial radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  contributions to ambient dose equivalent rate outdoors. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2017;10(1): 18–29. DOI: 10.21514/1998-426x-2017-10-1-18-29.
15. Ramzaev V, Bernhardsson C, Barkovsky A, Romanovich I, Jarneborn J, Mattsson S, et al. A backpack  $\gamma$ -spectrometer for measurements of ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$ , from  $^{137}\text{Cs}$  and from naturally occurring radiation: the importance of operator related attenuation. *Radiation Measurements*. 2017;107: 14–22. DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.10.002.
16. Ramzaev V, Bernhardsson C, Vodovatov A, Chipiga L, Nekrasov V, Dvornik A. Ambient dose equivalent rates of gamma radiation from natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  at grasslands and forests in the area of the Belarusian NPP in the pre-commissioning period (2019). *Radiation Protection Dosimetry*. 2024;200(5): 496–503. DOI: 10.1093/rpd/ncad016.
17. Cresswell AJ, Sanderson DCW, Harrold M, Kirley B, Mitchell C, Weir A. Demonstration of lightweight gamma spectrometry systems in urban environments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013;124: 22–28. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2013.03.006.
18. De Cort M, Dubois G, Fridman ShD, Germenchuk MG, Izrael YuA, Janssens A, et al. Atlas of Caesium Deposition on Europe after the Chernobyl Accident. EUR Report 16733. EC, Office for Official Publications of the European Commission Communities, Luxembourg; 1998.
19. ATOMTEX. Spectrometer AT6101DR. Available on: <https://old.atomtex.com/en/at6101dr-spectrometer> (Accessed 28 February 2025).
20. Nilsson JMC, Östlund K, Söderberg J, Mattsson S, Rääf C. Tests of HPGe- and scintillation-based backpack  $\gamma$ -radiation survey systems. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014;135: 54–62. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2014.03.013.
21. Buchanan E, Cresswell AJ, Seitz B, Sanderson DCW. Operator related attenuation effects in radiometric surveys. *Radiation Measurements*. 2016;86: 24–31. DOI: 10.1016/j.radmeas.2015.12.029.
22. Andoh M, Yamamoto H, Kanno T, Saito K. Measurement of ambient dose equivalent rates by walk survey around Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using KURAMA-II



- Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20, No. 3. P. 2657. DOI: 10.3390/ijerph20032657.
24. Altfelder S., Preugschat B., Matos M. et al. Upscaling ground-based backpack gamma-ray spectrometry to spatial resolution of UAV-based gamma-ray spectrometry for system validation // Journal of Environmental Radioactivity. 2024. Vol. 273. P. 107382. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107382.
  25. Nowak K., Solecki A. Factors affecting background gamma radiation in the urban space // Journal of Elementology. 2015. Vol. 20, No. 3. P. 653–665. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.4.755.
  26. Nowak K. Natural background gamma radiation in the urban space of Walbrzych. Proceedings of ECOpole. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 47–56. DOI: 10.2429/proc.2016.10(1)006.
  27. Чубирко М.И., Клепиков О.В., Куролап С.А. и др. Оценка мощности эквивалентной дозы гамма-излучения на открытой местности территории города Воронежа // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 66–71. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-66-71.
  28. Medeiros F.H.M., Yoshimura E.M. Influence of soil and buildings on outdoor gamma dose rates in Sao Paulo, Brazil // Health Physics. 2005. Vol. 88, No. 1. P. 65–70. DOI: 10.1097/01.hp.0000142499.92778.76.
  29. Ramzaev V., Bernhardsson C., Dvornik A. et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018 // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 214–215. P. 106168. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106168.
  30. Библин А.М., Ахматдинов Р.Р., Варфоломеева К.В., Репин Л.В. Проблемы риск-коммуникации по вопросам радиационной безопасности: анализ материалов в сети интернет после радиационной аварии на Электростальском заводе тяжелого машиностроения // Радиационная гигиена. 2018. Т. 11, № 1. С. 43–52. DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-43-52.
  - until 2016. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;210: 105812. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.09.010.
  23. Poltabtim W, Musikawan S, Thumwong A, Omori Y, Kranrod C, Hosoda M, et al. Estimation of ambient dose equivalent rate distribution map using walking survey technique in Hirosaki City, Aomori, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(3): 2657. DOI: 10.3390/ijerph20032657.
  24. Altfelder S, Preugschat B, Matos M, Kandzia F, Wiens B, Eshmuradov O, et al. Upscaling ground-based backpack gamma-ray spectrometry to spatial resolution of UAV-based gamma-ray spectrometry for system validation. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024;273: 107382. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107382.
  25. Nowak K, Solecki A. Factors affecting background gamma radiation in the urban space. *Journal of Elementology*. 2015;20(3): 653–665. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.4.755.
  26. Nowak K. Natural background gamma radiation in the urban space of Walbrzych. *Proceedings of ECOpole*. 2016;10(1): 47–56. DOI: 10.2429/proc.2016.10(1)006.
  27. Chubirko MI, Klepikov OV, Kurolap SA, Kuzmichev MK, Studenikina EM. Estimation of the equivalent dose rate of gamma radiation in the open territory of the city of Voronezh. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(4): 66–71. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-4-66-71.
  28. Medeiros FHM, Yoshimura EM. Influence of soil and buildings on outdoor gamma dose rates in Sao Paulo, Brazil. *Health Physics*. 2005;88(1): 65–70. DOI: 10.1097/01.hp.0000142499.92778.76.
  29. Ramzaev V, Bernhardsson C, Dvornik A, Barkovsky A, Vodovatov A, Jönsson M, et al. Calculation of the effective external dose rate to a person staying in the resettlement zone of the Vetka district of the Gomel region of Belarus based on *in situ* and *ex situ* assessments in 2016–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;214–215: 106168. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106168.
  30. Biblin AM, Akhmatdinov RR, Varfolomeeva KV, Repin LV. Problems of risk communication on radiation safety. analysis of materials on the internet after the 2013 radiation accident at the Electrostal heavy engineering works. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2018;11(1): 43–52. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2018-11-1-43-52.

Поступила: 02.03.2025

Received: March 02, 2025

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

**Барковский Анатолий Николаевич** – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

**Для цитирования:** Рамзаев В.П., Барковский А.Н. Измерение эффективной удельной активности природных радионуклидов *in situ* для оценки мощности амбиентного эквивалента дозы в городской среде // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 109–121. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-109-121

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

**Anatoly N. Barkovsky** – Head of the Federal Radiological Centre, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

**For citation:** Ramzaev V.P., Barkovsky A.N. Measurement of effective activity concentration of natural radionuclides *in situ* for assessment of ambient dose equivalent rate in urban environments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No 2. P. 109–121. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-109-121



## Оптимизация радиационной защиты в радионуклидной терапии: предложения по разработке программ обеспечения качества

Лихачева А.В.<sup>1,2</sup>, Водоватов А.В.<sup>1,3</sup>, Чипига Л.А.<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Городская больница № 40 Курортного района, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А.М. Гранова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

*С целью обеспечения качественного и безопасного терапевтического процесса в радионуклидной терапии недостаточно проведения контроля в рамках производственного контроля за безопасностью. Должны проводиться мероприятия в рамках системы обеспечения качества, установленные в программе обеспечения качества. Целью работы стало определение требований к программе обеспечения качества в радионуклидной терапии и ее содержанию с точки зрения обеспечения радиационной безопасности пациента, персонала, населения и окружающей среды. В работе рассматриваются подходы к разработке программы обеспечения качества в радионуклидной терапии как инструмента оптимизации радиационной защиты пациентов, персонала и населения. Предлагаемое содержание программы обеспечения качества охватывает все этапы радионуклидной терапии: от идентификации пациента и контроля качества радиофармацевтических лекарственных препаратов до оценки эффективности терапии и обеспечения безопасности на всех уровнях. Особое внимание уделяется необходимости контроля оборудования, параметров визуализации, обращения с биологическими отходами, проведению инструктажа при выписке, а также планированию радионуклидной терапии под дозиметрическим контролем с целью оптимизации радиационной защиты пациента. Программа обеспечения качества в радионуклидной терапии предлагается как основа для построения стандартизированной, безопасной и эффективной системы обеспечения качества, гармонизированной с международными подходами, нацеленная в первую очередь на персонализированные подходы к планированию и проведению радионуклидной терапии.*

**Ключевые слова:** ядерная медицина, радионуклидная терапия, программа обеспечения качества, радиационная безопасность.

### Введение

Радионуклидная терапия (РНТ) подразумевает использование радиоактивных соединений в виде радиофармацевтического лекарственного препарата (РФЛП) для воздействия на опухолевые клетки высокими дозами ионизирующего излучения путем локального подведения радионуклида или его носителя к опухолевым клеткам. В РНТ используют РФЛП, как правило, состоящие из альфа- или бета-излучающих радионуклидов в сочетании с молекулами-мишенями, которые вводятся пациенту внутривенно для доставки излучения непосредственно в очаги заболевания или рядом с ними [1, 2]. РНТ представляет собой достаточно новый и быстро развивающийся

метод терапии с применением открытых источников ионизирующего излучения, который подразумевает специфические требования к обеспечению радиационной безопасности пациента, персонала и населения [3, 4]. На сегодняшний день требования к радиационной безопасности при проведении РНТ регламентированы в СанПиН 2.6.1.2368—08<sup>1</sup>. Однако данный документ преимущественно содержит требования к объектам проведения радионуклидной терапии и радиационной защите персонала и населения. Аспекты обеспечения радиационной безопасности пациентов в нем практически не отражены.

Для обеспечения качественного и безопасного терапевтического процесса невозможно ограничиться только проведением производственного радиационного контроля

<sup>1</sup> 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: Rosпотребнадзор; 2008. 99 p. (In Russ.)]

**Лихачева Анастасия Валерьевна**

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: nastya.petryakova@gmail.com

в рамках действующих обязательных требований, представленных в действующих санитарных правилах и нормах<sup>2</sup>. Необходимо проводить контроль качества основного и вспомогательного оборудования, проводить оценку поглощенных доз в органах пациентов, проводить оптимизацию радиационной защиты персонала, пациента и населения. Это может быть реализовано в рамках системы обеспечения качества (ОК) при проведении процедур РНТ в медицинской организации. Система ОК представляет собой комплекс мер, направленных на безопасность, эффективность и стандартизированное выполнение всех этапов проведения РНТ [2,5,6]. В Российской Федерации ОК проводимых процедур как способ оптимизации радиационной защиты пациента представлены в ОСПОРБ-99/2010 и СанПиН 2.6.1.2891-11<sup>3</sup>. Согласно данным документам, в медицинской организации должно поддерживаться качество исследования и, соответственно, терапевтической процедуры, а также должна быть разработана программа обеспечения качества (ПОК). Однако сведения об ОК и содержании ПОК представлены тезисно без детализации требований и наполнения. ПОК в РНТ должна представлять собой системный документ, который должен охватывать все этапы подготовки и проведения РНТ, включая радиационные, технические, медицинские и организационные аспекты. Можно выделить две основные схемы проведения РНТ, на основании применения которых будет строиться система ОК:

Схема 1 – РНТ проводится с заранее установленной активностью радионуклида в РФЛП (без проведения пред- и пост-терапевтических процедур визуализации).

Схема 2 – перед введением терапевтического РФЛП проводится диагностическое обследование, количественная оценка накопления и планирование РНТ (оценка планируемой поглощенной дозы в целевых и критических органах и тканях, расчет вводимой терапевтической активности) путем введения пред-терапевтической дозы РФЛП или терапевтической пары с помощью методов визуализации (однотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) или позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ)). После чего проводится первое введение РФЛП, верификация накопленной активности и поглощенной дозы, а также оптимизация плана РНТ (изменение вводимой активности, количества введений за курс) с помощью методов визуализации.

**Цель исследования** – определение требований к ПОК в РНТ и ее содержанию с точки зрения обеспечения радиационной безопасности пациента, персонала, населения и окружающей среды.

## Требования к ПОК

Определение требований к ПОК в РНТ и ее содержанию основано на рекомендациях к содержанию ПОК в ядерной медицине, представленных в отечественных и международных документах, как правило, для радионуклидной диагностики (РНД). В соответствии с международными [7, 8] и отечественными документами<sup>4</sup> ПОК в ядерной медицине и, в частности, в РНТ должна включать в себя следующие разделы: контроль проведения РНТ; контроль РФЛП; контроль оборудования, включая диагностическое, вспомогательное и измерительное оборудование; контроль параметров изображения; контроль за радиационной безопасностью, включая радиационную безопасность пациентов, персонала и населения.

ПОК должна быть разработана медицинской организацией и утверждена руководителем. Рекомендуются не реже одного раза в пять лет пересматривать и актуализировать ПОК. Наличие и выполнение ПОК целесообразно контролировать в рамках внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности<sup>5</sup>.

## Контроль проведения РНТ

### Идентификация пациента

Процесс ОК начинается с этапа регистрации и достоверной идентификации пациента. Для проверки личности пациента перед проведением процедуры РНТ пациенту (или его представителю) необходимо заполнить форму. Необходимо проверить соответствие направления и паспортных данных пациента, исключить возможную беременность у пациенток (в некоторых случаях целесообразно выполнять экспресс-анализ на беременность перед введением РФЛП), уточнить у пациентки, не является ли она кормящей матерью. Перед введением РФЛП врач проверяет выполнение предписанных подготовительных назначений, инструктирует пациента относительно его поведения до, в ходе процедуры и после нее, имея в виду снижение дозовой нагрузки на самого больного, на персонал и отдельных лиц из населения.

### Контроль эффективности лечения и возникновения побочных эффектов

Контроль эффективности лечения и возникновения побочных эффектов проводятся согласно инструкции к применению РФЛП, клиническим рекомендациям или методикам проведения РНТ с данным РФЛП в медицинской организации.

<sup>2</sup> 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.)].

<sup>3</sup> СанПиН 2.6.1.2891-11 Требования радиационной безопасности при производстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации (утилизации) медицинской техники, содержащей источники ионизирующего излучения, 2011 [Sanitary Regulations and Standards 2.6.1.2891-11 Radiation safety requirements for the production, operation and decommissioning (disposal) of medical equipment containing sources of ionizing radiation, 2011 (In Russ.)].

<sup>4</sup> МУК 2.6.7.3651-20 «Методы контроля качества в ПЭТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты». Методические указания. М.: Роспотребнадзор, 2020. [MUK 2.6.7.3651-20 "Quality control methods in PET diagnostics for optimization of radiation protection". Rospotrebnadzor, 2020 (In Russ.)].

<sup>5</sup> Приказ Министерства здравоохранения РФ от 31 июля 2020 г. № 785н «Об утверждении Требований к организации и проведению внутреннего контроля качества и безопасности медицинской деятельности» [Order of the Ministry of Health of the Russian Federation dated July 31, 2020 No. 785n "On approval of the Requirements for the organization and implementation of internal quality control and safety of medical activities" (In Russ.)].

*Контроль оформления документов*

Все этапы проведения РНТ должны быть оформлены документально в установленном порядке. Установленные формы журналов, протоколов, контрольных листов и прочего приводятся в приложениях к ПОК.

*Контроль вводимой активности радионуклида и РФЛП (введение правильной активности и правильного РФЛП)*

Перед введением РФЛП медсестре необходимо повторно идентифицировать пациента, проверить правильность вводимого РФЛП и активность радионуклида согласно назначению и сверить с информацией в назначении РНТ; заполнить протокол проведения РНТ, который содержит информацию о пациенте, времени введения, введенном РФЛП и активности радионуклида, способе введения.

**Контроль РФЛП***Контроль качества синтезированных РФЛП*

В организациях, в которых проводится изготовление РФЛП, обеспечивается контроль изготовленного РФЛП. Для каждого РФЛП разрабатывают и утверждают в установленном порядке перечень документов, регламентирующих изготовление РФЛП, а также инструкция по медицинскому применению препарата.

Контроль РФЛП включает в себя проверку критических параметров и условий в процессе изготовления РФЛП, отбора проб для анализа, а также проведение процедур контроля параметров в соответствии с документами, регламентирующими изготовление РФЛП, документальное оформление выполненных процедур, проверку окончательной упаковки готовой продукции на соответствие санитарно-эпидемиологическим требованиям и выдачу разрешения на выпуск. Объем и процедуры контроля РФЛП определяются документами, регламентирующими изготовление РФЛП.

*Входной контроль качества РФЛП (для РФЛП от поставщика)*

При передаче/получении РФЛП к нему прилагают паспорт, инструкцию по медицинскому применению и оформляют акт приема-передачи. В паспорте на РФЛП указывают следующие данные: наименование РФЛП, номер, серия, объем и объемная активность фасовки на время паспортизации.

Во время входного контроля РФЛП также должна быть выполнена процедура количественного определения активности радионуклида в партии РФЛП и результат сопоставлен со значением в паспорте на дату изготовления.

**Контроль оборудования***Контроль диагностического, вспомогательного и измерительного оборудования*

При проведении РНТ часто требуется проведение процедур пред- и пост-терапевтической визуализации (согласно схеме 2), поэтому ПОК в РНТ может содержать также требования к диагностическому оборудованию, что требует гармонизации с подходами к обеспечению качества

при РНД. Поскольку в РНТ применяется оборудование для РНД, могут быть использованы рекомендации к проведению контроля диагностического, вспомогательного и измерительного оборудования, представленные в МУК 2.6.7.3651-20 и методических рекомендациях «Обеспечение и контроль качества исследований в радионуклидной диагностике»<sup>6</sup>.

Специфической процедурой для РНТ является определение калибровочного коэффициента для каждого используемого радионуклида [9] как в составе терапевтической пары, так и в составе терапевтического РФЛП в случае использования одного радионуклида для терапии и диагностики.

*Контроль параметров изображения*

Количественная оценка накопления РФЛП в организме пациента зависит от параметров протоколов сбора данных и реконструкции, которые используются во время получения ОФЭКТ-изображения, поэтому важно подбирать параметры протоколов в соответствии с клинической задачей [10]. Кроме того, важно оценивать качество диагностического изображения [11, 12].

**Радиационная защита населения***Радиационный контроль пациента при выписке*

Пациенты, проходящие курс РНТ, могут быть выписаны из медицинской организации при условии, что уровень гамма- и рентгеновского излучения, испускаемого из тела, удовлетворяет требованиям п. 5.4.5 НРБ-99/2009. Выписка пациента после РНТ допускается, если введенная или остаточная активность радионуклидов в теле и измеренная мощность дозы на расстоянии 1 метр от тела пациента и 1 метр от пола не превышает установленных радиологических критериев выписки. При этом критерии выписки могут быть установлены с учетом выведения РФЛП из организма пациента и без учета выведения, исходя только из периода полураспада радионуклида [13, 14]. Критерии выписки пациента устанавливаются на основании требований НРБ-99/2009<sup>7</sup>. Выписка пациента должна осуществляться по наиболее консервативному сценарию.

*Проведение инструктажа пациента при выписке*

Перед выпиской пациентам следует дать письменные и устные инструкции относительно мер предосторожности, которые они должны принимать для того, чтобы защитить от облучения членов семьи и других лиц, с которыми они могут вступать в контакт.

Пациентам дается инструкция, разработанная в медицинской организации, по ограничению времени пребывания с окружающими людьми и мерам предосторожности для того, чтобы свести к минимуму облучение окружающих людей. Инструкция должна содержать: ограничения по времени и расстоянию при контакте с окружающими людьми, в особенности с маленькими детьми и беременными женщинами, ограничения по использованию общественного транспорта, гигиенические рекомендации по использованию отдельной посуды и сантехники и др. Кроме того, пациент должен быть информирован о возможных побочных эффектах от РФЛП.

Пациент или его представитель должен в письменной форме подтвердить получение инструкций до того, как он будет выписан из отделения РНТ.

<sup>6</sup> Обеспечение и контроль качества исследований в радионуклидной диагностике: Методические рекомендации. М.; СПб.: Издательство ПХГА, 2023. 110 с. [Guidelines "Quality assessment and quality control of the examinations in radionuclide diagnostics". Moscow; St. Petersburg: RKHGA publishing house; 2023. 110 p. (In Russ.)].

<sup>7</sup> СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности. [Norms of the Radiation Safety NRB-99/2009 (In Russ.)].

Пациенты после РНТ также должны знать, что они могут вызвать срабатывание детекторов на границах, в аэропортах, в городах или по месту работы в течение нескольких недель или месяцев после лечения. Пациенту необходимо иметь официальную справку, содержащую соответствующую информацию о лечении (в случае необходимости).

#### Обращение с биологическими отходами пациента

Подходы к обращению с биологическими отходами пациента после РНТ и проведению радиационного контроля сточных вод представлены в предыдущих работах авторов [15–18]. Обращение с биологическими отходами пациента осуществляется путем организации спецканализации согласно СанПиН 2.6.1.2368—08 или системы сбора и выдержки биологических отходов пациента на распад [15–18]. При этом должен осуществляться радиационный контроль, в том числе сточных вод медицинской организации.

### Радиационная защита персонала

#### Радиационный контроль

При работе персонала с источниками ионизирующего излучения должен проводиться регулярный контроль индивидуальных доз персонала и мониторинг мощности дозы на рабочих местах. Кроме того, на рабочих местах персонала должен проводиться регулярный контроль загрязнения рабочих поверхностей и одежды персонала, в особенности при работе с альфа- и бета-излучающими радионуклидами. Периодичность и методики ин-

дивидуального дозиметрического контроля и контроля загрязнения поверхностей должны быть отражены в ПОК.

#### Обеспечение квалификации и обучения персонала

Допуск персонала к работе с открытыми источниками ионизирующего излучения должен осуществляться при наличии необходимой квалификации и документов, подтверждающих квалификацию. Персонал на протяжении работы должен проходить обучение и аттестацию по радиационной безопасности и обучаться новым методикам работы. Периодичность прохождения обучения и аттестации должны быть отражены в ПОК.

### Радиационная защита пациента

#### Планирование РНТ под дозиметрическим контролем

Основополагающим принципом лучевой терапии и РНТ, в частности, является связь между поглощенной дозой излучения и радиобиологическим эффектом [1, 2]. Токсичность в РНТ будет зависеть от поглощенной дозы, полученной критическими органами и тканями, а эффективность лечения – от поглощенной дозы, полученной злокачественными тканями (целевыми органами и тканями) [8]. Однако РНТ часто проводится без визуализации и дозиметрии [2].

Упрощенный подход к включению планирования РНТ под дозиметрическим контролем показан на рисунке.



**Рис.** Схема, описывающая подходы к планированию лечения на основе дозиметрии. Адаптировано из [19]  
**[Fig.]** Schematic describing dosimetry-based treatment planning approaches. Adapted from [19]

На этапе доклинических испытаний определяются максимальная поглощенная доза путем ее увеличения до достижения токсичности и критические органы, для которых должна определяться поглощенная доза при опреде-

ленной введенной активности, соответствующей максимальной токсичности. На этапе I фазы клинических испытаний вводимая активность радионуклида определяется при помощи пред-терапевтической визуализации для по-



лучения данных о фармакокинетике РФЛП и расчета поглощенной дозы в критических органах. Вводимая активность, необходимая для достижения предписанной поглощенной дозы, на данном этапе рассчитывается для каждого пациента. При этом, если анализ показывает, что преимущество планирования РНТ под дозиметрическим контролем минимально для данного РФЛП и популяции пациентов, то может быть использован

1 уровень планирования, при котором пациенту вводят фиксированное значение активности. Всего определяют 3 уровня планирования РНТ под дозиметрическим контролем, которые описаны в работах [8, 20].

В таблице 1 представлены характеристики, определяемые при планировании РНТ, характерные для уровней планирования.

Таблица 1

## Характеристики, определяемые при планировании РНТ

[Table 1]

## Characteristics to be determined during radionuclide therapy planning

| №<br>п/п | Характеристика<br>[Characteristics]                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Уровень 1<br>[Level 1] | Уровень 2<br>[Level 2] | Уровень 3<br>[Level 3] |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1        | Предписанная поглощенная доза основана на доступных показателях (индекс массы тела, площадь поверхности тела и т.д.), вводимая активность определяется согласно листку-вкладышу к РФЛП<br>[The prescribed absorbed dose is based on available parameters (body mass index, body surface area, etc.), the administered activity is determined according to the radiopharmaceutical drug insert]                                      | +                      | –                      | –                      |
| 2        | Проведение РНТ под дозиметрическим контролем (вводимая активность определяется/корректируется исходя из поглощенной дозы в целевом органе)<br>[Dosimetry-guided radionuclide therapy (administered activity is determined/corrected based on the absorbed dose in the target organ)]                                                                                                                                                | –                      | +                      | –                      |
| 3        | Вводимая активность определяется исходя из баланса между контролем над опухолью и вероятностью развития осложнений в критических органах<br>[The administered activity is determined based on a balance between tumor control and the likelihood of developing complications in critical organs]                                                                                                                                    | –                      | –                      | +                      |
| 4        | Пост-терапевтическая количественная визуализация (оценка накопленной активности) – контроль эффективности лечения и оптимизация плана РНТ (изменение вводимой активности, количества введений за курс)<br>[Post-therapeutic quantitative imaging (assessment of accumulated activity) – monitoring of treatment efficacy and optimization of the treatment plan (change of administered activity, number of injections per course)] | +/-                    | +                      | +                      |

В ПОК должны быть определены: уровень планирования, критические органы, предписываемая поглощенная доза в целевых органах и максимальная поглощенная доза в критических органах.

## Контроль доз и регистрация дозовых величин

На всех уровнях планирования РНТ должны регистрироваться и контролироваться: вводимые активности радионуклида в РФЛП в соответствии с клиническими рекомендациями и инструкциями по применению РФЛП и поглощенные дозы в органах. На уровне 1 поглощенные дозы в органах определяются путем применения коэффициентов перехода от вводимой активности к поглощенной дозе. На уровне 2 значения поглощенных доз в органах должны определяться посредством визуализации и расчета интегрированной по времени активности в органе [21, 22]. Поглощенные

дозы в органах должны быть сопоставлены с толерантными дозами для данных органов. На уровне 3 необходима более детальная оценка радиобиологических эффектов: построение гистограмм доза-объем в органе-мишени; определение биологических эффективных доз, расчет показателей, характеризующих контроль над опухолью [15, 21].

Кроме того, при проведении диагностических процедур при проведении РНТ должны регистрироваться и контролироваться эффективные дозы. Эффективные дозы от диагностических процедур подлежат регистрации в 3-ДОЗ и системе ЕСКИД.

## Элементы ПОК

Рекомендуемые элементы, которые должны быть отражены в ПОК в отделении РНТ, приведены в таблице 2.

## Рекомендуемые элементы ПОК

[Table 2]

## Recommended parts of quality assurance program]

| №<br>п/п | Элемент ПОК<br>[Parts of quality assurance program]                                                                                     | Схема 1<br>[Shema 1] | Схема 2<br>[Shema 2] |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1        | Контроль проведения РНТ [Control of the radionuclide therapy conducting]                                                                |                      |                      |
| 1.1      | Идентификация пациента [Patient identification]                                                                                         | +                    | +                    |
| 1.2      | Контроль возникновения побочных эффектов<br>[Control of the occurrence of side effects]                                                 | +                    | +                    |
| 1.3      | Контроль оформления документов [Control of document execution]                                                                          | +                    | +                    |
| 1.4      | Контроль эффективности лечения [Control of the effectiveness of treatment]                                                              | –                    | +/-                  |
| 1.5      | Контроль вводимой активности радионуклида и РФЛП<br>[Control of radionuclide activity administered]                                     | +                    | +                    |
| 2        | Контроль РФЛП [Quality control of radiopharmaceuticals]                                                                                 | +                    | +                    |
| 3        | Контроль оборудования [Quality control of the equipment]                                                                                |                      |                      |
| 3.1      | Контроль диагностического, вспомогательного и измерительного оборудования<br>[Control of diagnostic, auxiliary and measuring equipment] | –                    | +                    |
| 3.2      | Контроль параметров изображения [Image quality control]                                                                                 | –                    | +                    |
| 4        | Радиационная защита населения [Radiation protection of the public]                                                                      |                      |                      |
| 4.1      | Радиационный контроль пациента при выписке<br>[Radiation monitoring of the patient before release]                                      | +                    | +                    |
| 4.2      | Проведение инструктажа пациента при выписке<br>[Providing patient instructions before release]                                          | +                    | +                    |
| 4.3      | Обращение с биологическими отходами пациента<br>[Management of patient's biological waste]                                              | +                    | +                    |
| 5        | Радиационная защита персонала [Radiation protection of the staff]                                                                       |                      |                      |
| 5.1      | Радиационный контроль [Radiation monitoring]                                                                                            | +                    | +                    |
| 5.2      | Обеспечение квалификации и обучения персонала<br>[Ensuring staff qualification and training]                                            | +                    | +                    |
| 6        | Радиационная защита пациента [Radiation protection of the patient]                                                                      |                      |                      |
| 6.1      | Планирование РНТ под дозиметрическим контролем<br>[Dosimetry-guided planning of radionuclide therapy]                                   | –                    | +                    |
| 6.2      | Контроль доз и регистрация дозовых величин [Dose monitoring and recording]                                                              | +                    | +                    |

## Заключение

Применение ПОК является ключевым инструментом для системной реализации принципов радиационной безопасности в РНТ и должна разрабатываться с учётом специфики схем терапии, используемых РФЛП и дозиметрического планирования, обеспечивая персонализированный подход к проведению РНТ. Соблюдение ПОК позволяет осуществлять непрерывный анализ и улучшение качества, а также проводить РНТ с соблюдением всех аспектов радиационной безопасности.

Главными элементами ПОК в РНТ являются контроль качества используемого оборудования и обеспечение дозиметрического планирования РНТ. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку подходов к планированию РНТ под дозиметрическим контролем.

Контроль за ОК осуществляет федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий функции по контролю и надзору в сфере охраны здоровья, что отражено

в проекте<sup>8</sup>. Дальнейшему анализу методов контроля за выполнением ПОК и распределению ответственности участников процесса будут посвящены следующие работы авторов.

Сведения о личном вкладе авторов  
в работу над статьей

Лихачева А.В. – определение цели, поиск и анализ литературы, написание текста, перевод.

Водоватов А.В. – анализ и интерпретация результатов, обсуждение и редактирование текста статьи.

Чипига Л.А. – определение цели, формулировка научных гипотез, обсуждение 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».

<sup>8</sup> Федеральный закон от 21.11.2011 N 323-ФЗ (ред. от 28.12.2024) «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации» [Federal State Low N 323-FZ dated 21.11.2011 (redaction 28.12.2024) "On the Fundamentals of Health Protection of Citizens in the Russian Federation" (In Russ.)].

## Литература

- International Atomic Energy Agency, Dosimetry for Radiopharmaceutical Therapy, Non-serial Publications, IAEA, Vienna, 2024. P. 150. DOI: 10.61092/iaea.xlzb-6h67.
- European Association of Nuclear Medicine, Radionuclide therapy management. EANM Technologists' guide. Vienna: EANM, 2022. DOI: DOI: 10.52717/CUUN1001.
- ICRP. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105 // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37, No 6.
- International Atomic Energy Agency; Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. SSG-46, 2018.
- Vyas M., Tafti D. Nuclear Medicine Quality Assurance. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK576382/> (Дата обращения: 04.04.2025).
- European Association of Nuclear Medicine. EANM Technologists Guide. Quality Control of Nuclear Medicine Instrumentation and Protocol Standardisation. Vienna: EANM, 2017.
- International Atomic Energy Agency, Quality Assurance for PET and PET/CT Systems, IAEA Human Health Series No. 1, IAEA, Vienna, 2009.
- World Health Organization. Quality Assurance in Nuclear Medicine. World Health Organization guide. Geneva: WHO, 1982. P. 72.
- Ramonaheng K., van Staden J.A., du Raan H. The effect of calibration factors and recovery coefficients on  $^{177}\text{Lu}$  SPECT activity quantification accuracy: a Monte Carlo study // European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging. 2021. Vol. 8, No 1. P. 27. DOI: 10.1186/s40658-021-00365-8.
- Чипига Л.А., Водоватов А.В., Катаева Г.В. и др. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в позитронно-эмиссионной томографии // Медицинская физика. 2019. Т. 82, № 2. С. 78-92.
- Петрякова А.В., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Смоляруч М.Я. Контроль качества при оптимизации радиационной защиты пациентов в радионуклидной диагностике // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16, № 3. С. 81-90. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-81-90.
- 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31.
- Chipiga L., Likhacheva A., Vodovатов A. et al. Harmonization of practice of release of patients after radiopharmaceutical therapy // Journal of Radiological Protection. 2025. Vol. 45, No 1. DOI: 10.1088/1361-6498/adba70.
- Sgouros G., Hobbs R.F. Dosimetry for radiopharmaceutical therapy // Seminars in Nuclear Medicine. 2014. Vol. 44, No 3. 172-178 pp. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2014.03.007.
- Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Важенина Д.А. и др. Методы дозиметрического планирования в радионуклидной терапии. Часть 2: уровни планирования // Лучевая диагностика и терапия. 2022. Т. 13, № 4. 16-26 сс. DOI: 10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26.
- Чипига Л.А., Водоватов А.В., Петрякова А.В. и др. Обоснование дифференцированного подхода к обращению с биологическими отходами пациентов в подразделениях ядерной медицины // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 34-44. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44.
- 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. DOI: 0.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
- Чипига Л.А., Петрякова А.В., Водоватов А.В. и др. Оценка содержания  $^{223}\text{Ra}$  в сточных водах канализационной системы медицинской организации во время проведения радионуклидной терапии с  $^{223}\text{Ra}$ -дихлоридом (Ксофиг®) // Онкоурология. 2024. Т. 20, № 3. С. 94-103. DOI: 10.17650/1726-9776-2024-20-3-94-103.
- Sgouros G., Bolch W.E., Chiti A. et al. ICRU REPORT 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy // Journal of the ICRU. 2021. Vol. 21, No 1. P. 1-212.
- Станжевский А.А., Майстренко Д.Н., Важенина Д.А. и др. Методы дозиметрического планирования в радионуклидной терапии. Часть 2: уровни планирования // Лучевая диагностика и терапия. 2022. Т. 13, № 4. С. 16-26. DOI: 10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26.
- Петрова А.Е., Чипига Л.А., Водоватов А.В. и др. Оценка поглощенных доз в органах пациентов от высвобожденного радионуклида-метки при проведении радионуклидной терапии с  $^{225}\text{Ac}$ . // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 1. С. 120-131. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-120-131.
- Чипига Л.А., Петрова А.Е., Водоватов А.В. и др. Определение органных доз внутреннего облучения пациентов при радионуклидной терапии  $^{223}\text{Ra}$  - дихлоридом. // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 4. С. 6-16. DOI: 0.21514/1998-426X-2020-13-4-6-16.

Поступила: 16.04.2025

**Лихачева Анастасия Валерьевна** – младший научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; инженер по радиационной безопасности Городской больницы № 40 Курортного района. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: [nastya.petryakova@gmail.com](mailto:nastya.petryakova@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-2663-9091

**Водоватов Александр Валерьевич** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; доцент кафедры общей гигиены Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета, Санкт-Петербург, Россия

ORCID: 0000-0002-5191-7535

**Чипига Лариса Александровна** – кандидат технических наук, старший 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

Для цитирования: Лихачева А.В., Водоватов А.В., Чипига Л.А. Оптимизация радиационной защиты в радионуклидной терапии: предложения по разработке программ обеспечения качества // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 2. С. 122–130. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-122-130

## Optimization of radiation protection in radionuclide therapy: Proposals for developing quality assurance programs

Anastasia V. Likhacheva<sup>1,2</sup>, Aleksandr V. Vodovатов<sup>1,3</sup>, Larisa A. Chipiga<sup>1,4,5</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> The City Hospital No 40 of the Kurortny District, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>4</sup> A. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

<sup>5</sup> Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

*In order to ensure a high-quality and safe therapeutic process in radionuclide therapy, it is not sufficient to rely solely on safety monitoring within the framework of production control. Measures must be implemented within a quality assurance system as established in the quality assurance program. The purpose of this work is to define the requirements for quality assurance program in radionuclide therapy in terms of the ensuring radiation safety for patients, staff, the public, and the environment. The work discusses approaches to developing a quality assurance program in radionuclide therapy as a tool for optimizing radiation protection for patients, medical staff, and the public. The proposed structure of the quality assurance program covers all stages of radionuclide therapy – from patient identification and radiopharmaceutical quality control to the evaluation of therapeutic efficacy and safety at all levels. Particular attention is given to the need for equipment monitoring, imaging parameter control, management of biological waste, patient instruction upon discharge, as well as dosimetry-guided radionuclide therapy planning aimed at optimizing patient radiation protection. The quality assurance program in radionuclide therapy is proposed as a foundation for building a standardized, safe, and effective quality assurance system aligned with international practices, with a primary focus on personalized approaches to the planning and delivery of radionuclide therapy.*

**Key words:** nuclear medicine, radionuclide therapy, quality assurance, quality assurance program, radiation safety.

### Authors' personal contribution

Likhacheva A.V. – determination of the aim of the study, search and analysis of literature, writing the text, translation.

Vodovатов A.V. – analysis and interpretation of the results, discussing and redacting the results.

Chipiga L.A. – determination of the aim of the study, formulation of the scientific conjectures, discussing the text of the article.

### Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

### Sources of funding

The work was performed as a part of the program of Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being “Development and scientific justification of a set of measures to ensure radiation protection in nuclear medicine”.

### References

1. International Atomic Energy Agency, Dosimetry for Radiopharmaceutical Therapy, Non-serial Publications, IAEA, Vienna; 2024. P. 150. DOI: 10.61092/iaea.xlzb-6h67.
2. European Association of Nuclear Medicine, Radionuclide therapy management. EANM Technologists' guide. Vienna: EANM; 2022. DOI: 10.52717/CUUN1001.
3. ICRP. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. *Annals of the ICRP*. 2007;37(6).
4. International Atomic Energy Agency; Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards Series No. SSG-46; 2018.
5. Vyas M, Tafti D. Nuclear Medicine Quality Assurance. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 Jan-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK576382/> (Accessed: 04.04.2025).
6. European Association of Nuclear Medicine. EANM Technologists Guide. Quality Control of Nuclear Medicine Instrumentation and Protocol Standardisation. Vienna: EANM; 2017.
7. International Atomic Energy Agency, Quality Assurance for PET and PET/CT Systems, IAEA Human Health Series No. 1, IAEA, Vienna; 2009.
8. World Health Organization. Quality Assurance in Nuclear Medicine. World Health Organization guide. Geneva: WHO; 1982. P. 72.
9. Ramonaheng K, van Staden JA, du Raan H. The effect of calibration factors and recovery coefficients on <sup>177</sup>Lu SPECT

**Anastasia V. Likhacheva**

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



- activity quantification accuracy: a Monte Carlo study. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2021;8(1): 27. DOI: 10.1186/s40658-021-00365-8.
10. Chipiga LA, Vodovatov AV, Kataeva GV, Ryzhkova DV, Dolgushin MB, Menkov MA, et al. Proposals of Quality Assurance in Positron Emission Tomography in Russia. *Meditsinskaya fizika = Medical Physics*. 2019;82(2): 78–92. (In Russian).
  11. Petryakova AV, Chipiga LA, Vodovatov AV, Smolyarchuk MYa. Equipment quality control during patient radiation protection optimisation in radionuclide diagnostics. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2023;16(3): 81–90. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-3-81-90.
  12. Chipiga LA, Zvonova IA, Vodovatov 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) DOI: 10.21514/1998-426X-2023-16-2-19-31.
  13. Chipiga L, Likhacheva A, Vodovatov A, Zvonova I, Stanzhevsky A, Vazhenina D, et al. Harmonization of practice of release of patients after radiopharmaceutical therapy. *Journal of Radiological Protection*. 2025;45(1). DOI: 10.1088/1361-6498/adba70.
  14. Sgouros G, Hobbs RF. Dosimetry for radiopharmaceutical therapy. *Seminars in Nuclear Medicine*. 2014;44(3): 172–178. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2014.03.007.
  15. Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, Vazhenina DA, Sysoev DS, Vodovatov AV, Chipiga LA, et al. Methods of dosimetry-based treatment planning in radiopharmaceutical therapy. Part 2: Planning levels. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2022;13(4): 16–26. (In Russian) DOI: 10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26.
  16. Chipiga LA, Vodovatov AV, Petryakova AV, Zvonova IA, Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, et al. Justification of differential approach to management of patient biological waste in nuclear medicine departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 34–44. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-34-44.
  17. Chipiga LA, Vodovatov 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) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-2-19-30.
  18. Chipiga LA, Petryakova AV, Vodovatov AV, Saprykin KS, Vazhenina DA, Stanzhevsky AA, et al. Estimation of <sup>223</sup>Ra in a sewage system of hospital during radiopharmaceutical therapy with <sup>223</sup>Ra dichloride (Xofigo®). *Cancer Urology*. 2024;20(3): 94–103. (In Russian) DOI: 10.17650/1726-9776-2024-20-3-94-103.
  19. Sgouros G, Bolch WE, Chiti A, Dewaraja YK, Emfietzoglou D, Hobbs RF, et al. ICRU REPORT 96, Dosimetry-Guided Radiopharmaceutical Therapy. *Journal of the ICRU*. 2021;21(1): 1–212.
  20. Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, Vazhenina DA, Sysoev DS, Vodovatov AV, Chipiga LA, et al. Methods of dosimetry-based treatment planning in radiopharmaceutical therapy. Part 2: Planning levels. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2022;13(4): 16–26. (In Russian) DOI: 10.22328/2079-5343-2022-13-4-16-26.
  21. Petrova AE, Chipiga LA, Vodovatov AV, Stanzhevsky AA, Maistrenko DN, Lumpov AA, et al. Estimation of absorbed doses in patients' organs from the released radionuclide-label during radionuclide therapy with <sup>225</sup>Ac. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(1): 120–131. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-120-131.
  22. Chipiga LA, Petrova AE, Vodovatov AV, Stanzhevsky AA, Lumpov AA, Lavreshov DD, et al. Patient organ and effective dose estimation in radionuclide therapy with <sup>223</sup>Ra -dichloride. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020;13(4): 6–16. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-4-6-16.

Received: April 16, 2025

**For correspondence: Anastasia V. Likhacheva** – Acting Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Radiation Safety Engineer, Saint Petersburg City Hospital No. 40 (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: nastya.petryakova@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-2663-9091

**Aleksandr V. Vodovatov** – Candidate of Biological Sciences, Head of Laboratory, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Docent, Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0002-5191-7535

**Larisa A. Chipiga** – Candidate of Engineering Sciences, Research Fellow, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; Research Fellow, A.M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies of the Ministry of Health of the Russian Federation; Docent, Almazov National Medical Research Centre of the Ministry of Health of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russia

ORCID: 0000-0001-9153-3061

**For citation: Likhacheva A.V., Vodovatov A.V., Chipiga L.A. Optimization of radiation protection in radionuclide therapy: Proposals for developing quality assurance programs. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No 2. P. 122–130. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-122-130.**

## Накопленные дозы пациентов при проведении КТ-исследований в российской клинической практике

Дружинина П.С.

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 условиях современной клинической практики многократные компьютерно-томографические исследования становятся все более распространенными, что может приводить к накоплению значительных доз облучения у пациентов. Целью данного исследования являлось выявление случаев высоких накопленных эффективных доз (свыше 100 мЗв) у взрослых пациентов, проходивших компьютерно-томографические исследования в двух отделениях Ленинградского областного клинического онкологического диспансера. Материалы и методы: Работа основывалась на анализе данных об эффективных дозах пациентов, полученных из журналов регистрации компьютерно-томографических исследований за периоды 2020–2021 гг. (отделение № 1) и 2019–2021 гг. (отделение № 2). Эффективные дозы были рассчитаны на основании значений DLP с применением соответствующих коэффициентов перехода в соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.3584-19. Результаты и обсуждение: Результаты показали, что в отделении № 1 1 % пациентов (18 человек) получили накопленные дозы свыше 100 мЗв, с максимальным значением в 239 мЗв. В отделении № 2 аналогичный показатель составил 0,3% (9 человек), с максимальной дозой 147 мЗв. Накопление дозы происходило как в течение длительного времени (до года), так и в течение коротких временных интервалов (менее месяца). Сопоставление полученных результатов с зарубежными данными показало, что накопленные эффективные дозы свыше 100 мЗв нередко выявляются и у неонкологических пациентов, включая пациентов моложе 40 лет. В исследуемой выборке преимущественно преобладали пациенты старше 40 лет. Обоснование и оптимизация КТ-исследований являются основными инструментами по управлению высокими накопленными эффективными дозами пациентов. Необходимо отметить важность оценки не только эффективной, но и поглощенных доз в органах при проведении многократных компьютерно-томографических исследований, особенно при планировании лучевой терапии. Заключение: Необходим системный мониторинг высоких накопленных эффективных доз пациентов в Российской Федерации, особенно для молодых пациентов.*

**Ключевые слова:** компьютерная томография, эффективные дозы, накопленные дозы.

### Введение

Нередко компьютерная томография (КТ) сопровождается высокими эффективными дозами облучения пациентов за одно исследование. По данным литературных источников эффективные дозы пациентов при проведении КТ в некоторых случаях могут превышать 100 мЗв за одно исследование [1].

В течение периода диагностики и лечения пациенты могут подвергаться проведению многократных КТ-исследований, в результате чего могут получать высокие накопленные эффективные дозы свыше 100 мЗв, а иногда и свыше 500 мЗв [2-3]. Одним из примеров данного явления может быть пациентка из г. Мальмо (Швеция), которая после 66 КТ-исследований и 138 рентгенограмм брюшной полости получила накопленную эффективную дозу около 810 мЗв [3]. Высокие накопленные эффективные дозы пациенты могут получать как в течении нескольких лет, так и за период госпитализации. При этом на данный момент неизвестно, являются ли высокие накопленные эффективные дозы широко распространенным явлением или ограничиваются отдельными клиническими случаями и небольшим числом медицинских учреждений.

По данным публикаций [4–13] область доз выше 100 мЗв уже не является областью малых доз. Согласно Публикации 103 МКРЗ [14] в этой области доз риск возникновения стохастических эффектов увеличивается вдвое на единицу дозы.

На сегодняшний день нет единого мнения о том, как следует оценивать риски пациентов, получающих накопленные эффективные дозы более 100 мЗв. При этом Национальная академия наук США [15] указывает, что следует придерживаться линейной беспороговой модели оценки риска, так как она считается более обоснованной при дозах свыше 100 мЗв. В 2018 году Национальный совет по радиационной защите и измерениям (англ. – National Council on Radiation Protection and Measurements) (NCRP) провел масштабный метаанализ исследований и пришел к выводу, что линейную беспороговую модель радиационного риска следует продолжать использовать в целях радиационной защиты [16]. Публикация [2] утверждает, что на сегодняшний день имеются данные, свидетельствующие о повышенном риске смертности от рака при эквивалентных дозах свыше 100 мЗв.

**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

Согласно пункту 7.10 СанПиН 2.6.1.1192-03<sup>1</sup> «при достижении накопленной дозы медицинского диагностического облучения пациента 500 мЗв должны быть приняты меры по дальнейшему ограничению его облучения, если лучевые процедуры не диктуются жизненными показаниями».

Проведение многократных КТ-исследований предположительно наиболее характерно для пациентов с обширными травмами, с различными хроническими заболеваниями, со злокачественными новообразованиями и др. [17, 18–23]. Пациенты со злокачественными новообразованиями могут дополнительно подвергаться повторным КТ-сканированиям при планировании лучевой терапии [24–26]. Ряд зарубежных исследований отмечают важность учета поглощенных доз в органах при многократных диагностических КТ-исследованиях для дальнейшего планирования лучевой терапии [27–32].

В Российской Федерации мониторинг накопленных доз пациентов отсутствует. Учет накопленных доз еще затрудняется тем, что пациенты часто проходят КТ-исследования не в одной медицинской организации. На сегодняшний день для Российской Федерации остаются актуальными вопросы о том, насколько в отечественной медицинской практике распространены высокие накопленные дозы при проведении КТ-исследований, необходимо ли эти накопленные дозы контролировать и если да, то при каких патологиях и в каких возрастных группах пациентов.

**Цель исследования** – выявление высоких накопленных эффективных доз (свыше 100 мЗв) взрослых пациентов, проходивших КТ-исследования, в двух отделениях Ленинградского областного клинического онкологического диспансера (ЛОКОД).

### Материалы и методы

В данной работе под высокими накопленными эффективными дозами подразумеваются дозы более 100 мЗв.

Исследование проведено на базе двух отделений Ленинградского областного клинического онкологического диспансера, расположенных на Литейном проспекте

г. Санкт-Петербурга (отделение № 1) и в поселке Кузьмолово Ленинградской области (отделение № 2). В обоих КТ-отделениях были проанализированы журналы регистрации доз пациентов, содержащие в себе информацию об индивидуальных эффективных дозах пациентов, проходивших КТ-исследования. В отделении № 1 были проанализированы данные за временной промежуток с начала 2020 года по конец 2021 года. За этот период в данном КТ-отделении было проведено 2328 КТ-исследований 2065 пациентам. В отделении № 2 были проанализированы данные за временной промежуток с конца 2019 года по начало 2021 года. За этот период в данном КТ-отделении было проведено 3668 КТ-исследований 3334 пациентам. Из данных дозового отчета каждого проведенного КТ-исследования была получена информация о величине произведения дозы на длину сканирования (DLP). Далее были рассчитаны индивидуальные эффективные дозы за одно КТ-исследование для каждого пациента с использованием коэффициентов перехода от значений DLP к эффективной дозе согласно методике, представленной в МУ 2.6.1. 3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-19 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований»<sup>2</sup>.

Для определения накопленных эффективных доз были выявлены пациенты, проходившие более одного КТ-исследования за исследуемый период. Накопленная эффективная доза определялась, как сумма эффективных доз за все КТ-исследования, которые проходил пациент за исследуемый период.

### Результаты

В отделении № 1 среди всех пациентов, прошедших КТ-исследования, были выявлены 18 пациентов (1 % от числа всех пациентов), получивших накопленную эффективную дозу более 100 мЗв за исследованный период. Накопленные эффективные дозы (более 100 мЗв) для этих пациентов, представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Накопленные эффективные дозы (свыше 100 мЗв) пациентов, проходивших КТ-исследования в отделении № 1 с 2020 по 2021 год**

[Table 1]

**Patients' cumulative effective doses (more than 100 mSv) during CT-examinations in medical department No. 1 from 2020 to 2021**

| Временной промежуток<br>[Time interval]           | Пациент<br>[Patient] | Возраст<br>[Age] | КТ-исследование<br>[CT-examination]               | Эфф. доза, мЗв<br>[Effective dose, mSv] | Накоп. доза, мЗв<br>[Cumulative dose, mSv] |
|---------------------------------------------------|----------------------|------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Август 2020-март 2021<br>[August 2020-March 2021] | П1<br>[P1]           | 62               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen] | 40                                      | 159                                        |
|                                                   |                      |                  | Брюшная полость+таз<br>[Abdomen+pelvis]           | 22,6                                    |                                            |
|                                                   |                      |                  | Брюшная полость<br>[Abdomen]                      | 20,2                                    |                                            |
|                                                   |                      |                  | Брюшная полость<br>[Abdomen]                      | 18,6                                    |                                            |
|                                                   |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen] | 56,7                                    |                                            |

<sup>1</sup> Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 18.02.2003 N 8 «О введении в действие СанПиН 2.6.1.1192-03» (вместе с СанПиН 2.6.1.1192-03. 2.6.1. «Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Санитарные правила и нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 14.02.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.03.2003 N 4282) [SanPiN 2.6.1.1193-03 "Hygienic requirements on the contents and use of the X-ray rooms, X-ray units and conduction of the X-ray examinations. Sanitary rules and norms". Approved by the Chief State sanitary doctor of the Russian Federation 14.02.2003. Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 19.03.2003 N 4282 (In Russ.)].

<sup>2</sup> МУ 2.6.1. 3584-19 «Изменения в МУ 2.6.1.2944-19 «Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований» [MU 2.6.1. 3584-19 "Amendments to MU 2.6.1.2944-19 "Control of effective doses of radiation to patients during medical X-ray examinations" (In Russ.)].

## Краткие сообщения

Продолжение таблицы 1

| Временной промежуток<br>[Time interval]                 | Пациент<br>[Patient] | Возраст<br>[Age] | КТ-исследование<br>[CT-examination]                                                 | Эфф. доза, мЗв<br>[Effective dose, mSv] | Накоп. доза, мЗв<br>[Cumulative dose, mSv] |
|---------------------------------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Октябрь 2020-апрель 2021<br>[October 2020 – April 2021] | П2<br>[P2]           | 69               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 25,8                                    | 104                                        |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 16,2                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 28,8                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 32,7                                    |                                            |
| Февраль-апрель 2021<br>[February-April 2021]            | П3<br>[P3]           | 62               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 29,9                                    | 174                                        |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 28,4                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 39,6                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 42,4                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 33,3                                    |                                            |
| Август-декабрь 2020<br>[August-December 2020]           | П4<br>[P4]           | 67               | Грудная клетка<br>[Chest]                                                           | 17,2                                    | 122                                        |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 62,9                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 28,1                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 13,8                                    |                                            |
| Сентябрь 2020-март 2021<br>[September 2020-March 2021]  | П5<br>[P5]           | 70               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 27,2                                    | 143                                        |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 17,8                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 27,8                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Брюшная полость+таз<br>[Abdomen+pelvis]                                             | 31,4                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 39                                      |                                            |
| Март 2020-март 2021<br>[March 2020-March 2021]          | П6<br>[P6]           | 47               | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 52,6                                    | 116                                        |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 62,9                                    |                                            |
| Февраль-март 2021<br>[February-March 2021]              | П7<br>[P7]           | 76               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 47,7                                    | 181                                        |
|                                                         |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 45,6                                    |                                            |
|                                                         |                      |                  | Головной мозг+грудная<br>клетка+брюшная полость+таз<br>[Brain+chest+abdomen+pelvis] | 88,1                                    |                                            |
| Январь-февраль 2021<br>[January-February 2021]          | П8<br>[P8]           | 72               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 13,8                                    | 119                                        |
|                                                         |                      |                  | Головной мозг+грудная<br>клетка+брюшная полость+таз<br>[Brain+chest+abdomen+pelvis] | 104,8                                   |                                            |



## Brief reports

Продолжение таблицы 1

| Временной промежуток<br>[Time interval]                   | Пациент<br>[Patient] | Возраст<br>[Age] | КТ-исследование<br>[CT-examination]                                                 | Эфф. доза, мЗв<br>[Effective dose, mSv] | Накоп. доза, мЗв<br>[Cumulative dose, mSv] |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------|
| Апрель 2021<br>[April 2021]                               | П9<br>[P9]           | 71               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 56,5                                    | 133                                        |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 76,6                                    |                                            |
| Октябрь-декабрь 2021<br>[October-December 2021]           | П10<br>[P10]         | 60               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 39,8                                    | 239                                        |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 55                                      |                                            |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 74                                      |                                            |
|                                                           |                      |                  | Брюшная полость<br>[Abdomen]                                                        | 18                                      |                                            |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 52,4                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 78,6                                    |                                            |
| Март-апрель 2021<br>[March-April 2021]                    | П11<br>[P11]         | 60               | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 29,5                                    | 202                                        |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 93,6                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Головной мозг+грудная<br>клетка+брюшная полость+таз<br>[Brain+chest+abdomen+pelvis] | 39,2                                    |                                            |
| Сентябрь 2020-март<br>2021<br>[September 2020-March 2021] | П12<br>[P12]         | 60               | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 17,7                                    | 189                                        |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 17,8                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 44,3                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Головной мозг+грудная<br>клетка+брюшная полость+таз<br>[Brain+chest+abdomen+pelvis] | 69,7                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 17,1                                    |                                            |
| Февраль-апрель 2021<br>[February-April 2021]              | П13<br>[P13]         | 67               | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 25,9                                    | 130                                        |
|                                                           |                      |                  | Брюшная полость+таз<br>[Abdomen+pelvis]                                             | 15,6                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Брюшная полость+таз<br>[Abdomen+pelvis]                                             | 15                                      |                                            |
|                                                           |                      |                  | Грудная клетка+брюшная по-<br>лость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                   | 49,1                                    |                                            |
|                                                           |                      |                  | Брюшная полость                                                                     | 7,5                                     |                                            |
|                                                           |                      |                  | Головной мозг+грудная<br>клетка+брюшная полость<br>[Brain+chest+abdomen+pelvis]     | 102,3                                   |                                            |
| Март 2021<br>[March 2021]                                 | П14<br>[P14]         | 75               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                   | 48,2                                    | 151                                        |

## Краткие сообщения

Окончание таблицы 1

| Временной промежуток<br>[Time interval]              | Пациент<br>[Patient] | Возраст<br>[Age] | КТ-исследование<br>[CT-examination]                                              | Эфф. доза,<br>мЗв<br>[Effective<br>dose, mSv] | Накоп. доза,<br>мЗв<br>[Cumulative<br>dose, mSv] |
|------------------------------------------------------|----------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Март-апрель 2021<br>[March-April 2021]               | П15<br>[P15]         | 64               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                | 22,5                                          | 106                                              |
|                                                      |                      |                  | Брюшная полость+таз<br>[Abdomen+pelvis]                                          | 40,9                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                     | 42,4                                          |                                                  |
| Декабрь 2020-март 2021<br>[December 2020-March 2021] | П16<br>[P16]         | 59               | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                     | 34,8                                          | 112                                              |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                     | 38,1                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                | 38,8                                          |                                                  |
| Март 2020-март 2021<br>[March 2020-March 2021]       | П17<br>[P17]         | 64               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                | 56,3                                          | 195                                              |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]                     | 9,1                                           |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Головной мозг+грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Brain+chest+abdomen+pelvis] | 130                                           |                                                  |
| Ноябрь 2020-март 2021<br>[November 2020-March 2021]  | П18<br>[P18]         | 60               | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                | 58,7                                          | 143                                              |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                                | 84,3                                          |                                                  |

В отделении № 2 среди всех пациентов, прошедших КТ-исследования, были выявлены 9 пациентов (0,3 % от числа всех пациентов), получивших накопленную эффективную

дозу более 100 мЗв за исследованный период. Накопленные эффективные дозы (свыше 100 мЗв) для этих пациентов, представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Накопленные эффективные дозы (свыше 100 мЗв) пациентов, проходивших КТ-исследования в отделении №2 с конца 2019 по начало 2021 гг.**

[Table 2]

**Patients' cumulative effective doses (more than 100 mSv) during CT-examinations in medical department No. 2 from the end of 2019 to the beginning of 2021]**

| Временной промежуток<br>[Time interval]              | Пациент<br>[Patient] | Возраст<br>[Age] | КТ-исследование<br>[CT-examination]                              | Эфф. доза,<br>мЗв<br>[Effective<br>dose, mSv] | Накоп. доза,<br>мЗв<br>[Cumulative<br>dose, mSv] |
|------------------------------------------------------|----------------------|------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Ноябрь 2019-июль 2020<br>[November 2019 – July 2020] | П1<br>[P1]           | 70               | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]     | 32,1                                          | 119                                              |
|                                                      |                      |                  | Брюшная полость [Abdomen]                                        | 23,1                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 32,1                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]     | 32,1                                          |                                                  |
| Январь-март 2020<br>[January-March 2020]             | П2<br>[2]            | 64               | Таз [Pelvis]                                                     | 15,9                                          | 147                                              |
|                                                      |                      |                  | Брюшная полость + таз [Abdomen+pelvis]                           | 12,1                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Грудная клетка + брюшная полость + таз<br>[Chest+abdomen+pelvis] | 30,2                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Таз [Pelvis]                                                     | 15,1                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Таз [Pelvis]                                                     | 23,2                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Брюшная полость + таз [Abdomen+pelvis]                           | 28,1                                          |                                                  |
|                                                      |                      |                  | Таз                                                              | 22,2                                          |                                                  |

# Brief reports

Окончание таблицы 2

| Временной промежуток<br>[Time interval]                      | Паци-<br>ент<br>[Patient] | Воз-<br>раст<br>[Age] | КТ-исследование<br>[CT-examination]                              | Эфф. доза,<br>мЗв<br>[Effective<br>dose, mSv] | Накоп. доза,<br>мЗв<br>[Cumulative<br>dose, mSv] |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Декабрь 2019-январь 2021<br>[December 2019 – January 2021]   | П3<br>[P3]                | 69                    | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 29,7                                          | 119                                              |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 28,1                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость + таз<br>[Chest+abdomen+pelvis] | 37,8                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 23,5                                          |                                                  |
| Февраль 2020-январь 2021<br>[February 2020 – January 2021]   | П4<br>[P4]                | 63                    | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 28,1                                          | 141                                              |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 28,1                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 60                                            |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 24,5                                          |                                                  |
| Декабрь 2019-декабрь 2020<br>[December 2019-December 2020]   | П5<br>[P5]                | 34                    | Шея+грудная клетка+брюшная полость<br>[Neck+chest+abdomen]       | 30,2                                          | 123                                              |
|                                                              |                           |                       | Шея + грудная клетка + брюшная полость<br>[Neck+chest+abdomen]   | 29,8                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Шея + Грудная клетка + брюшная полость<br>[Neck+chest+abdomen]   | 32,6                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Шея+грудная клетка+брюшная полость<br>[Neck+chest+abdomen]       | 30,1                                          |                                                  |
| Январь 2020-февраль 2021<br>[January 2020 – February 2021]   | П6<br>[P6]                | 62                    | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 21,8                                          | 111                                              |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 28,1                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 28,9                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]     | 32,3                                          |                                                  |
| Декабрь 2020-февраль 2021<br>[December 2020 – February 2021] | П7<br>[P7]                | 63                    | Грудная клетка + брюшная полость + таз<br>[Chest+abdomen+pelvis] | 30,4                                          | 117                                              |
|                                                              |                           |                       | Брюшная полость+таз<br>[Abdomen+pelvis]                          | 24,8                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 21,8                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Брюшная полость [Abdomen]                                        | 19,8                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Брюшная полость [Abdomen]                                        | 19,8                                          |                                                  |
| Декабрь 2019-июнь 2020<br>[December 2019 – June 2020]        | П8<br>[P8]                | 40                    | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]     | 33,1                                          | 130                                              |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость + таз<br>[Chest+abdomen+pelvis] | 32,1                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 32,3                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка+брюшная полость<br>[Chest+abdomen]                | 32,1                                          |                                                  |
| Декабрь 2019-декабрь 2020<br>[December 2019-December 2020]   | П9<br>[P9]                | 65                    | Грудная клетка+брюшная полость+таз<br>[Chest+abdomen+pelvis]     | 32,3                                          | 126                                              |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость + таз<br>[Chest+abdomen+pelvis] | 32,1                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость + таз<br>[Chest+abdomen+pelvis] | 31,9                                          |                                                  |
|                                                              |                           |                       | Грудная клетка + брюшная полость<br>[Chest+abdomen]              | 29,8                                          |                                                  |

## Обсуждение

В двух отделениях ЛОКОД были выявлены пациенты, получившие накопленную эффективную дозу свыше 100 мЗв. Максимальная выявленная доза составила 239 мЗв у пациента, которому было проведено 5 КТ-исследований в течение трех месяцев.

Все пациенты получили высокие накопленные эффективные дозы в разные временные промежутки: некоторые пациенты получили за один месяц, у некоторых накопленная эффективная доза была получена за год. В отделении № 1 два пациента получили накопленные дозы 133 мЗв и 151 мЗв в течение одного месяца, 4 пациента получили накопленные дозы 181 мЗв, 119 мЗв, 202 мЗв и 106 мЗв в течение двух месяцев, три пациента получили накопленные дозы 174 мЗв, 239 мЗв и 130 мЗв и течение трех месяцев. В отделении № 2 один пациент получил накопленную дозу 119 мЗв в течение двух месяцев, два пациента получили накопленные дозы 147 мЗв и 117 мЗв в течение трех месяцев.

Высокие накопленные эффективные дозы наблюдаются и в зарубежных странах. По результатам исследования [33] было выявлено 8952 пациентов, каждому из которых в течение 5 лет в среднем было проведено по 19 КТ (максимум — 109 КТ). Это привело к накопленным эффективным дозам для этих пациентов в диапазоне от 100 до 1185 мЗв. В исследованиях [34–35] отмечается, что многократные КТ-исследования с накопленной дозой более 100 мЗв не являются редкостью, и пациенты могут получить такую дозу всего за один день.

Результаты зарубежного исследования [34] показали, что значительная часть пациентов, которые получили накопленные эффективные дозы свыше 100 мЗв, являлись пациентами с незлокачественными новообразованиями и попадали в возрастную группу до 40 лет. В текущем исследовании в отделениях ЛОКОД высокие накопленные дозы, в основном, получили пациенты старше 40 лет. При этом было выявлено два человека, кто попал в возрастную категорию моложе 40 лет.

В исследовании [17] отмечается, что в мире насчитывается около 0,9 миллиона пациентов, которые получили эффективную дозу свыше 100 мЗв и у которых имеются доказательства повышения риска развития рака. Большинство из этих пациентов — тяжелобольные пожилые люди. Из всех пациентов, которые получили эффективную дозу свыше 100 мЗв, примерно каждый пятый пациент был моложе 50 лет [17].

Вопрос необходимости учета и контроля высоких накопленных эффективных доз пациентов является непростым. Для пациентов с тяжелыми патологиями актуальность контроля накопленных эффективных доз снижается, так как на первый план выходит необходимость «здесь и сейчас» провести качественную диагностику. Для пожилых пациентов высокие накопленные эффективные дозы могут не иметь последствий за счет небольшого срока дожития. Учет и оценка накопленных эффективных доз в первую очередь необходимы для молодых пациентов (особенно детей) за счет высокого срока дожития и высоких шансов на выздоровление. Также важно учитывать накопленные поглощенные и эффективные дозы, которые пациенты получают при КТ с целью планирования лучевой терапии для предотвращения развития тканевых реакций, а также для максимально возможного снижения риска негативных последствий облучения в будущем.

На данный момент в Российской Федерации контроль за накопленными эффективными дозами пациентов невозможен в виду многих причин. Однако этими высокими накопленными эффективными дозами можно попытаться управлять. Наилучшими инструментами для этого являются четкое обоснование проведения КТ-исследований и их оптимизация.

Необходимо отметить, что несмотря на то, что в Российской Федерации на сегодняшний день основной мерой облучения пациентов является эффективная доза, в вопросе накопленных эффективных доз первостепенную роль играют накопленные поглощенные дозы в органах, так как с их помощью можно проводить количественную оценку риска. Поэтому для пациентов, которые получают высокие накопленные дозы, немаловажно проводить реконструкцию поглощенных доз.

## Заключение

1. В Российской Федерации, как и в зарубежных странах, могут встречаться высокие накопленные эффективные дозы пациентов. Несмотря на то, что данное исследование было проведено на базе только одного онкологического диспансера, существование высоких накопленных эффективных доз пациентов в России неоспоримо и требует более тщательного изучения.

2. Несмотря на то, что на данный момент отсутствует единая методика оценки риска пациентов, получающих накопленные эффективные дозы свыше 100 мЗв, пациентов, получающих высокие накопленные эффективные дозы, необходимо выявлять. Особенно это касается молодых пациентов (в том числе детей), так как для них риск развития вторичных раков выше за счет большего срока дожития.

3. Необходимо выявлять высокие накопленные эффективные дозы пациентов для реконструкции поглощенных доз, которые необходимо учитывать при планировании дальнейшей лучевой терапии онкобольных.

## Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

## Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Литература

1. Chipiga L., Bernhardsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation // *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. Vol. 169, № 1-4. P. 240-244. DOI: 10.1093/rpd/ncv516.
2. Brambilla M., Vassileva J., Kuchcinska A. et al. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action // *European Radiology*. 2020. Vol. 30, № 5. P. 2493-2501. DOI: 10.1007/s00330-019-06528-7.
3. Mattsson S. Need for individual cancer risk estimates in x-ray and nuclear medicine imaging // *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. Vol. 169, №1-4. P. 11-16. DOI: 10.1093/rpd/ncw034.
4. Vassileva J., Holmberg O. Radiation protection perspective to recurrent medical imaging: what is known and what more is needed? // *The British Journal of Radiology*. 2021. Vol. 94, № 1126. DOI: 10.1259/bjr.20210477.
5. Averbeck D., Salomaa S., Bouffler S. et al. Progress in low dose health risk research // *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. 2018. Vol. 776. P. 46-69. DOI: 10.1016/j.mrrev.2018.04.001.
6. Dauer L., Brooks A., Hoel D. et al. Review and evaluation of updated research on the health effects associated with low-dose ionising radiation // *Radiation Protection Dosimetry*. 2010. Vol. 140, № 2. P. 103-136. DOI: 10.1093/rpd/ncq141.
7. Hamada N., Azizova T., Little M. An update on effects of ionizing radiation exposure on the eye // *The British Journal of Radiology*. 2020. Vol. 93, № 1115. P. 20190829. DOI: 10.1259/bjr.20190829.
8. Kitahara C., Linet M., Drozdovitch V. et al. Cancer and circulatory disease risks in US radiologic technologists associated with performing procedures involving radionuclides // *Occupational and Environmental Medicine*. 2015. Vol. 72, № 11. P. 770-776. DOI: 10.1136/oemed-2015-102834.
9. Little M., Azizova T., Hamada N. Low- and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed



- individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology // *International Journal of Radiation Biology*. 2021. Vol. 97, № 6. P. 782-803. DOI: 10.1080/09553002.2021.1876955.
10. Little M., Wakeford R., Bouffler S. et al. Review of the risk of cancer following low and moderate doses of sparsely ionising radiation received in early life in groups with individually estimated doses // *Environment International*. 2022. Vol. 159. P. 106983. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106983.
  11. McLean A., Adlen E., Cardis E. et al. A restatement of the natural science evidence base concerning the health effects of low-level ionizing radiation // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2017. Vol. 284, № 1862. P. 20171070. DOI: 10.1098/rspb.2017.1070.
  12. NCRP. Commentary No. 24 – Health Effects of Low Doses of Radiation: Perspectives on Integrating Radiation Biology and Epidemiology (2015).
  13. Tang F., Loganovsky K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 192. P. 32-47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.018.
  14. Tapio S., Little M., Kaiser J. et al. Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases // *Environment International*. 2021. Vol. 146. P. 106235. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106235.
  15. Публикация 103 Международной Комиссии по Радиационной защите (МКРЗ) / пер. с англ., под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. 312 с.
  16. Fabritius G., Brix G., Nekolla E. et al. Erratum: Cumulative radiation exposure from imaging procedures and associated lifetime cancer risk for patients with lymphoma // *Scientific Reports*. Vol. 7, № 1. DOI: 10.1038/srep46644.
  17. Rehani M., Yang K., Melick E. et al. Patients undergoing recurrent CT scans: assessing the magnitude // *European Radiology*. 2020. Vol. 30, № 4. P. 1828-1836. DOI: 10.1007/s00330-019-06523-y.
  18. National Council of Radiation Protection and Measurements (2018) Implications of recent epidemiologic studies for the linear-nonthreshold model and radiation protection. NCRP Commentary No. 27. Bethesda, Maryland: NCRP.
  19. Rehani M., Melick E., Alvi R. et al. Patients undergoing recurrent CT exams: assessment of patients with non-malignant diseases, reasons for imaging and imaging appropriateness // *European Radiology*. 2020. Vol. 30, № 4. P. 1839-1846. DOI: 10.1007/s00330-019-06551-8.
  20. Chen J., Einstein A., Fazel R. et al. Cumulative Exposure to Ionizing Radiation From Diagnostic and Therapeutic Cardiac Imaging Procedures // *Journal of the American College of Cardiology*. 2010. Vol. 56, № 9. P. 702-711. DOI: 10.1016/j.jacc.2010.05.014.
  21. Marcu L., Chau M., Bezak E. How much is too much? Systematic review of cumulative doses from radiological imaging and the risk of cancer in children and young adults // *Critical Reviews in Oncology/Hematology*. 2021. Vol. 160. P. 103292. DOI: 10.1016/j.critrevonc.2021.103292.
  22. Griffey R., Sodickson A. Cumulative Radiation Exposure and Cancer Risk Estimates in Emergency Department Patients Undergoing Repeat or Multiple CT // *American Journal of Roentgenology*. 2009. Vol. 192, № 4. P. 887-892. DOI: 10.2214/ajr.08.1351.
  23. Bedetti G., Botto N., Andreassi M. et al. Cumulative patient effective dose in cardiology // *The British Journal of Radiology*. 2008. Vol. 81, № 969. P. 699-705. DOI: 10.1259/bjr/29507259.
  24. Broder J., Bowen J., Lohr J. et al. Cumulative CT Exposures in Emergency Department Patients Evaluated for Suspected Renal Colic // *The Journal of Emergency Medicine*. 2007. Vol. 33, № 2. P. 161-168. DOI: 10.1016/j.jemermed.2006.12.035.
  25. Kim P., Gracias V., Maidment A. et al. Cumulative Radiation Dose Caused By Radiologic Studies in Critically Ill Trauma Patients // *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*. 2004. Vol. 57, № 3. P. 510-514. DOI: 10.1097/01.ta.0000141028.97753.67.
  26. Bhandari V., Patel P., Gurjar O. et al. Impact of repeat computerized tomography replans in the radiation therapy of head and neck cancers // *Journal of Medical Physics*. 2014. Vol. 39, № 3. P. 164. DOI: 10.4103/0971-6203.139005.
  27. Kan M., Leung L., Wong W. et al. Radiation Dose From Cone Beam Computed Tomography for Image-Guided Radiation Therapy // *International Journal of Radiation Oncology\*Biophysics*. 2008. Vol. 70, № 1. P. 272-279. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2007.08.062.
  28. Özseven A., Dirican B. Evaluation of patient organ doses from kilovoltage cone-beam CT imaging in radiation therapy // *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*. Vol. 26, № 2. P. 251-258. DOI: 10.5603/rpor.a2021.0038.
  29. International commission on radiological protection. Draft report: Radiological Protection Aspects of Imaging in Radiotherapy. URL: [https://www.icrp.org/docs/TG116%20RP%20Imaging%20in%20ORT%20for%20Public%20Consultation\\_final.docx](https://www.icrp.org/docs/TG116%20RP%20Imaging%20in%20ORT%20for%20Public%20Consultation_final.docx) (Дата обращения: 08.04.2025).
  30. Derikvand A., Bagherzadeh S., MohammadSharifi A. et al. Estimation of cancer risks due to chest radiotherapy treatment planning computed tomography (CT) simulations // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2023. Vol. 62, № 2. P. 269-277. DOI: 10.1007/s00411-023-01025-4.
  31. Zhang Y., Wu H., Chen Z. et al. Concomitant Imaging Dose and Cancer Risk in Image Guided Thoracic Radiation Therapy // *International Journal of Radiation Oncology\*Biophysics*. 2015. Vol. 93, № 3. P. 523-531. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.06.034.
  32. Bagherzadeh S., Jabbari N., Khalkhali H. Estimation of lifetime attributable risks (LARs) of cancer associated with abdominopelvic radiotherapy treatment planning computed tomography (CT) simulations // *International Journal of Radiation Biology*. 2018. Vol. 94, № 5. P. 454-461. DOI: 10.1080/09553002.2018.1450536.
  33. Rehani M., Hauptmann M. Estimates of the number of patients with high cumulative doses through recurrent CT exams in 35 OECD countries // *Physica Medica*. 2020. Vol. 76. P. 173-176. DOI: 10.1016/j.ejmp.2020.07.014.
  34. Rehani M., Melick E., Alvi R. et al. Patients undergoing recurrent CT exams: assessment of patients with non-malignant diseases, reasons for imaging and imaging appropriateness // *European Radiology*. 2020. Vol. 30, № 4. P. 1839-1846. DOI: 10.1007/s00330-019-06551-8.
  35. Rehani M., Heil J., Baliyan V. Multicentric study of patients receiving 50 or 100 mSv in a single day through CT imaging—frequency determination and imaging protocols involved // *European Radiology*. 2021. Vol. 31, № 9. P. 6612-6620. DOI: 10.1007/s00330-021-07734-y.

Поступила: 08.04.2025

**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](mailto:druzhininapauline@gmail.com)  
ORCID: 0000-0003-2921-067X

Для цитирования: Дружинина П.С. Накопленные дозы пациентов при проведении КТ-исследований в российской клинической практике // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 2. С. 131–140. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-131-140

## Patients' cumulative doses during CT-examinations in Russian clinical practice

Polina S. Druzhinina

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

*In modern clinical practice, multiple computed tomography examinations are increasingly common, which can lead to the accumulation of significant effective doses of patients. The aim of this study was to identify cases of high cumulative effective doses (more than 100 mSv) of adult patients undergoing computed tomography examinations in two departments of the Leningrad Regional Clinical Oncological Dispensary. Materials and Methods. The study is based on the analysis of patient effective dose data obtained from computed tomography examination logbooks for the periods 2020–2021 (Department No. 1) and 2019–2021 (Department No. 2). Effective doses were calculated based on dose-length product values using appropriate conversion coefficients in accordance with methodological guidelines MU 2.6.1.3584-19. Results. The study results showed that in Department No. 1, 1 % of patients (18 individuals) received cumulative doses exceeding 100 mSv, with a maximum value of 239 mSv. In Department No. 2, the corresponding figure was 0.3 % (9 individuals), with a maximum dose of 147 mSv. The dose accumulated over both extended periods (up to a year) and short intervals (less than a month). A comparison of the obtained results with international data showed that cumulative effective doses more than 100 mSv are often observed in non-oncological patients, including patients under the age of 40. In the study sample, most patients were over 40 years old. Justification and optimization of computed tomography examinations are the main tools for managing high cumulative effective doses in patients. It is important to emphasize the need to assess not only effective but also absorbed organ doses during multiple computed tomography examinations, especially when planning radiation therapy. Conclusions. Systematic monitoring of high cumulative effective doses in patients is necessary in the Russian Federation, particularly among younger patients.*

**Key words:** computed tomography, effective doses, cumulative doses.

## Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

## Sources of funding

The study had no sponsorship.

## References

- Chipiga L, Bernhardtsson C. Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 240-244. DOI: 10.1093/rpd/ncv516.
- Brambilla M, Vassileva J, Kuchcinska A, Rehani M. Multinational data on cumulative radiation exposure of patients from recurrent radiological procedures: call for action. *European Radiology*. 2020;30(5): 2493-2501. DOI: 10.1007/s00330-019-06528-7.
- Mattsson S. Need for individual cancer risk estimates in x-ray and nuclear medicine imaging. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016;169(1-4): 11-16. DOI: 10.1093/rpd/ncw034.
- Vassileva J, Holmberg O. Radiation protection perspective to recurrent medical imaging: what is known and what more is needed? *The British Journal of Radiology*. 2021;94(1126): 20210477. DOI: 10.1259/bjr.20210477.
- Averbeck D, Salomaa S, Bouffler S, Ottolenghi A, Smyth V, Sabatier L. Progress in low dose health risk research. *Mutation Research / Reviews in Mutation Research*. 2018;776: 46-69. DOI: 10.1016/j.mrrev.2018.04.001.
- Dauer L, Brooks A, Hoel D, Morgan W, Stram D, Tran P. Review and evaluation of updated research on the health effects associated with low-dose ionising radiation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2010;140(2): 103-136. DOI: 10.1093/rpd/ncq141.
- Hamada N, Azizova T, Little M. An update on effects of ionizing radiation exposure on the eye. *The British Journal of Radiology*. 2020;93(1115): 20190829. DOI: 10.1259/bjr.20190829.
- Kitahara C, Linet M, Drozdovitch V, Alexander B, Preston D, Simon S, et al. Cancer and circulatory disease risks in US radiologic technologists associated with performing procedures involving radionuclides. *Occupational and Environmental Medicine*. 2015;72(11): 770-776. DOI: 10.1136/oemed-2015-102834.
- Little M, Azizova T, Hamada N. Low- and moderate-dose non-cancer effects of ionizing radiation in directly exposed individuals, especially circulatory and ocular diseases: a review of the epidemiology. *International Journal of Radiation Biology*. 2021;97(6): 782-803. DOI: 10.1080/09553002.2021.1876955.
- Little M, Wakeford R, Bouffler S, Abalo K, Hauptmann M, Hamada N, et al. Review of the risk of cancer following low and moderate doses of sparsely ionising radiation received in early life in groups with individually estimated doses. *Environment International*. 2022;159(H.Д.): 106983. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106983.
- McLean A, Adlen E, Cardis E, Elliott A, Goodhead D, Harms-Ringdahl M, et al. A restatement of the natural science evidence base concerning the health effects of low-level ionizing radiation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2017;284(1862): 20171070. DOI: 10.1098/rspb.2017.1070.
- NCRP. Commentary No. 24 – Health Effects of Low Doses of Radiation: Perspectives on Integrating Radiation Biology and Epidemiology (2015).
- Tang F, Loganovsky K. Low dose or low dose rate ionizing radiation-induced health effect in the human. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192: 32-47. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.018.
- Tapio S, Little M, Kaiser J, Impens N, Hamada N, Georgakilas A, et al. Ionizing radiation-induced circulatory and metabolic diseases. *Environment International*. 2021;146(H.Д.): 106235. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106235.
- ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection: translation from English. Ed. by MF Kiselev, NK Shandala. Moscow: "Alana"; 2009. 312 p. (In Russian).
- Fabritius G, Brix G, Nekolla E, Klein S, Popp H, Meyer M, et al. Erratum: Cumulative radiation exposure from imaging procedures and associated lifetime cancer risk for patients with lymphoma. *Scientific Reports*. 2017;7(1): 46644. DOI: 10.1038/srep46644.

Anastasia V. Likhacheva

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

17. Rehani M, Yang K, Melick E, Heil J, Šalát D, Sensakovic W. et al. Patients undergoing recurrent CT scans: assessing the magnitude. *European Radiology*. 2020;30(4): 1828-1836. DOI: 10.1007/s00330-019-06523-y.
18. National Council of Radiation Protection and Measurements (2018) Implications of recent epidemiologic studies for the linear-nonthreshold model and radiation protection. NCRP Commentary No. 27. Bethesda, Maryland: NCRP.
19. Rehani M, Melick E, Alvi R, Doda Khera R, Batool-Anwar S, Neilan T, et al. Patients undergoing recurrent CT exams: assessment of patients with non-malignant diseases, reasons for imaging and imaging appropriateness. *European Radiology*. 2020;30(4): 1839-1846. DOI: 10.1007/s00330-019-06551-8.
20. Chen J, Einstein A, Fazel R, Krumholz H, Wang Y, Ross J. et al. Cumulative Exposure to Ionizing Radiation From Diagnostic and Therapeutic Cardiac Imaging Procedures. *Journal of the American College of Cardiology*. 2010;56(9): 702-711. DOI: 10.1016/j.jacc.2010.05.014.
21. Marcu L, Chau M, Bezak E. How much is too much? Systematic review of cumulative doses from radiological imaging and the risk of cancer in children and young adults. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*. 2021;160: 103292. DOI: 10.1016/j.critrevonc.2021.103292.
22. Griffey R, Sodickson A. Cumulative Radiation Exposure and Cancer Risk Estimates in Emergency Department Patients Undergoing Repeat or Multiple CT. *American Journal of Roentgenology*. 2009;192(4): 887-892. DOI: 10.2214/ajr.08.1351.
23. Bedetti G, Botto N, Andreassi M, Traino C, Vano E, Picano E. Cumulative patient effective dose in cardiology. *The British Journal of Radiology*. 2008;81(969): 699-705. DOI: 10.1259/bjr/29507259.
24. Broder J, Bowen J, Lohr J, Babcock A, Yoon J. Cumulative CT Exposures in Emergency Department Patients Evaluated for Suspected Renal Colic. *The Journal of Emergency Medicine*. 2007;33(2): 161-168. DOI: 10.1016/j.jemermed.2006.12.035.
25. Kim P, Gracias V, Maidment A, Shea M, Reilly P, Schwab C. Cumulative Radiation Dose Caused By Radiologic Studies in Critically Ill Trauma Patients. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*. 2004;57(3): 510-514. DOI: 10.1097/01.ta.0000141028.97753.67.
26. Bhandari V, Patel P, Gurjar O, Gupta K. Impact of repeat computerized tomography replans in the radiation therapy of head and neck cancers. *Journal of Medical Physics*. 2014;39(3): 164. DOI: 10.4103/0971-6203.139005.
27. Kan M, Leung L, Wong W, Lam N. Radiation Dose From Cone Beam Computed Tomography for Image-Guided Radiation Therapy. *International Journal of Radiation Oncology\*Biophysics*. 2008;70(1): 272-279. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2007.08.062.
28. Özseven A, Dirican B. Evaluation of patient organ doses from kilovoltage cone-beam CT imaging in radiation therapy. *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*. 2021;26(2): 251-258. DOI: 10.5603/rpor.a2021.0038.
29. International commission on radiological protection. Draft report: Radiological Protection Aspects of Imaging in Radiotherapy. URL: [https://www.icrp.org/docs/TG116%20RP%20Imaging%20in%20RT%20for%20Public%20Consultation\\_final.docx](https://www.icrp.org/docs/TG116%20RP%20Imaging%20in%20RT%20for%20Public%20Consultation_final.docx) (Дата обращения: 08.04.2025 )
30. Derikvand A, Bagherzadeh S, MohammadSharifi A, Khoshgard K, AllahMoradi F. Estimation of cancer risks due to chest radiotherapy treatment planning computed tomography (CT) simulations. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2023;62(2): 269-277. DOI: 10.1007/s00411-023-01025-4.
31. Zhang Y, Wu H, Chen Z, Knisely J, Nath R, Feng Z, et al. Concomitant Imaging Dose and Cancer Risk in Image Guided Thoracic Radiation Therapy. *International Journal of Radiation Oncology\*Biophysics*. 2015;93(3): 523-531. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.06.034.
32. Bagherzadeh S, Jabbari N, Khalkhali H. Estimation of lifetime attributable risks (LARs) of cancer associated with abdominopelvic radiotherapy treatment planning computed tomography (CT) simulations. *International Journal of Radiation Biology*. 2018;94(5): 454-461. DOI: 10.1080/09553002.2018.1450536.
33. Rehani M, Hauptmann M. Estimates of the number of patients with high cumulative doses through recurrent CT exams in 35 OECD countries. *Physica Medica*. 2020;76: 173-176. DOI: 10.1016/j.ejmp.2020.07.014.
34. Rehani M, Melick E, Alvi R, Doda Khera R, Batool-Anwar S, Neilan T, et al. Patients undergoing recurrent CT exams: assessment of patients with non-malignant diseases, reasons for imaging and imaging appropriateness. *European Radiology*. 2020;30(4): 1839-1846. DOI: 10.1007/s00330-019-06551-8.
35. Rehani M, Heil J, Baliyan V. Multicentric study of patients receiving 50 or 100 mSv in a single day through CT imaging—frequency determination and imaging protocols involved. *European Radiology*. 2021;31(9): 6612-6620. DOI: 10.1007/s00330-021-07734-y.

Received: April 08, 2025

**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: [druzhinina@pauline@gmail.com](mailto:druzhinina@pauline@gmail.com))  
ORCID: 0000-0003-2921-067X

**For citation: Druzhinina P.S. Patients` cumulative doses during CT-examinations in Russian clinical practice. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 2. P. 131–140. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-2-131-140**



## 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, 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 интервалом 1,5. Ориентация книжная (портрет) с полями слева –

2,5 см, сверху – 2 см, справа – 1,5 см, снизу – 2 см. Нумерация страниц – сверху в центре, первая страница без номера. Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

### 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](http://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). Резюме выполняет функцию расширенного названия статьи и повествует о ее содержании. В резюме следует излагать только релевантную информацию.

В нем должны быть четко обозначены следующие составные части:

– **Введение (Introduction):** ставится научная проблема и цель статьи.

– **Материалы и методы (Materials and Methods):** даются сведения об объекте и последовательности выполнения исследования.

– **Результаты исследования и обсуждение (Results and Discussion):** приводятся конкретные авторские результаты исследования.

– **Заключение (Conclusion):** указываются практическая значимость и перспективы исследования.

Все пишется сплошным текстом, без выделения абзацев. Для остальных статей (обзор, лекция, дискуссия) резюме должно включать краткое изложение основной концепции статьи, по сути краткое изложение самой статьи. **Резюме не должно содержать аббревиатур и сокращений, кроме общепринятых в мировой научной литературе.** Резюме является независимым от статьи источником информации для размещения в различных научных базах данных. **Обращаем особое внимание на качество английской версии резюме!** Оно будет опубликовано отдельно от основного текста статьи и должно быть понятным без ссылки на саму публикацию.



– В конце приводятся **ключевые слова или словосочетания** на русском и английском языках (не более 12) в порядке значимости. **Ключевые слова также не должны содержать аббревиатур и сокращений. Ключевые слова** являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим, они должны отражать основные положения, достижения, результаты, терминологию научного исследования.

#### Текст статьи

Текст оригинального научного исследования должен состоять из выделяемых заголовками разделов: «Введение», «Цель исследования», «Задачи исследования», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «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 подобного материала 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 вариabельности 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 подобного материала 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 ре-

комендации, 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 ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».

Ссылаться нужно в первую очередь на оригинальные источники из научных журналов, включенных в глобальные индексы цитирования. Необходимо правильно оформить ссылку на источник. Следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес),

год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес 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.)]. Или .....согласно ГОСТ Р 5177212001. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Входные и выходные параметры и типы соединений. Технические требования [перевод на английский язык (In Russ.)].

**Подстрочные ссылки (сноски):**

<sup>1</sup> 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.)]

<sup>1</sup> 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. 447–486.

Ettinger S.J., Feldman E.C. Textbook of veterinary medicine: diseases of the dog and cat. 6th ed. St. Louis (MO): Elsevier Saunders, 2005. Section 7, Dietary considerations of systemic problems, P. 553–598.

**Статьи из журнала, сборника:**

Стамат И.П., Стамат Д.И. К обоснованию нормативов по содержанию природных радионуклидов в облицовочных изделиях и материалах // Радиационная гигиена. 2009. Т. 2, № 1. С. 46-52.

Bailliff I.K., Slim H.A. Development of reference database for gamma dose assessment in retrospective luminescence dosimetry // *Radiation Measurements*. 2008. Vol. 43. P. 859–863.

**Из сборника конференций (тезисы):**

Кушинников С.И., Цапалов А.А. Проблемы достоверности оценки среднегодовой ЭРОА радона при радиационно-гигиеническом обследовании помещений. Сборник докладов и тезисов науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории Российской Федерации», Москва, 25-26 октября 2007. М., 2007. С. 50-51.

**Ссылки на Интернет-ресурсы:**

Официальный сайт Медицинского радиологического научного центра РАМН (МРНЦ РАМН). URL: <http://www.mrrc.obninsk/> (Дата обращения: 19.02.2010).

Дубнер П.Н. Англо-русский статистический глоссарий: основные понятия. URL: <http://masters.donntu.org/2002/fvti/spivak/library/book2/book2.htm> (Дата обращения: 16.06.2019).

**Ссылки на статьи с DOI:**

Маткевич Е.И., Синецын 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., Статат И.П. О необходимости радиационного обследования зданий после окончания строительства, капитального ремонта или реконструкции // *Радиационная гигиена*. 2010. Т. 3, № 1. Деп. 10.02.2010 г.

**Патенты:**

Карамуллин М.А., Шутко А.Н., Сосюкин А.Е. и др. Пат. № 2268031 Российская Федерация, МПК А61Н23.00. Способ коррекции отдаленных последствий радиационного воздействия в малых дозах. опубл. 20.01.2006, БИ № 02.

**Из газеты:**

Фомин Н.Ф., Иванькович Ф.А., Веселов Е.И. Выдающийся ученый, педагог, воспитатель. // *Военный врач*. 1996. № 8 (1332) С. 5.

**Диссертация и автореферат диссертации:**

Фенухин В.И. Этнополитические конфликты в современной России: на примере Северо-Кавказского региона: дис. ... канд. полит. наук: защищена 22.01.02: утв. 15.07.02. М., 2002. 215 с.

Кадука М.В. Роль грибов в формировании дозы внутреннего облучения населения после аварии на Чернобыльской АЭС: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Обнинск, 2001. 23 с.

**Второй список литературы (References)** полностью соответствует первому списку литературы. Оформляется также в соответствии с Ванкуверским форматом цитирования. При этом в библиографических источниках на русском языке фамилии и инициалы авторов должны быть транслитерированы. Название работы переводится на английский язык. Иностранные библиографические источники из первого списка полностью повторяются во втором списке. Более подробно правила представления литературных источников во втором списке представлены ниже.

**Примеры:**

**Статья 1-6 авторов**

Lee C, Kim KP, Bolch WE, Moroz BE, Folio L. NCICT: a computational solution to estimate organ doses for pediatric and adult patients undergoing CT scans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(4): 891-909.

Stamat IP, Kormanovskaya TA, Gorsky GA, Eremin AV. To the justification of requirements to the control of radiation protection indicators for buildings and facilities during their commissioning. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2009;2(4): 10–15 (In Russian).

**Статья 7 и более авторов** (указываются первые 6 авторов, далее «, et al.»)

Fesenko SV, Soukhova NV, Sanzharova NI, Avila R, Spiridonov SI, Klein D, et al. Identification of processes governing long-term accumulation of <sup>137</sup>Cs in forest trees following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2001;40: 105–113.

Vodovatov AV, Chipiga LA, Piven PA, Trufanov GE, Berkovich GV, Mashchenko IA, et al. Assessment of the absorbed doses in the fetus from the computed tomography of the chest for the pregnant women. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(3): 126-135. (In Russian).

Morozov SP, Kuzmina ES, Vetsheva NN, Gombolevsky VA, Lantukh ZA, Polishuk NS, et al. Moscow Screening: Lung Cancer Screening With Low-Dose Computed Tomography. *Problemy sotsialnoy gigiyeny, zdavookhraneniya i istorii meditsiny = Problems of social hygiene, health care and history of medicine*. 2019;27(Special Issue): 630-636. (In Russian) DOI: 10.32687/0869-866X-2019-27-si1-630-636.

**Статья в электронном журнале**

Errami M, Garner H. A tale of two citations. *Nature*. 2008;451(7177): 397–399. Available from: <http://www.nature.com/nature/journal/v451/n7177/full/451397a.html> [Accessed 20 January 2015].

Read B. Anti-cheating crusader vexes some professors. *Chronicle of Higher Education*. 2008;54(25). Available from: <http://global.factiva.com/> [Accessed 18 June 2015].

**Статья в электронном журнале с DOI:**

Kanneganti P, Harris JD, Brophy RH, Carey JL, Lattermann C, Flanigan DC. The effect of smoking on ligament and cartilage surgery in the knee: a systematic review. *American Journal of Sports Medicine*. 2012;40(12): 2872-2878. Available from: <http://ajs.sagepub.com/content/40/12/2872> DOI: 10.1177/0363546512458223 [Accessed 19 Feb 2013].

**Книга (печатная)**

Carlson BM. Human embryology and developmental biology. 4th ed. St. Louis: Mosby; 2009. 541 p.

**Книга (электронная)**

Shreeve DF. Reactive attachment disorder: a case-based approach. New York: Springer; 2012. 85 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-1647-00363546512458223> [Accessed 2 Nov 2012]

**Отчет официальной организации (государственный, ведомственный, пр.).**

Rowe IL, Carson NE. Medical manpower in Victoria. East Bentleigh (AU): Monash University, Department of Community Practice; 1981. 35 p. Report No.: 4.

Leatherwood S. Whales, dolphins, and porpoises of the western North Atlantic. U.S. Dept. of Commerce. Report number: 63; 2001.

**Веб-страница**

Diabetes Australia. Diabetes globally. Canberra ACT: Diabetes Australia: Available from: <http://www.diabetesaustralia.com.au/en/Understanding-Diabetes/DiabetesGlobally/> [Accessed 5 November 2012].

European Space Agency. Rosetta: rendezvous with a comet. Available from: <http://rosetta.esa.int> [Accessed 15 June 2015].

**Из сборника конференций (тезисы)**

Wittke M. Design, construction, supervision and long-term behaviour of tunnels in swelling rock. In: Van Cotthem A, Charlier R, Thimus J-F, Tshibangu J-P. (eds.) Eurock 2006: multiphysics coupling and longterm behaviour in rock mechanics: Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2006, 9–12 May 2006, Liege, Belgium. London: Taylor & Francis; 2006. P. 211–216.

**Стандарт**

British Standards Institution. BS EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3. Design of steel structures. General rules. Structural fire design. London: BSI; 2005.

**Методические рекомендации/руководство**

National Institute for Health and Care Excellence (NICE), Tuberculosis: NICE Guideline [NG33]. 2016. Available from: <https://www.nice.org.uk/guidance/ng33/resources/tuberculosis-1837390683589> [Accessed 27 May 2017].



**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

После списков литературы указываются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество (полностью) на русском языке и в транслитерации; ученая степень, ученое звание, должность в учреждении/учреждениях, рабочий адрес с почтовым индексом на русском и английском языках, рабочий телефон и адрес электронной почты всех авторов, идентификационный номер ORCID. Сокращения не допускаются.

**ПОРЯДОК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В РЕДАКЦИЮ****Все статьи печатаются в журнале бесплатно.**

Направляя статью для публикации в данном журнале, авторы соглашаются со следующим:

- Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации работы на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0) которая позволяет другим распространять данную работу с обязательным сохранением ссылок на авторов оригинальной работы и оригинальную публикацию в этом журнале.
- Все авторы внимательно прочитали Этику научных публикаций журнала и с пониманием воспримут санкции за его нарушение.
- Авторы статьи принимают положения: «Авторское соглашение (публичная оферта) о публикации статьи в научном журнале «Радиационная гигиена».
- Согласно вступившей в действие IV части Гражданского кодекса Российской Федерации, между авторами статей и редакцией журнала заключается **Лицензионный договор (оферта) о предоставлении права использования произведения** издателю. Полный текст авторского договора (оферты) размещен на сайте журнала в разделе «Правила для авторов».

Основным способом подачи рукописи статьи в редакцию является отправка через сайт журнала <https://www.radhyg.ru> в форме присоединенных файлов. Вся остальная переписка между редакцией, авторами и рецензентами производится по электронной почте журнала по адресу: [journal@niirg.ru](mailto:journal@niirg.ru).

При подаче рукописи должны быть загружены следующие файлы:

1. Текст рукописи (титульный лист, структурированное резюме, ключевые слова, текст статьи, полные данные об авторах, необходимые для обработки в Российском индексе научного цитирования, сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования, список литературы). На английском языке представляется следующая ин-

формация: название статьи, транслитерация фамилий авторов в латинском варианте по системе BGN (Board of Geographic Names), представленной на сайте [www.translit.ru](http://www.translit.ru), название организации с указанием города, страны; структурированное резюме и ключевые слова; сведения об авторах в том же объеме, как на русском; сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей, благодарности, информация о конфликте интересов, сведения об источниках финансирования; список литературы – References). Формат документа при отправке в редакцию – .doc или .docx.

2. Иллюстрации в отдельных файлах в формате Tiff, JPEG с разрешением 300 dpi. При отправке файла обязательно указывайте номер рисунка, соответствующий его номеру в статье.

3. Лицензионный договор о предоставлении права использования произведения издателю. Электронный вариант заполненного и подписанного всеми авторами договора следует отправить в качестве дополнительного файла в формате .pdf.

4. Официальное направление учреждения, в котором выполнена данная работа. В официальном направлении должны быть перечислены фамилии всех авторов и указано название работы в формате .pdf.

5. Экспертное заключение об отсутствии ограничений на публикацию материала в открытой печати и виза научного руководителя на первой странице статьи в формате .pdf.

**ДЕЙСТВИЯ РЕДАКЦИИ В СЛУЧАЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ПЛАГИАТА, ФАБРИКАЦИИ И ФАЛЬСИФИКАЦИИ ДАННЫХ**

В случае обнаружения недобросовестного поведения со стороны автора, плагиата, фабрикаций или фальсификации данных редакция руководствуется правилами COPE. Под недобросовестным поведением мы понимаем любые действия ученого, включающие ненадлежащее обращение с объектами изучения или намеренное манипулирование научной информацией, при котором она перестает отражать наблюдаемые исследования; а также поведение ученого, которое не соответствует принятым этическим и научным стандартам.

К недобросовестному поведению журнал «Радиационная гигиена» не относит честные ошибки или честные расхождения в плане, проведении, интерпретации или оценке исследовательских методов, или результатов, или недобросовестное поведение, не связанное с научным процессом.

Справки по телефону: (812)2334283 и (812)2335016 (редакция журнала «Радиационная гигиена»). Факс: (812)2335363, (812)2334283.